



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseaux Electrique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Rekibi Houssam et Lamaa Ilyas

Le : 28/06/2022

Dimensionnement d'un Système Photovoltaïque Pour La Protection Cathodique d'un oléoduc OK1-34''

Jury :

Dr.	Salhi Ahmed	MCA	Université de Biskra	Président
M.	Rouina Abd Elhafid	MCA	Université de Biskra	Examineur
Pr.	Naimi Djemai	Pr	Université de Biskra	ENCADREURE

Année universitaire : 2021- 2022



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseaux Electrique

Réf. :

Dimensionnement d'un Système Photovoltaïque Pour La Protection Cathodique d'un oléoduc OK1-34''

Le : 28/06/2022

Présenté par :

Rekibi Houssam
Lamaa Ilyas

Avis favorable de l'encadreur :

Pr. Naimi Djemai

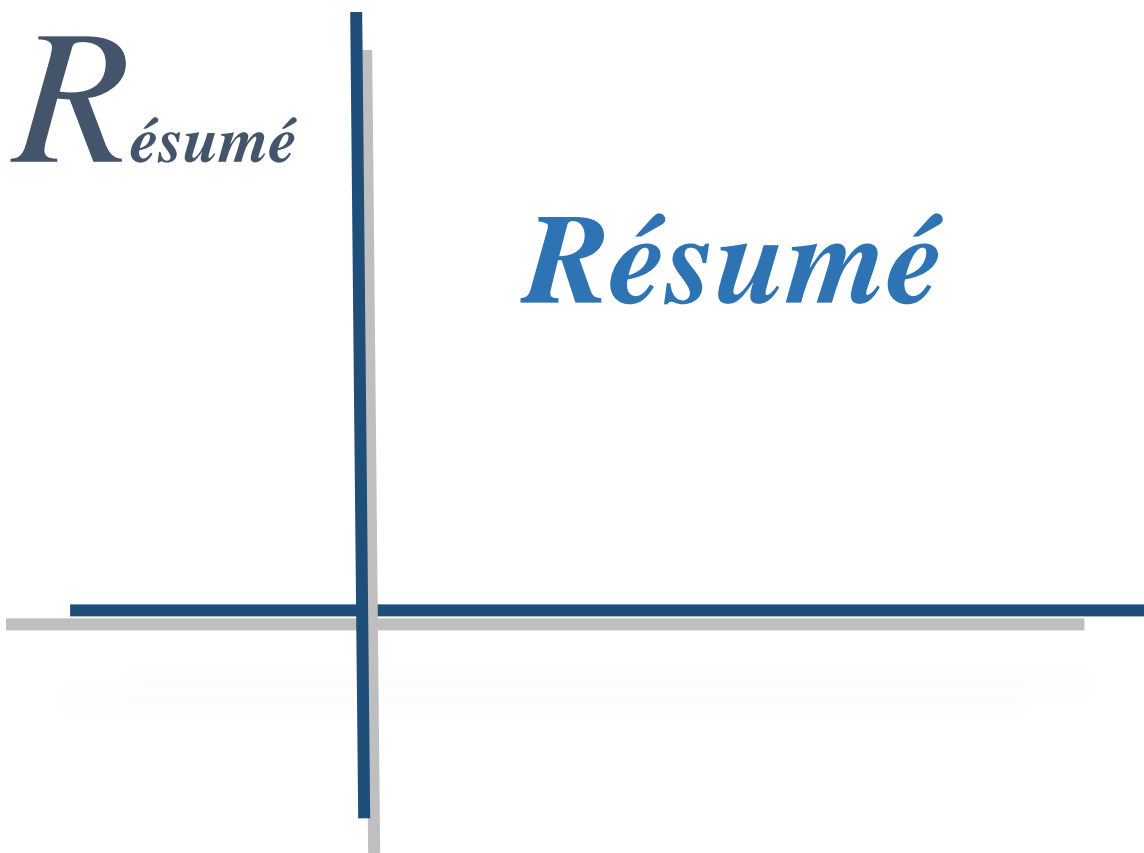
Signature Avis favorable du Président du Jury

Dr. Salhi Ahmed

Cachet et signature

Résumé

Résumé



Résumé

RESUMES

La corrosion : un ennemi industriel redoutable, Phénomène naturel complexe, elle a toujours été un problème industriel majeur. Malgré les avancées scientifiques technologiques, la corrosion cause toujours un grand nombre de dommages et touche de nombreux domaines. Ce phénomène est particulièrement préoccupant pour les producteurs de métaux, ainsi que pour les ingénieurs travaillant dans le domaine Pipelines industriels, en particulier lignes de transport de pétrole, L'objectif de cette étude travail est de résoudre le problème de la corrosion au niveau de la industrie pétrolierai aux niveau du pipeline par proposition d'une solution qui consiste l'utilisation de la protection cathodique par courant imposé alimenté par le solaire photovoltaïque, ainsi le dimensionnement du système de protection cathodique et le solaire photovoltaïque autonome. Enfin, un comparatif économique et pratique entre la solution utilisée par l'entreprise, d'inhibiteurs et les anodes réactives et la solution proposée par nous.

Mots clés : corrosion, protection cathodique, solaire photovoltaïque, dimensionnement.

ملخص

التآكل عدو صناعي هائل، ظاهرة طبيعية معقدة، لطالما كان مشكلة صناعية كبرى. على الرغم من التقدم العلمي والتقدم التكنولوجي المتراكم على مدى العقود القليلة الماضية، لا يزال التآكل يسبب قدرًا كبيرًا من الضرر ويؤثر على العديد من المجالات. هذه الظاهرة ذات أهمية خاصة لمنتجات المعادن، وكذلك المهندسين العاملين في مجال الأنابيب الصناعية، وخاصة خطوط نقل النفط، الهدف من دراسة العمل هذه هو حل مشكلة التآكل على مستوى الصناعة البترولية على مستوى خط الأنابيب من خلال اقتراح حل يتكون من استخدام الحماية الكاثودية بواسطة التيار القسري المدعوم بالطاقة الشمسية الكهروضوئية، وبالتالي فإن تحجيم نظام الحماية الكاثودية والشمسية. في الأخير مقارنة اقتصادية وعملية بين الحل المستخدم من قبل الشركة والمتمثل في المثبطات والأنودات التفاعلية مع الحل المقترح.

الكلمات المفتاحية: التآكل، الحماية الكاثودية، الطاقة الشمسية الكهروضوئية، الأنودات التفاعلية، المثبطات.

Absract

Corrosion: a formidable industrial enemy, a complex natural phenomenon, it has always been a major industrial problem. Despite scientific advances and technological advances

Résumé

accumulated over the past few decades, corrosion still causes a great deal of damage and affects many areas. This phenomenon is of particular concern for metal producers, as well as for engineers working in the field Industrial pipelines, in particular oil transmission lines, The objective of this study work is to solve the problem of corrosion at the level of the oil industry at the level of the pipe line by proposing a solution which consists of the use of cathodic protection by impressed current powered by photovoltaic solar energy, as well as the sizing of the cathodic protection system and autonomous photovoltaic solar energy. Finally, an economic and practical comparison between the solution used by the company, inhibitors and reactive anodes and the solution proposed by us.

Keywords: corrosion, cathodic protection, solar energy, solar photovoltaic, inhibitors.



Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

A mes chers frères, **MEBAREK, SAMIR, ROCHDI** pour leur appui et leur
encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours
universitaire, Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant

allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Merci d'être toujours là pour moi.

Tous mes chers professeurs ; Qui n'a pas hésité à m'aider

Je consacre cette thèse à Mes professeurs de l'université de **Mohammed khider**

Biskra qui doivent voir dans Ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

Houssam.





Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse et leurs prières tout au long de mes études,

Mes chers frères, **Ramzi, Choukri et Wassim** pour leur appui et leur encouragement,

Mes chères sœurs pour leurs encouragements et leur soutien moral,

Toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire, Merci ! D'être toujours là pour moi.

Tous mes chers professeurs ; Qui n'a pas hésité à m'aider

Je consacre cette thèse à Mes professeurs de l'université de **Mohammed khider**

Biskra qui doivent voir dans Ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

Nyas.



Remerciements

Avant tous, nous voudrions remercier Dieu Tout-Puissant de m'avoir permis ce travail Nos remerciements vont à tous **les enseignants** qui nous ont

Fourni leurs connaissances, depuis les premières étapes

De l'étude jusqu'à ce moment.

Nous adressons également un mot de remerciement au professeur superviseur "**NAIMI DJEMAI** ", qui nous a aidés à réaliser cette thèse, et nombre de

jury **Salhi Ahmed, Rouina Abd Elhafid**

Nous remercions également les Personnes sur le terrain travaillant à la station de pompage de pétrole **SP3 « BISKRA »**, qui ne nous ont pas épargnés leurs conseils et orientations. Nous tenons à citer en particulier chacun de « **REKIBI MEBAREK** » Et celui en charge de la protection cathodique, **M. kelala hamid**",

Nous remercions également tous ceux qui nous ont tendu l

À main de près ou de loin.

Nous remercions également tous **les professeurs** et travailleurs du Collège

Des sciences et de la technologie.



Listes des figures

Figure I.1: Mécanisme de corrosion des aciers ordinaires en présence de chlorure La réduction d'oxygène sur les aciers.....	5
Figure. I.2: Représentation schématique d'un processus électrochimique de corrosion.....	6
Figure I.3 : Corrosion uniforme.....	8
Figure. I.4 : Corrosion par piqûre.....	8
Figure I.5 : Cellule de corrosion bimétallique.....	8
Figure I.6 : Corrosion galvanique.....	8
Figure I.7: La corrosion des joints de grains près de la surface laisse les grains libres à la surfa Laisse les grains libres a la source.....	9
Figure I.8 : Dézincification du laiton (corrosion sélective).....	10
Figure I.9 : Corrosion caverneuse.....	10
Figure I.10 : Corrosion sous contrainte.....	10
Figure I.11 : Corrosion érosion.....	10
Figure I.12: Prévention par la forme du récipient.....	13
Figure I.13: Protection contre la corrosion galvanique :(a) isolation électrique, (b) : pièce Sacrificielle.....	13
Figure I.14: Réduction des contraintes locales dans une tête de vis.....	13
Figure I.15: Diminution des risques de corrosion – érosion et de corrosion – cavitation.....	14
Figure II.1 : Principe de fonctionnement de la méthode de Wenner.....	25
Figure II.2: Densité de courant et potentiel de la protection cathodique.....	26
Figure II.3: schéma d'une installation de protection par anode soluble.....	28
Figure II.4 : schéma d'une installation de protection par courant imposé.....	31
Figure II.5: configuration horizontal des anodes (en série).....	33
Figure II.6: configuration vertical des anodes	33
Figure II.7: installation d'un déversoir en profondeur (chapelet).....	34
Figure II.8: schéma simplifier d'un transformateur-redresseur.....	37
Figure II.9 : poste de soutirage à bain d'huile.....	37
Figure II.10 : coffret des résistances de stabilisation.....	37
Figure II.11 : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	40

Figure II.12: panneau solaire Monocristallin.....	41
Figure II.13: régulateur de charge solaire type « Steca ».....	42
Figure II.14: batteries d'accumulateurs au plomb.....	43
Figure II.15 : générateur photovoltaïque pour un poste de protection cathodique.....	43
Figure III.1: Situation géographique de SP3.....	45
Figure III. 2 : Profile et position de SP3	45
Figure III.3: Variation du potentiel de protection le long d'une conduite.....	51
Figure III.4 : Circuit électrique du système de protection	56
Figure III.5: Convertisseur DC-DC boos.....	70

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Résistance intrinsèque à la corrosion des métaux purs dans différents milieux.....	12
Tableau II.1 : Critères du seuil de potentiel de protection selon la norme EBS 736.....	21
Tableau II.2 : Critères du seuil de potentiel de protection selon la norme DIN30676.....	21
Tableau II.3 : évaluation de taux d'agressivité du sol.....	24
Tableau II.4 : Corrosivité du sol selon la résistivité.....	24
Tableau II.5 : densité de courant de protection.....	27
Tableau II.6 : Caractéristiques électrochimiques de l'anode de zinc.....	29
Tableau II.7 : Caractéristiques électrochimiques de l'anode de d'aluminium.....	29
Tableau II.8 : Caractéristiques électrochimiques de l'anode de magnésium.....	30
Tableau II.9 : caractéristiques des matériaux d'anodes à courant imposé.....	34
Tableau II.10 : Tailles de câbles mono conducteur pour la protection cathodique.....	36
Tableau II.11 : processus de régulation du régulateur.....	42
Tableau III.1 : Irradiation moyenne de certaines régions.....	57
Tableau III.2 : Composition chimique d'anodes Ferro silicium.....	65
Tableau III.3 : Coups des installations réseau Sonal gaz.....	72
Tableau III.4 : Coups d'exploitation des installations réseau Sonal gaz.....	73
Tableau III.5 : Coûts d'investissement système solaire.....	74

Liste des abréviations et des symboles

ISO : International standard organisation

NACE : National association of corrosion engainées

PC : Protection cathodique

PE : Protection passive

DC : Direct courant

AC : Alternation courant

PV : Panneaux photovoltaïque

Cu- Cu SO₄ : Cuivre-sulfate de cuivre

SHE : L'électrode à hydrogène standard

CSE : L'électrode en sulfate de cuivre

Wt : Perte de poids en [Kg]

K : Équivalent électrochimique t en [kg/A-an]

I : Courant électrique [Ampère]

T : Temps [an]

R_c : Résistance longitudinale de la conduite [Ω /m]

ff : Facteur final de dégradation du revêtement

fi : Facteur initial de dégradation du revêtement au début de l'exploitation de la canalisation

Δ f: Augmentation annuelle moyenne du facteur de dégradation du revêtement

t_{DV} : Durée d'exploitation [an]

N : Nombre de tronçons = 893

ρ_{sm} : Résistivité moyenne du sol [Ω .m]

ρ_i : Résistivité du sol de tronçon [Ω .m]

ρ_c : Résistivité électrique du matériau de la structure [Ω .mm²/m]

\varnothing_{ext} : Diamètre extérieur de la structure [mm]

δ : Epaisseur moyen de la conduite [mm]

I_t : Courant total de protection [A]

k : Facteur de contingence

S : Surface de la canalisation [m²]

IPC : Courant de protection cathodique [A]

S : Surface de la canalisation [m²]
k : Facteur de contingence [> 1.25]
i_{PC} : Densité de courant de protection cathodique pour une canalisation revêtue [A/m²]
PPC : Postes protection cathodique
E_{nat} : Potentiel de protection naturel [mV]
E_{p max} : Potentiel de protection maximale [mV]
E_{p min} : Potentiel de protection minimale [mV]
K : Coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins
L_p : Longueur de protection d'un poste de soutirage [m]
NPPC : Nombre de postes de protection cathodique
I_{dr} : Intensité du courant de drainage [A]
N_a : Nombre d'anodes minimal nécessaire à la protection
t : Durée de l'exploitation [ans]
m : Consommation massique de l'anode [Kg/A.ans]
M_a : Masse d'une anode [Kg]
μ : Coefficient d'utilisation de l'anode
R_{dév p} : Résistance de terre du déversoir profond [Ω]
R_t : Résistance du lit d'anode [Ω]
R_{ma} : Résistance du matériau de l'anode [Ω]
R_{pol} : Résistance de polarisation [Ω]
U_a : Composante de polarisation de la chute de tension des anodes [V]
I_{da} : Moyenne arithmétique entre I_{dr} (0) et I_{dr} [A]
ρ : Résistivité du sol en profondeur [Ω.cm]
d_{puits} : Diamètre du puits anodique [cm]
N_{Anode} : Nombre d'anodes à courant imposé
L_{Active} : Longueur active du déversoir [m]
L_{Anode} : Longueur d'une anode [m]
e : Espacement entre anodes [m]
P : Puissance du poste de soutirage [W]
U : Tension du poste de soutirage [V]

R tot : Résistance totale [Ω]

R c : Résistance du câble [Ω]

R ps : Résistance due à la protection passive [Ω]

Z : Impédance [Ω]

R dev : Résistance de terre du déversoir [Ω]

R s : Résistance du sol entre la canalisation et le déversoir [Ω]

En : Energie nécessaire au poste de soutirage [Wh/j]

P : Puissance du poste de soutirage [w]

tf : Temps de fonctionnement du poste du générateur solaire [h/j]

Ef : Energie fournir par le générateur photovoltaïque [Wh/j]

F : Pertes ; estimée de 25 à 45%

En : Energie nécessaire au poste de soutirage [Wh/j]

PCG : Puissance crête (maximale) du générateur photovoltaïque [w]

Ir : Irradiation quotidienne moyenne annuelle [kWh/m².j]

Nps : Nombre de panneau solaire

C : Capacité du parc de batteries [Ah]

En : Energie nécessaire = énergie consommée [Wh]

A : Autonomie de la batterie [Jours]

D : Limite de décharge profonde

U : Tension de fonctionnement du système [V]

Ls : Longueur du pipeline échantillonné

d : Profondeur du pipeline [m]

Vg : Gradient de tension [V/longueur unitaire]

ρ_e : Résistivité de la terre [Ω]

i : Densité de courant au point d'intérêt

*T*ABLE
DE MATIERE

*Table de
matière*

Table de matière

Dédicace.....	I
Remerciement.....	II
Liste des figures	III
Liste des tableaux	IV
Table de matière.....	V
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I : ETUDE DE LA CORROSION

Introduction	2
I.1. Généralités sur la corrosion.....	2
I.2. Réaction de la corrosion.....	3
I.3. Les effets économiques de la corrosion.....	3
I.4. Mécanisme de la corrosion.....	4
I.5. Facteurs influençant la corrosion.....	6
I.5.1. Facteurs relatifs au milieu et définissant le modes d'attaque.....	6
I.5.2. Facteurs métallurgiques.....	6
I.5.3. Facteurs définissant les conditions d'emploi.....	7
I.5.4. Facteurs dépendant du temps.....	7
I.6. Différentes formes de corrosion.....	7
I.6.1. Corrosion uniforme.....	7
I.6.2. Corrosion localisée	8
I.6.2.1. Corrosion par piqure	8
I.6.2.2. Corrosion galvanique.....	8
I.6.2.3. Corrosion inter granulaire.....	9
I.6.2.4. Corrosion et dissolution sélective	9
I.6.2.5. Corrosion par crevasse (ou caverneuse)	9
I.6.2.6. Corrosion sous contrainte	10
I.6.2.7. Corrosion érosion	10
I.7. Vitesses de corrosion	10
I.8. Les techniques de protection contre la corrosion.....	11
I.8.1. Mécanismes de prévention et de lutte contre la corrosion.....	11
I.8.1.1. Prévention par un choix judicieux des matériaux.....	11
I.8.1.2. Prévention par la forme adaptée des pièces.....	12
I.8.2. Protection par revêtements.....	14
I.8.2.1. Revêtements métalliques	14
I.8.2.2. Revêtements non métalliques	14
I.8.2.3. Choix des revêtements	15
I.8.3. Protection par inhibiteurs de corrosion	15
I.8.3.1. Propriétés des inhibiteurs	15
I.8.3.2. Les classes d'inhibiteurs	16
I.8.4. Protection électrochimique	16
I.8.4.1. Protection anodique	16
I.8.4.2. Protection cathodique	17
Conclusion.....	17

CHAPITRE II : Protection Cathodique

Introduction.....	18
II.1.principe De la protection cathodique	18
II.2. Domaine d'application	18
II.3. Critères de la protection cathodique	19
II.3.1. Facteurs affectant la validité des critères	19
II.3.1.1. Température	20
II.3.1.2. Bactérie Sulfato-réductrice	20

Table de matière

II.3.1.3. Courant alternatif	20
II.3.1.4. Type de métal	20
II.3.1.5. Métaux dissimilaires	22
II.3.1.6. Décollement de revêtement.....	22
II.4. Etude de projet	22
II.4.1. Choix de l'emplacement	23
II.4.2. Agressivité du sol	23
II.4.2.1. Généralité.....	23
II.4.2.2. Mesure de la résistivité du sol	24
II.4.3. Critère de densité du courant de protection.....	26
II.5. Protection cathodique par anode sacrificielle (ou réactive)	27
II.5.1. Généralités	27
II.5.2. Domaine d'application	28
II.5.3. Les types des anodes	29
II.5.4. L'anode de zinc	29
II.5.5. L'anode d'aluminium	29
II.5.6. L'anode de magnésium	30
II.6. Protection cathodique par courant imposé	30
II.6.1. Principe de système	30
II.6.2. Le déversoir	31
II.6.3. Les configurations possibles des déversoirs	32
II.6.3.1. Déversoir en surface	33
II.6.3.2. Déversoir en casing.....	33
II.7. backfill	35
II.8. Les câbles de connexion	35
II.9. Poste de soutirage	36
II.10. Control de la protection cathodique	38
II.10.1. Les prises de potentiel simple PPS	38
II.10.2. Les prises de mesure ampérométriques PMA	39
II.10.3. Les prises jointes isolant PJI	39
II.11. Les différents systèmes d'alimentation en énergie électrique	39
II.12. L'énergie solaire photovoltaïque	39
II.12.1. Principe de fonctionnement	39
II.12.2. Panneau photovoltaïque	40
II.12.3. Régulateur de charge	41
II.12.4. Les batteries	42
Conclusion	43

CHAPITRE II : DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME PV

Introduction	44
III.1. Description de l'Oléoduc OK1 34" Haoud el Hamra-Skikda	44
III.1.1. Stations de pompage SP3 OK1 Selga Biskra	44
III.1.2. Situation géographique	45
III.1.3. Profil en long et position de sp3 sur l'ouvrage	45
III.2. Moyens de lutte pris par l'entreprise.....	45
III.3. Solution proposée	45
III.4. Informations de base pour la conception de la protection cathodique	46
III.4.1. Informations sur le pipeline	46
III.4.2. Informations environnementales	46
III.4.2.1. Conditions du sol	46
III.4.2.2. Interférences électriques	47
III.4.3. Action préliminaire	47

Table de matière

III.5. Hypothèses de calcul	47
III.6. Procédure de dimensionnement du système de PC.....	48
III.7. Théorie et note de calcul	48
III.7.1. Les équations mathématiques utilisées pour les calculs d'atténuation	48
III.7.1.1. Résistivité du sol	48
III.7.1.2. Résistance Longitudinale de la conduite par unité de longueur R_c	49
III.7.1.4. Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la conduite R_r	50
III.7.1.5. Calcul du coefficient d'atténuation α	50
III.7.2. Détermination du nombre de postes de soutirage et du nombre d'anodes.....	50
III.7.2.1. Résistance d'entrée d'une conduite revêtue z	50
III.7.2.2. Valeurs des potentiels	51
III.7.2.3. Coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins K	52
III.7.2.4. Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage L_p	52
III.7.2.5. Calcul du nombre de postes de protection cathodique N_{PPC}	53
III.7.3. Calcul de l'intensité du courant de drainage I_{dr}	53
III.7.4. Calcul du nombre d'anodes minimal nécessaire à la protection N_a	53
III.7.5. Calcul de la résistance de terre du déversoir $R_{dév.p}$	54
III.7.5.1. Calcul de la résistance de polarisation R_{pol}	54
III.7.5.2. Calcul de la résistance du matériau de l'anode R_{ma} Elle est donnée par la relation.....	54
III.7.5.3. Calcul de la résistance du lit d'anodes R_t	54
III.7.6. Calcule la puissance de poste soutirage	55
III.7.6.1. Détermination de la tension du poste de soutirage U	55
III.7.6.2. Détermination de la puissance du poste de protection cathodique P	56
III.7.7. Dimensionnement du système photovoltaïque	57
III.7.7.1. Données d'entrée d'ensoleillement	57
III.7.7.2. Données d'entrée de la demande énergétique	57
III.7.7.3. Calcul de l'énergie nécessaire au poste de soutirage E_n	57
III.7.7.4. Calcul de l'énergie à produire par le générateur photovoltaïque E_f	58
III.7.7.5 Calcul de la taille du générateur photovoltaïque à installer	58
III.7.7.6. Dimensionnement du parc batteries	59
III.7.7.7. Choix des câbles de connexions	59
III.7.7.8. Détermination de la section des câbles (panneaux –boitier)	60
III.7.7.9. Détermination de la section des câbles boitier –régulateur	60
III.7.7.10. Détermination de la section des câbles régulateur-batterie.....	60
III.8. Dimensionnement du système de protection cathodique de OK1.....	61
III.8.1. Les Caractéristiques	61
III.8.1.1. Caractéristiques de l'oléoduc OK1.....	61
III.8.1.2. Caractéristique de l'électrolyte (résistivité du sol)	61
III.8.1.3. Généralités du système	62
III.8.2. Dimensionnement du système de protection	62
III.8.2.1. Calcul de la résistivité moyenne du sol	62
III.8.2.2. Calcul de la résistance longitudinale du tube par unité de longueur	62
III.8.2.3. Résistance transitoire moyenne, "conduite-sol"	62
III.8.2.4. Calcul de la résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la conduite à la fin et au début de l'exploitation	63
III.8.2.5. Calcul du coefficient d'atténuation	63
III.8.2.6. Calcul de la résistance d'entrée de la conduite	63
III.8.2.7. Calcul des gains de potentiel	63
III.8.2.8. Calcul du coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins	63
III.8.2.9. Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage	63
III.8.2.10. Calcul du nombre de postes de protection cathodique	64

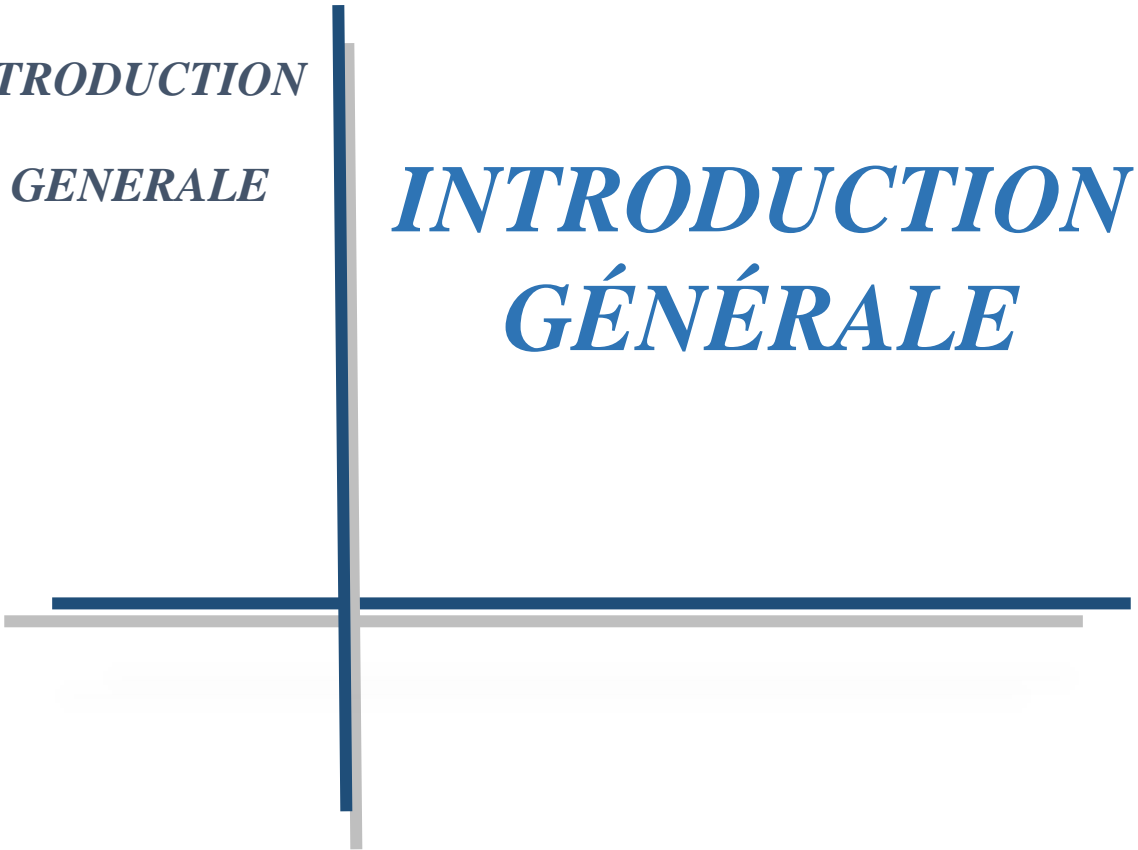
Table de matière

III.8.2.11. Calcul de l'intensité du courant nécessaire au début et à la fin de l'exploitation.....	64
III.8.2.12. Calcul du nombre d'anodes minimal pour la protection	64
III.8.2.13. Calcul de la résistance de terre du déversoir pour des anodes posées	64
III.8.2.14. Calcul de la tension aux bornes du poste de soutirage	66
III.8.2.15. Calcul de la puissance requise par le poste	66
Interprétation des résultats	66
III.8.3. Dimensionnement Du Générateur Photovoltaïque	67
III.8.3.1. Estimation de l'énergie consommée	67
III.8.3.2. Détermination de l'énergie fournir par le générateur	67
III.8.3.3. Calcul de la puissance crête du générateur	68
III.8.3.4. Détermination du nombre de modules solaires à installer.....	68
III.8.3.5. Calcul de la capacité des batteries	69
III.8.3.6. Un hacheur boost pour élever la tension de système à la tension souhaitée.....	69
III.8.3.7. Détermination de la section des câbles.....	71
III.9. Etude technico-économique.....	71
III.9.1. Problématique	71
III.9.2 Objectif de l'étude.....	71
III.9.3. Alimentation par réseau HT Sonal gaz.....	71
III.9.3.1. Equipements et installations nécessaires.....	71
III.9.3.2. Coups des installations réseau Sonal gaz.....	72
III.9.3.3. Coûts d'exploitation des installations réseau Sonal gaz.....	73
III.9.3.4. Avantages et inconvénients de cette variante.....	73
III.9.4. Alimentation par énergie solaire.....	73
III.9.4.1. Equipements et installations nécessaires.....	73
III.9.4.2. Coûts d'investissement système solaire.....	74
III.9.4.3. Avantages et inconvénients de cette variante.....	74
Interprétation	75
Conclusion.....	75
Conclusion générale.....	76
Référence bibliographie.....	77

INTRODUCTION

GENERALE

*INTRODUCTION
GÉNÉRALE*



Dans la nature, La corrosion se produit sur les terres, en particulier dans les environnements acides qui sont chauds et naturellement humides, les forêts humides et d'autres. La corrosion est l'ennemi numéro un des scientifiques et des entreprises métallurgiques car elle affaiblit les métaux de toutes sortes en un rien de temps. Lors de la surveillance de l'état d'un pipeline, la corrosion est souvent le premier problème à rechercher.

Elle est à la fois coûteuse et dangereuse. Des milliards de dollars sont dépensés chaque année pour le remplacement de structures, de machines et de composants corrodés, y compris les toitures métalliques, les tubes de condenseur, les pipelines et de nombreux autres articles.

De nos jours, la corrosion est considérée comme le véritable problème qui préoccupe les scientifiques et les propriétaires des grandes entreprises de production dans le domaine des métaux. Comment peut-on définir la corrosion ? Comment se forme-t-elle dans le temps ? Quels sont les et moyens les plus importants de s'en débarrasser de la combattre ?

Alors, nous étudierons donc le cas de l'industrie pétrolière et de station du pompage SP3 de Biskra, qui souffrent de ce phénomène et dont elle souffre sur les structures métalliques ou encore l'oléoduc principal qui transporte le pétrole vers la raffinerie de Skikda sur des centaines de kilomètres, et pour résoudre ce problème nous proposerons une solution consistant en l'utilisation de la protection cathodique par l'énergie solaire comme source d'énergie électrique.

Au final, une étude économique et comparative a été réalisée entre l'utilisation d'inhibiteurs et la solution proposée qui est la protection cathodique par courant forcé alimenté par des cellules photovoltaïques. Le travail que nous présentons est subdivisé en trois chapitres et une conclusion :

- Le premier chapitre est consacré à Différentes formes de corrosion Les techniques de protection contre la corrosion.
- Le second chapitre est la protection cathodique et ces différents méthodes sachant que : Protection cathodique par anode sacrificielle et la Protection cathodique par courant imposé.
- Le troisième chapitre traite de technique expérimentale ; technique d'alimentation en énergie électrique, L'énergie solaire photovoltaïque a pour fournir un courant continu.
- En fin conclusion générale sur l'ensemble de ce travail.

Chapitre

I

*Etude
De La Corrosion*

Introduction

La corrosion est un grand problème mondial touche tous les secteurs particulièrement dans l'industrie pétrolière, dans ce chapitre on peut présenter quelques notions principales sur la corrosion, ces types, ces formes et les facteurs qui dues de cette problème ainsi que les méthodes de protections contre la corrosion.

I.1. Généralités sur la corrosion

La corrosion traduit la réactivité de la plupart des matériaux industriels vis-à-vis des environnements au contact desquels ils sont placés au cours de leur emploi. On estime qu'elle détruit un quart de la production annuelle mondiale d'acier, ce qui représente environ 150 millions de tonnes par an ou encore 5 tonnes par secondes. Or, la corrosion ne se limite pas à l'acier, mais affecte tous les métaux ainsi que les polymères et céramiques. Elle résulte d'interactions chimiques et/ou physiques entre le matériau et son environnement. On cite quelques exemples de phénomènes de corrosion :

- Transformation de l'acier en rouille,
- Fissuration d'un laiton en présence d'ammoniaque,
- Corrosion à chaud d'un superalliage dans une turbine à gaz,
- Dégradation du PVC par le rayonnement ultraviolet,
- Attaques des briques réfractaires par les laitiers,
- Attaque d'un verre minéral par une solution alcaline

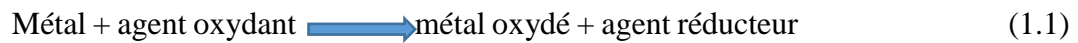
Selon le point de vue de l'ingénieur, la corrosion est une dégradation du matériau ou de ses propriétés par réaction chimique avec l'environnement. Cette définition admet que la corrosion est un phénomène nuisible : elle détruit le matériau ou réduit ses propriétés, le rendant inutilisable pour une application prévue. Parfois, la corrosion est un phénomène bienvenu, voire souhaité. Elle détruit et élimine un grand nombre d'objets abandonnés dans la nature.

Certains procédés industriels font également appel à la corrosion.

Par exemple l'anodisation de l'aluminium est une oxydation de la surface du métal pour former un film d'oxyde décoratif qui protège de la corrosion atmosphérique. [1]

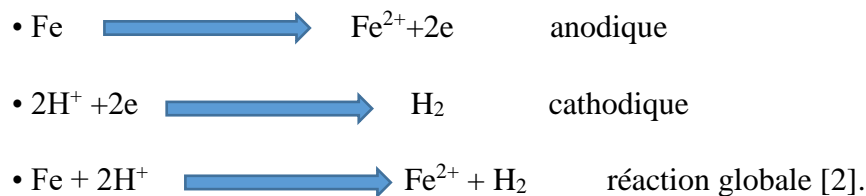
I.2. Réaction de la corrosion

La corrosion des métaux est due à une réaction d'oxydoréduction irréversible entre le métal et un agent oxydant contenu dans l'environnement. L'oxydation du métal implique la réduction de l'agent oxydant selon la réaction :



Toute réaction d'oxydoréduction se compose de deux réactions partielles : la réaction partielle d'oxydation ou réaction partielle anodique, et la réaction partielle de réduction ou réaction partielle cathodique :

Exemple :



I.3. Les effets économiques de la corrosion

La corrosion exerce une action destructrice sur les infrastructures souterraines. En se présentant sous différentes formes, cette avarie pose de nombreux problèmes techniques et économiques à l'échelle économique et environnementale. Ainsi, le diagnostic de ce processus nécessite un temps énorme et une capacité de maîtrise très élevée.

Les études réalisées sur les coûts annuels liés directement aux dommages portés par la corrosion des infrastructures dans les pays industrialisés révèlent un taux variant entre 3,1 et 4,5% du produit national brut. En référence à l'année 1998, ces coûts ont atteint un seuil total de 276 milliards de dollars pour les différentes industries aux États-Unis. Ceci équivaut à environ 3,1% du produit national brut américain. Les coûts générés par le service de transport, les infrastructures et les services publics en représentent les portions les plus élevées, soit près de \$23 milliards seulement pour le système des services d'eau.

D'autre part, l'American Society of Civil Engineers (ASCE) a publié dans son rapport annuel de 2005 que les États-Unis allaient être confrontés à un déficit de 11 milliards de dollars par année pour le remplacement des conduites du réseau d'eau détériorées par la corrosion.

Les coûts de la corrosion demeurent excessivement élevés et variables annuellement d'un pays à l'autre à cause de la différence du taux de développement de ces derniers. Aux États-Unis,

par exemple, ces coûts ont été de l'ordre de 429 billion de dollars en 2007 avant d'enregistrer une limite de 430 billions dollars américain. [3] en 2008 [4].

I.4. Mécanisme de la corrosion

Le phénomène de corrosion débute avec la création d'une pile électrochimique qui se forme lorsque deux parties d'une structure possèdent un potentiel électrique différent. La différence de potentiel résulte souvent des hétérogénéités du matériau ou du milieu environnant. La surface de l'acier est alors constituée d'une multitude de micro-piles, elles-mêmes constituées de zones dites anodiques où les électrons sont libérés et de zones cathodiques où les électrons sont consommés.

En milieu aqueux, le processus de corrosion électrochimique de l'acier peut être décrit de manière simplifiée par deux réactions électrochimiques élémentaires simultanées.

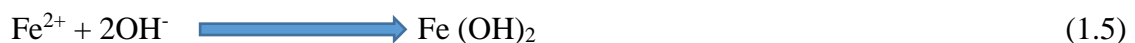
Dans la zone anodique, on a par exemple :



Les ions ferreux Fe^{2+} passent dans la solution et peuvent s'oxyder ultérieurement en ions ferriques Fe^{3+} . Dans la zone cathodique, les électrons produits sont consommés afin de maintenir l'équilibre électronique. Les réactions cathodiques correspondantes sont la réduction de l'oxygène dissout dans l'eau (2) ou la réduction du proton avec dégagement d'hydrogène (3) :



Les ions hydroxyde OH^- formés dans la solution peuvent ensuite se combiner aux ions ferreux Fe^{2+} et précipiter en hydroxyde ferreux à la surface de l'acier, lorsque les concentrations des ions ferreux et hydroxyde le permettent :



Ce composé peut ensuite s'oxyder pour former de l'oxyde ferrique Fe_2O_3 hydraté ou de la magnétite Fe_3O_4 ou évoluer en goethite ou lépidocrocite, respectivement α ou γ - FeOOH . Ces composés, en recouvrant la surface métallique, forme une couche de passivation qui peut s'avérer protectrice selon son étanchéité. En effet, la porosité de cette couche va contrôler les vitesses de corrosion.

Une cellule de corrosion n'existe que lorsqu'un potentiel électrochimique est présent. Le potentiel électrochimique peut être généré de deux façons, soit par une différence dans la nature des métaux ou par une différence de concentration de certains ions au voisinage de l'acier (cas des Cl⁻). La figure I.1 présente schématiquement le mécanisme de la corrosion des aciers en présence de chlorure.

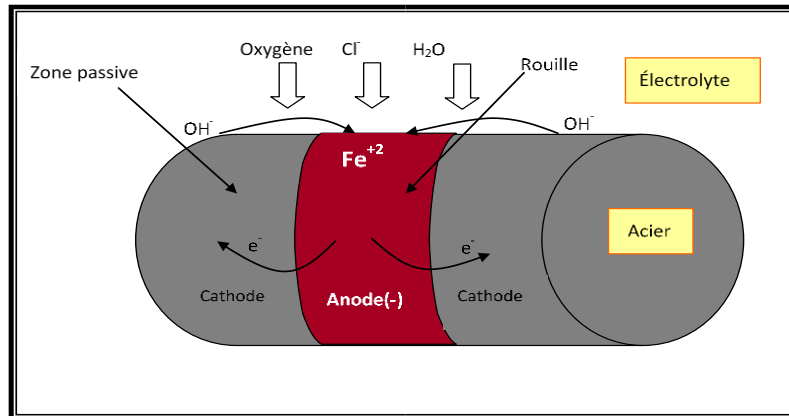


Figure. I.1: Mécanisme de corrosion des aciers ordinaires en présence de chlorure

- La réduction d'oxygène sur les aciers

L'oxygène joue un rôle important dans les mécanismes de corrosion du fer et des alliages du fer en milieu aéré.

Selon YEAGER, le facteur déterminant le mécanisme de la réduction de l'oxygène selon l'un ou l'autre des processus électrochimiques serait la vitesse de désorption des peroxydes : la réduction de l'oxygène se ferait préférentiellement selon un mécanisme à deux électrons sur un matériau permettant une vitesse de désorption élevée alors que le processus à quatre électrons prédominerait sur des surfaces où cette vitesse est faible. On compte donc des matériaux sur lesquelles la réduction complète en eau se produit avec la formation d'un intermédiaire peroxyde d'hydrogène (graphite, or, mercure...). Le mécanisme est dit en série par opposition au mécanisme parallèle qui implique une réduction à quatre et deux électrons. Le platine notamment catalyse la réduction directe de l'oxygène selon le processus à 4 électrons.

Selon DELAHAY la réduction d'O₂ sur le fer en solution phosphate à pH 6, fait apparaître un nombre apparent d'électrons variant de 2 au potentiel de -0,2 V/ENH à 4 pour des potentiels inférieurs à -0,6 V/ENH. Ces résultats indiquent une production de peroxyde d'hydrogène dont la quantité décroît lorsque le potentiel diminue.

Selon LE BOZEC, l'oxygène fait partie des éléments oxydants les plus abondants sur la planète et joue donc un rôle très important dans les mécanismes de corrosion des matériaux métalliques en eau de mer. La Figure I.2 représente, de façon très simplifiée, les différents processus anodique et cathodique se produisant à la surface d'un métal (acier) lors de la corrosion. [5]

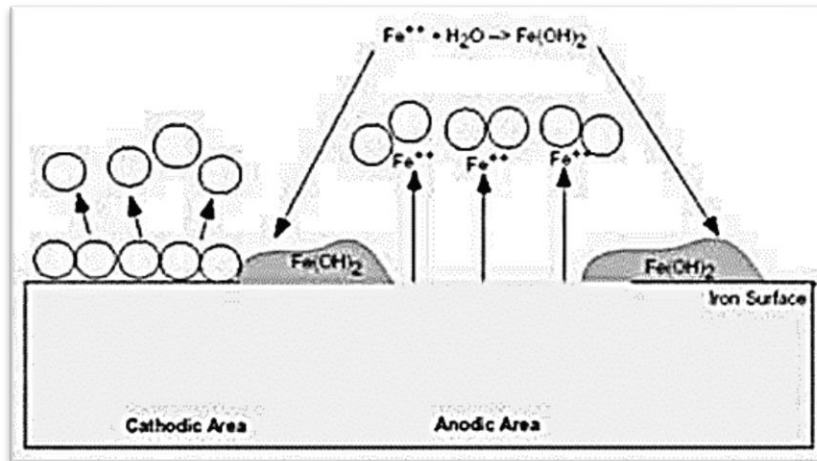


Figure. I.2: Représentation schématique d'un processus électrochimique de corrosion.

I.5. Facteurs influençant la corrosion

I.5.1. Facteurs relatifs au milieu et définissant le modes d'attaque

- Concentration du réactif
- Teneur en oxygène, en impuretés, en gaz dissous (CO_2 , NH_3 , H_2S),
- Acidité (PH) du milieu, salinité, résistivité
- Température, Pression
- Présence de bactéries

I.5.2. Facteurs métallurgiques

- Composition de l'alliage, hétérogénéités cristallines
- Procédés d'élaboration
- Impuretés dans l'alliage, inclusions
- Traitements thermiques, mécaniques

- Additions protectrices

I.5.3. Facteurs définissant les conditions d'emploi

- Etat de surface, défaut de fabrication
- Forme de pièces
- Sollicitations mécaniques
- Emploi d'inhibiteurs
- Procédés d'assemblage (couple galvaniques, soudures, ...)
- Croûtes d'oxydes superficielles
- Force électromotrice extérieure (électrolyse)

I.5.4. Facteurs dépendant du temps

- Vieillessement
- Tensions mécaniques internes ou externes
- Température- Modalité d'accès de l'oxygène ou autres gaz dissous
- Modification des revêtements protecteurs
- Apparition d'un dépôt (calcique ou autre) [3].

I.6. Différentes formes de corrosion

Généralement on classe les différentes formes de corrosion suivant :

I.6.1. Corrosion uniforme

Elle entraîne la modification de toute la surface du métal d'une manière uniforme et avec la même vitesse d'attaque. Il s'agit du type de corrosion le moins dangereux parce qu'on peut calculer avec une bonne approximation la durée de vie de la pièce dans le temps (Fig. I.1).

I.6.2. Corrosion localisée

I.6.2.1. Corrosion par piqure

Dans certaines conditions d'environnement, les métaux et alliages protégés par un film passif peuvent subir une attaque par piqûration, lorsqu'il se produit une rupture localisée du film. Ces piqures se localisent en certains points de la surface métallique, elles se développent de façon insidieuse et s'auto propagent au fond de la cavité créée. L'hydrolyse des ions métalliques dissous entraîne une augmentation du degré d'acidité, ce qui entretient le phénomène de corrosion (Fig. I.2).



Figure. I.3 : Corrosion uniforme.



Figure. I.4 : Corrosion par piqure.

I.6.2.2. Corrosion galvanique

Il s'agit de l'attaque préférentielle de la phase la moins noble d'un alliage comportant deux phases ou de la corrosion pouvant exister entre au moins deux matériaux métalliques placés dans le même environnement. Il y a formation d'une pile de corrosion (Fig. I.5).

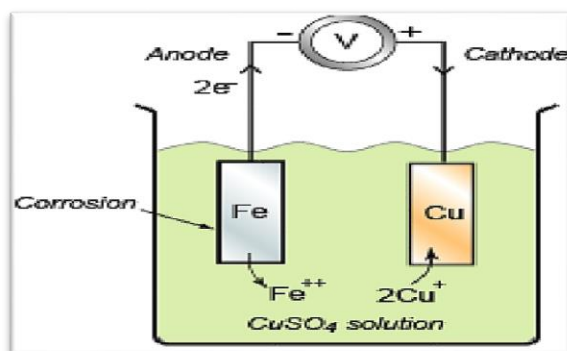


Figure. I.5 : Cellule de corrosion bimétallique.

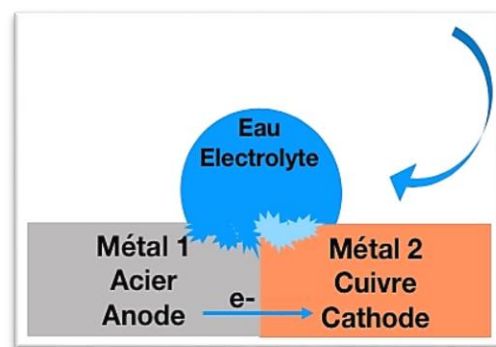


Figure. I.6 : Corrosion galvanique.

En cas de couplage, plus les métaux en présence sont éloignés sur l'échelle galvanique (Table des potentiels de réduction en Annexe I), plus la pile formée dispose d'énergie pour provoquer les transformations. Les phénomènes de corrosion sont amplifiés à la fois dans la cinétique de dégradation et dans la génération d'ions dans le milieu biologique. La partie la moins noble est l'anode et la plus noble est la cathode. Le rapport de surface anode/cathode

joue un rôle très important. Il faut retenir que, plus l'anode est de petite taille plus sa vitesse de dissolution est élevée. Pour un couple coplanaire la dissolution de l'anode s'effectue avec une plus grande vitesse à l'interface de jonction entre les deux matériaux (Fig. I.6).

I.6.2.3. Corrosion inter granulaire

Ce type de corrosion se manifeste aux joints de grains. Ce phénomène peut provoquer des fissures qui affaiblissent les caractéristiques mécaniques du métal. Certains aciers inoxydables (fer, chrome, nickel) sont très affectés par ce mode de corrosion qui réduit de façon catastrophique leur résistance mécanique. Ce type de corrosion est un phénomène microscopique (Fig. I.7).

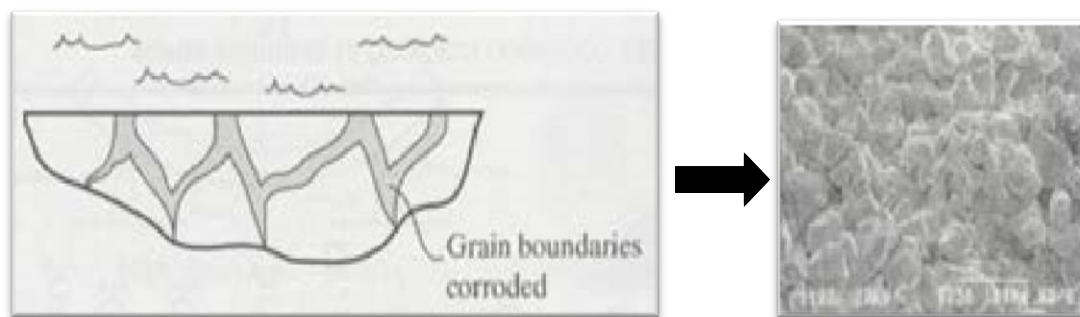


Figure. I.7: La corrosion des joints de grains près de la surface laisse les grains libres à la surface.

I.6.2.4. Corrosion et dissolution sélective

Qu'il s'agisse d'une solution solide ou d'un mélange de phase l'attaque intervient sélectivement sur l'un des constituants.

Exemple : dézincification du laiton (alliage Cu-Zn) : le laiton est anodique par rapport au cuivre, le zinc se dissout laissant une surface spongieuse (cuivre poreux) (Fig. I.6).

Remarque : Il faudra limiter la quantité de $Zn \leq 15\%$ et rajouter 1% Sn.

I.6.2.5. Corrosion par crevasse (ou caverneuse)

Appelée aussi corrosion caverneuse, elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux zones d'une structure métallique. Il y a alors une attaque des parties métalliques les moins accessibles à l'oxygène (Fig. I.8).

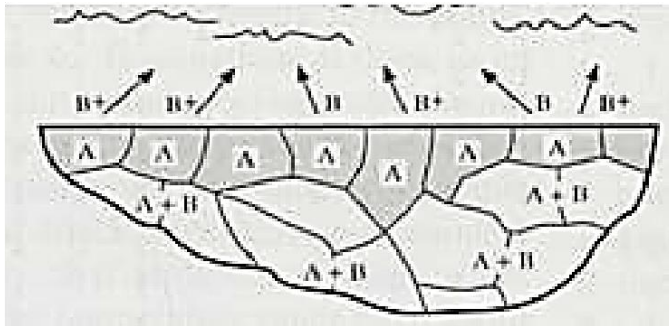


Figure. I.8 : Dézincification du laiton
(corrosion sélective).

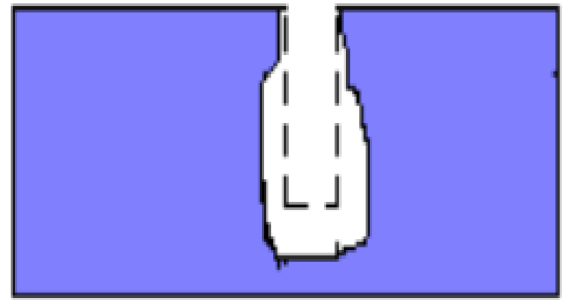


Figure. I.9 : Corrosion caverneuse.

I.6.2.6. Corrosion sous contrainte

C'est une fissuration du métal qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique (Force de traction) et d'une réaction électrochimique. La corrosion sous l'effet de la fatigue est due à l'application répétée des contraintes (Fig. I.9).

I.6.2.7. Corrosion érosion

Elle provoque un amincissement local important qui revêt souvent l'aspect d'une pique allongée, ce processus peut intervenir en l'absence de toute particule solide abrasive dans le milieu (Fig. I.10). [6]

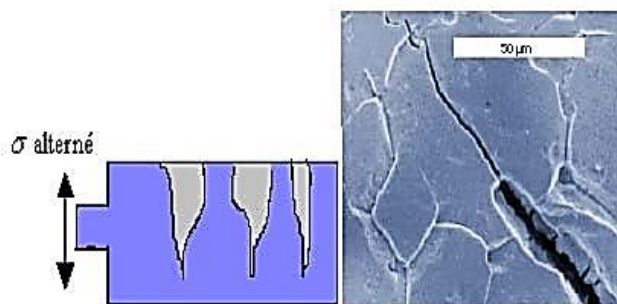


Figure. I.10 : Corrosion sous contrainte.



Figure. I.11 : Corrosion érosion.

I.7. Vitesses de corrosion

La vitesse de corrosion est égale à la quantité de métal dissous pendant l'unité de temps. Cette quantité de métal est proportionnelle à une quantité d'électricité (e^-). Dans les cas réels, les zones anodiques et cathodiques ont des aires inconnues. Les méthodes rigoureuses de détermination de la vitesse de corrosion peuvent alors être mises en défaut. La vitesse de corrosion s'exprime donc, pratiquement, en :

- Masse de métal dissout par unité de temps (par exemple en gramme par an) ;
- Perte (moyenne) d'épaisseur par unité de temps (par exemple en millimètre par an) ;
- Profondeur (moyenne ou maximale) de piquûre par unité de temps ;
- Taille de fissure par unité de temps.

La vitesse de dissolution peut être évaluée par des essais électrochimiques. Elle est inversement proportionnelle à la résistance de polarisation R_p du métal dans le liquide considéré.[7]

I.8. Les techniques de protection contre la corrosion

I.8.1. Mécanismes de prévention et de lutte contre la corrosion

La prévention de la corrosion doit être envisagée dès la phase de conception d'une installation. En effet, des mesures préventives prises au bon moment permettent d'éviter de nombreux problèmes lorsqu'il s'agit de garantir une certaine durée de vie à un objet, notamment pour des industries telles que le nucléaire, l'industrie chimique ou l'aéronautique, où les risques d'accident peuvent avoir des conséquences particulièrement graves pour les personnes et l'environnement. Les méthodes de protection et de prévention contre la corrosion sont les suivantes :

- Prévention par un choix judicieux des matériaux ;
- Prévention par une forme adaptée des pièces ;
- Protection par revêtements ;
- Protection par inhibiteurs de corrosion ;
- Protection électrochimique.

I.8.1.1. Prévention par un choix judicieux des matériaux

Le choix du matériau doit principalement tenir compte des influences défavorables du milieu et des conditions de fonctionnement. Il n'existe pas de métaux ou alliages qui ont une résistance absolue à la corrosion, mais on connaît uniquement des matériaux résistants à la corrosion dans certains milieux agressifs. Et le comportement à la corrosion n'est qu'un critère parmi tant d'autres dans le choix des matériaux. La résistance à la corrosion est une propriété du système métal-milieu et non du métal seul. Le tableau ci-dessous indique la résistance à la corrosion de quelques métaux purs dans les différents milieux.

Tableau I.1 : Résistance intrinsèque à la corrosion de quelques métaux purs dans différents Milieux.

Milieu	Fe	Cr	Ni	Cu	Al	Zn	Ti	Ta
Air humide	-	+	+	+	+	m	+	+
Eau froide naturelle aérée	m	+	+	+	-	+	+	+
Eau de mer	-	+	+	m	m	-	+	+
Acide non oxydant	-	m	m	+	-	-	+	+
Acide oxydant	-	+	m	-	-	-	+	+
Acide + Cl ⁻	-	+	m	-	-	-	m	+
Base + O ₂	+	+	+	+	-	-	+	m
Oxydation à haute température	m	+	+	-	-	-	m	-
+ : Bonne résistance, m : Résistance moyenne, - : Mauvaise résistance								

I.8.1.2. Prévention par la forme adaptée des pièces

Il est possible de diminuer les risques de corrosion en donnant aux objets une forme adaptée aux conditions d'utilisation, et ainsi d'influencer notablement leur durée de vie.

I.8.1.2.1. Dans les zones humides

La corrosion atmosphérique, forme de corrosion la plus fréquente, ne se produit qu'en présence d'humidité. La géométrie des composants employés devra donc viser dans ce cas à éviter les zones de rétention d'eau soit en prévoyant un bon drainage, soit en assurant, par leur géométrie, la vidange complète des récipients.

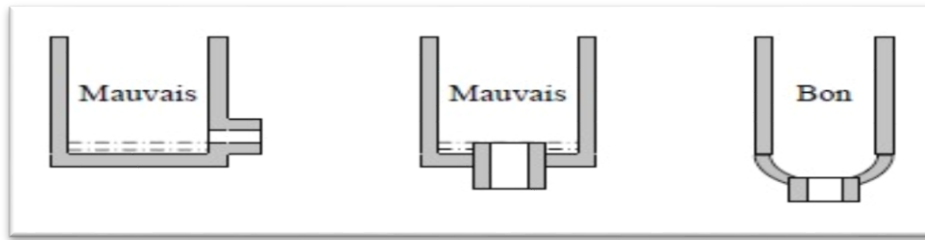


Figure. I.12: Prévention par la forme du récipient.

I.8.1.2.2. Contact entre matériaux différents

Un contact électrolytique entre différents métaux permet la formation de piles galvaniques, causant une corrosion accélérée du métal moins noble. Par un choix adapté des matériaux, en séparant différents métaux par un isolant, on évite ce type de corrosion. Dans les installations de taille importante, il n'est pas toujours possible d'isoler électriquement différents métaux. L'emploi de pièces sacrificielles, peu coûteuses et facilement remplaçables, permet de résoudre le problème dans certains cas. Par exemple, le cas de la Fig. I.13, représente une pièce sacrificielle en acier, placée entre une conduite en laiton et un échangeur de chaleur en acier.



Figure. I.13: Protection contre la corrosion galvanique : (a) isolation électrique, (b) : pièce Sacrificielle.

I.8.1.2.3. Sous contraintes

La distribution des contraintes dans une pièce influence sa sensibilité à la corrosion sous contrainte. Une forme arrondie au voisinage de la tête d'un boulon par exemple, évite la concentration des contraintes. L'exemple que voici met en relief la diminution du risque de corrosion sous contrainte d'une tête de vis.

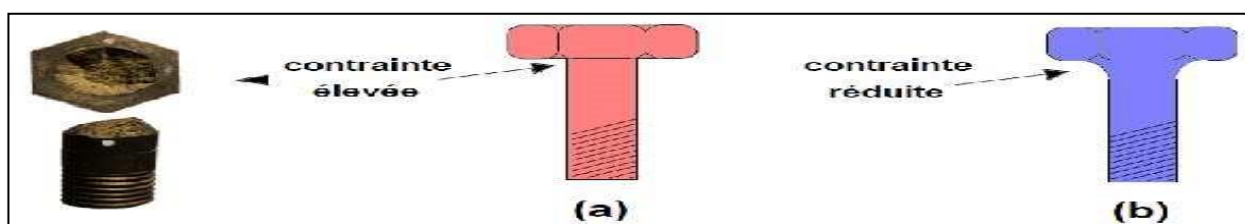


Figure. I.14: Réduction des contraintes locales dans une tête de vis.

I.8.1.2.4. Écoulement des fluides

Une conception judicieuse des canaux pour l'écoulement des fluides réduit le risque de corrosion par érosion et de corrosion par cavitation. On évitera en particulier les variations brutales de section créant des zones de turbulence ou les changements brusques de direction (Fig. I.15). [8]

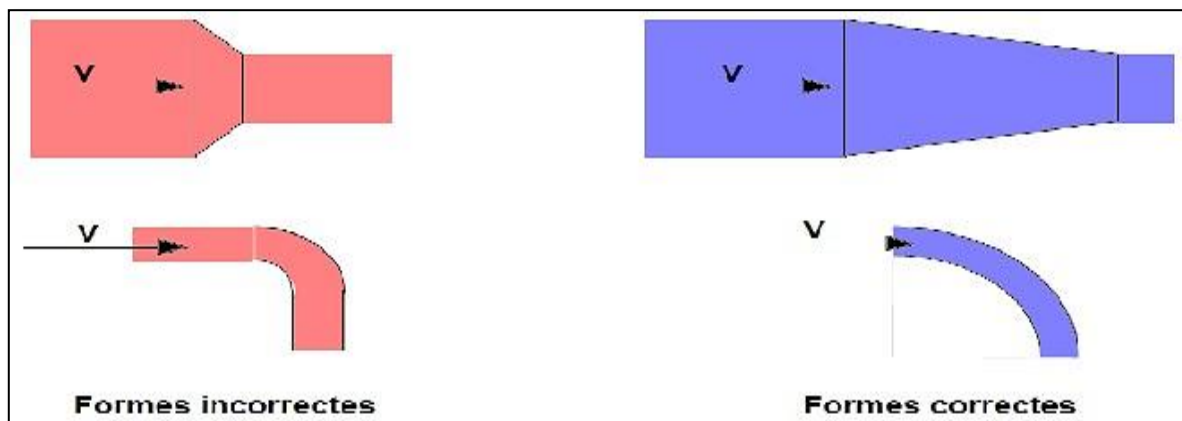


Figure. I.15: Diminution des risques de corrosion – érosion et de corrosion – cavitation.

I.8.2. Protection par revêtements

La technique la plus évidente pour protéger un métal contre la corrosion est de le recouvrir d'un revêtement protecteur. On distingue dans cette catégorie deux techniques : les revêtements métalliques et les revêtements non-métalliques.

I.8.2.1. Revêtements métalliques

Les revêtements métalliques sont couramment employés pour protéger l'acier contre la corrosion atmosphérique. Selon leur comportement à la corrosion par rapport au substrat on distingue deux types de revêtements métalliques :

- ceux plus nobles que le substrat cathodique,
- ceux moins nobles que le substrat anodique

I.8.2.2. Revêtements non métalliques

Ils forment une barrière plus ou moins imperméable entre le substrat métallique et le milieu, et on les classe en trois familles :

- Revêtements en bitumes (utilisés souvent pour les structures enterrées).

- Revêtements polymériques (thermoplastes, caoutchoucs, thermodurcissables).
- Peintures et vernis (en plus de protéger ils assurent une fonction décorative).

I.8.2.3. Choix des revêtements

Il convient de choisir des revêtements compatibles avec leur situation :

- une adhérence parfaite et pérenne sur la structure,
- un pH du milieu rendu alcalin. Dans les règles de sécurité en France, pour les canalisations de produits pétroliers liquides (arrêté du 21 avril 1989), de gaz combustible (arrêtés du 11 mai 1970 et du 13 juillet 2000) ou d'autres fluides du type produits chimiques (arrêté du 6 décembre 1982), la protection cathodique est réalisée systématiquement en supplément d'un revêtement organique. Par ailleurs, les canalisations d'eau potable, d'irrigation ou d'alimentation d'enneigement artificiel sont de plus en plus protégées avec cette technique. [2]

I.8.3. Protection par inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion constituent un moyen de lutte original contre la corrosion des métaux. L'originalité vient du fait que le traitement anticorrosion ne se fait pas sur le métal lui-même mais par l'intermédiaire du milieu corrosif. Selon la norme ISO 8044, un inhibiteur est une "substance chimique ajoutée au système de corrosion à une concentration choisie pour son efficacité ; celle-ci entraîne une diminution de la vitesse de corrosion du métal sans modifier de manière significative la concentration d'aucun agent corrosif contenu dans le milieu agressif".

I.8.3.1. Propriétés des inhibiteurs

D'une manière générale un inhibiteur doit :

- abaisser la vitesse de corrosion d'un métal, sans en affecter les caractéristiques physico-chimiques, en particulier la résistance mécanique (par exemple, risque de fragilisation par l'hydrogène en milieu acide) ;
- être stable en présence des autres constituants du milieu, en particulier vis-à-vis des oxydants ;
- être stable aux températures d'utilisation ;
- être efficace à faible concentration ;
- être compatible avec les normes de non-toxicité ;
- Être peu onéreux.

I.8.3.2. Les classes d'inhibiteurs

Il existe plusieurs façons de classer les inhibiteurs de corrosion. Généralement, ils sont classés en fonction de leur domaine d'application, de la formulation des produits, de la réaction électrochimique inhibée, ou du mécanisme réactionnel mis en jeu.

Dans la classification relative au domaine d'application, on peut distinguer les inhibiteurs de corrosion utilisés en milieux aqueux, organiques ou gazeux. Ceux utilisés en milieux aqueux sont choisis en fonction du pH du milieu : en milieu acide, ils sont utilisés afin d'éviter l'attaque chimique de l'acier lors d'une opération de décapage ou de détartrage et en milieu neutre/alcalin, ils sont souvent utilisés pour protéger les conduites des circuits de refroidissement. Les inhibiteurs utilisés en milieu organique sont incorporés dans les lubrifiants pour moteurs, dans l'essence ou dans les peintures. Les inhibiteurs en phase gazeuse sont employés pour protéger les objets métalliques pendant leur transport et stockage. Pour cela, des composés organiques ayant une pression de vapeur élevée sont souvent utilisés. [8]

I.8.4. Protection électrochimique

Parmi les moyens employés pour lutter contre la corrosion, la protection électrochimique doit son originalité au fait qu'elle consiste à agir de manière contrôlée sur les réactions d'oxydation et de réduction qui se produisent lors du phénomène de corrosion. En effet, cette méthode consiste à imposer au métal à protéger une valeur de potentiel pour laquelle la vitesse d'attaque devient très faible, voire nulle. On distingue la protection cathodique qui consiste à abaisser le potentiel d'électrode du métal, et dont le principe est connu depuis longtemps puisque les premières observations de ce phénomène sont dues à Sir H. Davy qui remarqua en 1824 que lorsque deux métaux différents (Cu et Zn) plongés dans un milieu corrosif sont reliés électriquement, la vitesse de corrosion de l'un augmente alors que celle de l'autre diminue.

I.8.4.1. Protection anodique

Elle repose sur la propriété qu'ont certains matériaux à se passiver dans des milieux corrosifs lorsque leur potentiel est maintenu à une valeur correcte. Nous rappellerons rapidement les conditions devant être remplies pour qu'un métal puisse être passif.

La technique de protection anodique peut être envisagée dans des milieux tels que les acides oxygénés (nitrique, sulfurique, ou phosphorique), les nitrates alcalins, pour des métaux tels que l'acier ordinaire ou inoxydable, le titane, le zirconium, l'hafnium, ou le niobium. Les alliages à

base de cuivre ne sont pas passivés. Parmi les exemples industriels d'utilisation, on peut citer la protection d'une cuve de camion-citerne en acier inoxydable destinée au transport d'acide sulfurique. Avant d'employer cette méthode, il est nécessaire d'avoir recours à des essais préliminaires permettant de déterminer la densité de courant correspondant à l'établissement de la passivité ainsi que le domaine de potentiel pour lequel le matériau reste passif, c'est à dire l'étendue du palier de passivité.

I.8.4.2. Protection cathodique

Ainsi que nous venons de le voir, elle consiste à abaisser le potentiel du métal à protéger à une valeur inférieure à E_p , potentiel de protection en dessous duquel la réaction d'oxydation du métal devient négligeable. Cet abaissement du potentiel est obtenu par passage d'un courant entre la surface à protéger (cathode) et une électrode auxiliaire (anode) [9]

Conclusion

On a vu dans ce chapitre la corrosion en générale (définition, relation chimique, lieux, conséquence et tous les moyens utilisés pour la lutte contre elle).

On va voir dans le prochain chapitre la protection cathodique en détaille comme une solution pour la lutte contre la corrosion.

Chapitre

II

Protection Cathodique

Introduction

La protection cathodique est une technique pour contrôler la corrosion d'une surface métallique en transformant cette surface en la cathode d'une cellule électrochimique.

Elle est utilisée pour protéger les structures métalliques de la corrosion, notamment l'acier, les gazoducs, les oléoducs, les canalisations d'eau, les réservoirs, les piliers métalliques des jetées, les navires et les plateformes pétrolières.

II.1. principe De la protection cathodique

La protection cathodique est une technique de protection anticorrosion pour tous les ouvrages métalliques enterrés, immergés ou bétonnés. Cette méthode de protection anticorrosion est largement répandue dans le monde. Elle est connue pour être fiable et peu coûteuse par rapport aux risques encourus.

Le principe de la protection cathodique est d'envoyer un courant électrique continu dans l'ouvrage susceptible de se corroder, qu'il soit enterré ou immergé. L'entrée du courant dans l'ouvrage à protéger permet d'abaisser son potentiel électrochimique en dessous d'une valeur donnée. Deux techniques de protection cathodique sont utilisées pour fournir le courant nécessaire pour contrer les phénomènes de corrosion. [10]

II.2. Domaine d'application

Depuis trente ans, la protection cathodique a reçu de nombreuses applications. Les conduites enterrées en acier pour le transport et la distribution de gaz, de produits pétroliers ou d'eau, sont pour la plupart protégées cathodiquement.

Parmi applications on trouve :

- Les conduites immergées
- Les coques de navires
- La protection interne des réservoirs d'eau, de ballasts de navires, de boîtes à eau d'échangeurs thermiques
- Les circuits de refroidissement des centrales thermiques en bord de mer (pompes, filtres, conduites)
- Les portes d'écluses
- Les plates-formes pétrolières
- Les réservoirs de stockage enterrés

- Les turbines marémotrices
- Les circuits de traitement des eaux potables et des eaux usées
- Les gaines de puits de pétrole, d'eau ou de gaz (casing).

Il est important de signaler que le coût le plus faible et l'efficacité la meilleure seront obtenus si les moyens de lutte contre la corrosion sont pris en compte dès l'élaboration de l'avant-projet d'un ouvrage.

Un choix précoce des solutions à mettre en œuvre (nature des métaux, des revêtements, équipement de protection cathodique) S'avère toujours plus économique qu'une modification tardive du projet ou qu'une intervention ultérieure, lorsque les désordres dû à la corrosion sont constatés.

II.3. Critères de la protection cathodique

Les critères de la protection cathodique pour une structure d'acier enterrée dans le sol ou submergée sont déterminés par le standard de la « NACE » et définis en particulier par la norme « *SP0169* » [11]. Cette norme énonce ce qui suit :

- Le seuil de potentiel de protection cathodique relevé sur la structure d'acier par l'intermédiaire d'une électrode de référence en cuivre-sulfate de cuivre doit atteindre la valeur de -850 mV. Cette valeur est le critère le plus souvent utilisé pour accepter le niveau de protection cathodique.
- La valeur du seuil de potentiel de -850 mV représente le potentiel de polarisation de la structure qui peut être réduit par la chute Ohmique créée entre l'électrode de mesure et la structure mesurée. Pour cela, l'électrode doit être toute proche de la structure pour réduire la chute Ohmique durant le relevé de potentiel.
- Une différence de polarisation (niveau de polarisation) de 100 mV peut être également utilisée comme un critère de protection pour une structure métallique soumise à une protection cathodique. Ce critère s'applique souvent sur une structure nue ou avec un revêtement endommagé où il est impossible d'atteindre le seuil de -850 mV.

II.3.1. Facteurs affectant la validité des critères

Les critères de la protection cathodique peuvent être affectés par de nombreux paramètres environnementaux et structuraux tels que la température, la bactérie, l'influence du courant alternatif (AC) et la qualité du métal de la structure. [12]

II.3.1.1. Température

Pour un acier enterré dans un sol sous une température ambiante allant de 20 à 25 °C, les critères de protection de -850 mV (Cu/CuSO₄) et une polarisation de 100 mV restent valables. Cependant, à une température de 60°C, ces critères ne sont plus jugés satisfaisants et auquel cas le seuil de protection doit être ajusté à -950 mV (Cu/CuSO₄) et le niveau de polarisation de 150 à 250 mV au lieu de 100 Mv. [12]

II.3.1.2. Bactérie Sulfato-réductrice

En présence de la bactérie Sulfato-réductrice à la température ambiante, le critère du potentiel de protection recommandé pour une structure d'acier enterrée passe à -950 mV (Cu/CuSO₄) au lieu de -850 mV et le shift de polarisation doit atteindre le seuil de 200 mV. Cependant, lorsque la température atteint les 60° C en présence de bactéries, le shift de polarisation doit être ajusté encore une fois de 200 à 300 mV.[12]

II.3.1.3. Courant alternatif

Les investigations réalisées pour l'évaluation du niveau d'interférence des sources de courant alternatif indésirables ont révélé que l'effet d'interférence est proportionnel à la densité du courant présent à l'interface du métal/ électrolyte. Éventuellement, une densité de courant (i) de 20 A/m² n'affecte pas les critères de protection alors que pour une densité supérieure de 100A/m², le dommage de corrosion est considérable .[13]

II.3.1.4. Type de métal

Chaque métal est défini par son propre potentiel de corrosion. Ainsi, les seuils de protection sont ajustés convenablement à chaque type de métal. Comme montré dans les tableaux ci-dessous (1) et (2), des ajustements ont été portés sur le seuil de potentiel de protection de certains métaux dans le standard British standard «BS 7361 » et German standard « DIN 30676». [13]

Tableau II.1 : Critères du seuil de potentiel de protection selon la norme EBS 736

Matériel	potentiel, CSE, sol et eau douce	Potentiel, SSC Eau de mer
Fer et acier en environnement aérobie	-850 mV	-800 mV
Fer et acier en environnement anaérobie	-950 mV	-900 mV
Fil	-600 mV	-550 mV
Aluminium	entre -950 mV et -1200 mV	Entre -900 mv et -1150 mV
Alliages de cuivre	entre -500 mv et -650 mV	entre -450 mV et -600 mV

Tableau II.2 : Critères du seuil de potentiel de protection selon la norme DIN30676

Matériel	Température(c) ou électrolyte	Potentiel (V _{CSE})
fer Non alliée & faiblement alliée	Inférieure à 40 °C	-850 mV
Même	Supérieure à 60 °C	-950 mV
Même	Anaérobie médias	-900 mV
Même	Sol sablée, $\rho \geq 500 \Omega \cdot m$	-750 mV
Aciers inoxydables, $cr \geq 16$	Sol et eau douce ≤ 40 °C	-100 mV
Même	Sol et eau douce ≥ 40 °C	-300 mV
Même	Eau salé	-300 mV
Cuivre, alliage de cuivre- nickel		-200 mV
Fil		-650 mV
Aluminium	Eau douce	-800 mV
Même	Eau salé	-900 mV
Acier en contact avec béton		-750 mV
Acier galvanisé		-1200 mV

II.3.1.5. Métaux dissimilaires

Lorsque deux structures métalliques dissemblables sont connectées entre elles par un moyen approprié, l'effet de la corrosion galvanique développe un potentiel mixte différent du potentiel individuel de chacun d'elles. Pour cette raison, les critères de protection appliqués précédemment pour l'acier ou la fonte doivent aussi être ajustés.

II.3.1.6. Décollement de revêtement

Lorsque le potentiel de la protection cathodique atteint le niveau de $-1,12\text{ V}$ (Cu/CuSO₄) à l'instant «OFF», l'évolution de l'hydrogène gazeux commence à se produire[14]. Le gaz généré est généralement pris en otage à l'interface métal/revêtement ce qui provoque le décollement du revêtement (décollement cathodique), ce phénomène dit aussi « fragilisation à l'hydrogène ». Il en résulte que ce phénomène va empêcher le courant de protection d'atteindre la zone de la structure affectée. De même, l'électrolyte entourant la structure métallique peut venir combler le vide créé à l'interface métal/revêtement/métal et ce qui permet d'activer les cellules de corrosion. En conséquence, les critères de protection à ces endroits du décollement deviennent difficiles à obtenir.

II.4. Etude de projet

La protection cathodique des canalisations neuves doit être étudiée dès le projet de l'ouvrage et aménagée à temps afin qu'elle puisse être appliquée dès l'achèvement de la pose.

L'étude d'un système de protection cathodique de la canalisation doit s'appuyer sur les documents et les données ci –après :

- Plan d'ensemble faisant ressortir le tracé ainsi que l'emplacement de la robinetterie, des postes de sectionnement et de détentes, des gaines, des traversées sous-fluviales, des passages de ponts, des joints isolants et des joints de dilatation.
- Fluide à transporter avec indication des paramètres d'exploitations (pression et température), type de joints utilisés.
- Nature du métal, longueur, diamètre, surface, épaisseur et année de pose pour les conduites existantes.
- Type du revêtement, mode d'application (en usine et sur chantier) nature des sols traversés et matériau de remblayage.
- Approches, parcours parallèles ou croissants avec des lignes hautes tension, des voies à courant alternatif ou à courant continu, emplacement des sous-stations et des points de retour des voies à courant continu.

- Tracés des conduites et des câbles de tiers à proximité de la conduite et de l'installation de protection avec indication du matériel et du revêtement utilisé.
- Résistivité du sol à l'endroit pour l'installation de protection.

II.4.1. Choix de l'emplacement

L'emplacement d'une installation de protection cathodique doit être choisi en fonction de critères suivants :

- Possibilité d'alimentation en énergie électrique.
- Sol à résistivité aussi faible que possible au lieu d'implantation des anodes ou des postes de soutirages.
- Gene minimal pour les ouvrages de tiers.
- Bonne accessibilité.
- Distance suffisante des anodes par rapport aux installations enterrées appartenant à des tiers en vue de réduire les interactions.

II.4.2. Agressivité du sol

II.4.2.1. Généralité

L'agressivité du sol est considérée comme la principale caractéristique qui contribue directement au processus de corrosion des structures enfouies.[15]

Un sol résistif a un faible apport sur le processus de corrosion tandis qu'un sol de faible résistivité permet l'activation et la propagation rapide de la corrosion et, par conséquent, une apparition importante du nombre de bris sur les conduites du réseau[16]. La conduite en fonte ductile présente généralement une bonne résistance à la corrosion externe.

Pendant, en présence des sols agressifs, les risques d'activité de corrosion sont élevés, (À cet effet, la connaissance de la résistivité du sol entourant les conduites sert à estimer la corrosivité du sol, à déterminer les zones exposées à la corrosion et aussi à établir des plans d'intervention et de prévention en fonction des priorités.

Elle est en fonction de plusieurs paramètres tel que :

- La résistivité du sol
- Le PH
- Les sulfures
- Le potentiel d'oxydoréduction (redox)

Chapitre II

- Le taux d'humidité

Une batterie de test est réalisée pour évaluer le TAS (taux d'agressivité du sol). Des points sont attribués aux différentes mesures et le taux d'agressivité est déterminé en fonction du total de points obtenue. Le tableau suivant montre un exemple d'évaluation de TAS d'un tracé de 15 km :

Tableau II.3 : évaluation de taux d'agressivité du sol.

(Tirée de : formation de protection cathodique, COSIDER-SONATRACH 2014).

PK	profondeur		résistivité		pH		Taux d'humidité		sulfure		total	nappe	Taux d'agressivité
	(m)	pts	(Ohm x cm)	pts	pts	%	pts	oui-non	pts	pts			
25 000	1	1	2 553	2	6.9	0	22%	2	non	0	5	non	moyenne corrosif
26 802	1	1	5 340	0	6.6	0	17%	0	non	0	1	non	peu corrosif
28 570	1	0	10 230	0	6.6	0	6%	0	non	0	0	non	peu corrosif
32 314	1	0	9 700	0	7.1	0	13%	0	non	0	0	non	peu corrosif
33 239	1	0	35 900	0	3.8	4	7%	0	non	0	4	non	moyenne corrosif
34 860	1	1	2 870	2	6.2	0	22%	2	non	0	5	non	moyenne corrosif
37 039	1	2	3 060	2	7.3	0	9%	0	non	0	4	non	moyenne corrosif
39 281	1	0	23 870	0	4.7	3	3%	0	non	0	3	non	peu corrosif
41 218	1	0	28 800	0	6.9	0	14%	0	non	0	0	non	peu corrosif

II.4.2.2. Mesure de la résistivité du sol

La résistivité du sol est considérée comme le premier indicateur déterminant l'échelle d'activité de corrosion. [17]

Tableau II.4: Corrosivité du sol selon la résistivité.

Plage de résistivité du sol ($\Omega.m$)	Catégorie du sol
0-15	Très corrosif
15-30	Corrosif
30-50	Moyennement corrosif
50-100	Faiblement corrosif
>100	Peu corrosif

La méthode la plus utilisée pour déterminer la résistivité des sols est la méthode des quatre électrodes de *Wenner* [18]. 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.

Cette méthode est faite en plaçant quatre bornes aux distances égales de l'un l'autre. Un courant est alors envoyé par les deux broches externes. En mesurant la tension à travers les deux broches intérieures, la résistance de sol peut être calculée en utilisant la loi de l'ohm ($V=IR$). La résistivité de sol peut être déterminée en utilisant l'équation :

$$\rho = 2 \pi R a \quad (\Omega.cm)$$

Tell que :

ρ = résistivité moyenne du sol (Ωcm) ;

R = résistance moyenne du sol (Ω) ;

a = espacement entre deux piquets (cm).

Elle peut être calculée aussi par la formule suivante :

$$\rho = 191.5 R a \quad (\Omega.cm)$$

a = espacement entre deux piquets (pied). [18]

Remarque

Il faut noter que la distance entre les piquets (a) dépend de la profondeur de mesure désire,

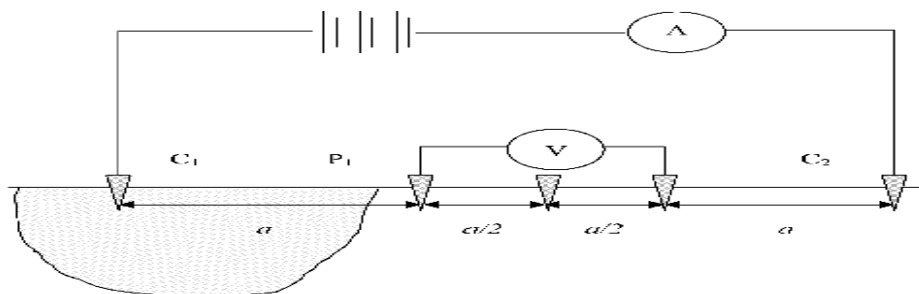


Figure. II.1 : Principe de fonctionnement de la méthode de Wenner. [19]

Il est à noter que les relevés de résistivité du sol doivent être réalisés sous une profondeur constante. Il s'agit donc de l'exploration horizontale d'une surface de terrain d'épaisseur uniforme.

D'autre part, Les utilitaires enterrés peuvent produire l'interférence en utilisant la méthode de Wenner dans des zones encombrées. Par conséquent, il est important de placer les piquets perpendiculaires à la canalisation souterraine. Le placement des piquets parallèles à la canalisation aurait comme conséquence une résistivité mesurée plus basse que la réelle. [19]

II.4.3. Critère de densité du courant de protection

Une partie critique de calculs de conception pour les systèmes de protection cathodiques est la quantité de densité de courant (courant de protection) requis pour changer le potentiel de la structure en -0.85 V pour l'électrode Cu/CuSO₄. La densité de courant exigée pour la protection complète dépend du métal qui est protégé et sur l'environnement.

Ce courant peut être estimé à partir des diagrammes d'Evans. Cependant, puisque ces mesures sont basées sur des valeurs et des expériences théoriques de laboratoire, une fois appliquées aux canalisations elles pourraient avoir comme conséquence des erreurs significatives. Pour estimer le courant nécessaire pour protéger la canalisation en service, on devrait exécuter un champ essai. L'essai sur le terrain est exécuté en appliquant un courant d'essai à la structure, le changement résultant du potentiel structure /sol est mesurée. A partir de ces données, la densité de courant de protection peut être estimée.

Pour une nouvelle installation de canalisation, les conditions de densité de courant sont habituellement estimées à partir de la précédente estime. [14]

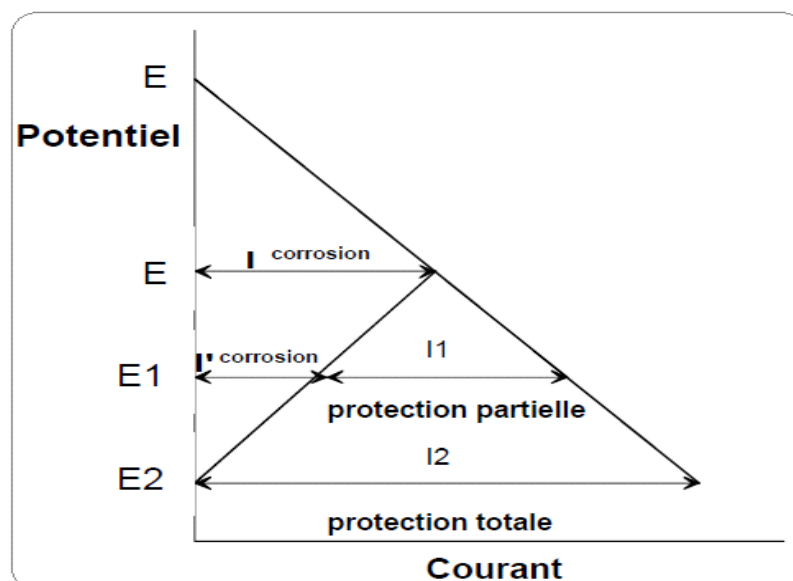


Figure. II.2 : Densité de courant et potentiel de la protection cathodique.

(‘BADORIS - Document de synthèse relatif à une barrière technique de sécurité (BTS)

Protection cathodique Version 1.1 – janvier 2008’, 2008)

Le tableau suivant donne les valeurs de densité de courant cathodique couramment utilisées dans différents environnements, pour l'acier au carbone non revêtu :

Tableau II.5 : densité de courant de protection

Milieu	(mA/m ²)	Milieu	(mA/m ²)
• Sol et eau douce	5 à 50	• Golfe persique	65 à 130
• Mer méditerranée	60 à 80	• Golfe du Mexique	50 à 80
• Mer du nord (méridional)	100 à 120	• Passe de Cook (Alaska)	200 à 500
• Mer du nord (septentrionale)	130 à 180	• Fonds marins	20 à 30
• Golfe de Guinée	60 à 100		

Remarque

Quand la structure est revêtue, un coefficient de mise à nu de l'acier par dégradation doit être pris en compte. Pour le revêtement de pipelines, il est généralement compris entre 2 et 10%, en fonction de la qualité présumée du revêtement.

Il est évident que la notion de la densité de courant de protection est un paramètre essentiel pour le dimensionnement d'un système de la protection cathodique, c'est-à-dire soit pour identifier le nombre d'anode à mise en place si l'installation est par anodes sacrificielles ou les caractéristiques des postes de soutirage s'il s'agit d'une installation par courant imposé.

II.5. Protection cathodique par anode sacrificielle (ou réactive)**II.5.1. Généralités**

L'utilisation des anodes galvaniques pour la protection cathodique (CP) est une application simple d'une cellule de corrosion de deux métaux dissimilés telle que le métal à protéger est relié électriquement avec un autre métal plus électronégatif, moins noble qui constitue l'anode de la pile électrochimique.

La dissolution du deuxième métal, c.-à-d. l'anode sacrificielle, fournit la source des électrons pour la polarisation cathodique de la structure on la mettre en dessous du seuil de protection. Ainsi, les anodes pour une protection à courant imposé peut-être plus noble ou moins noble que la structure à protéger parce que la source d'énergie la force à agir en tant qu'anode, les anodes sacrificielles doivent être spontanément anodique à la structure, c.-à-d., être plus négatif dans la série galvanique pour l'environnement donnée. [14]

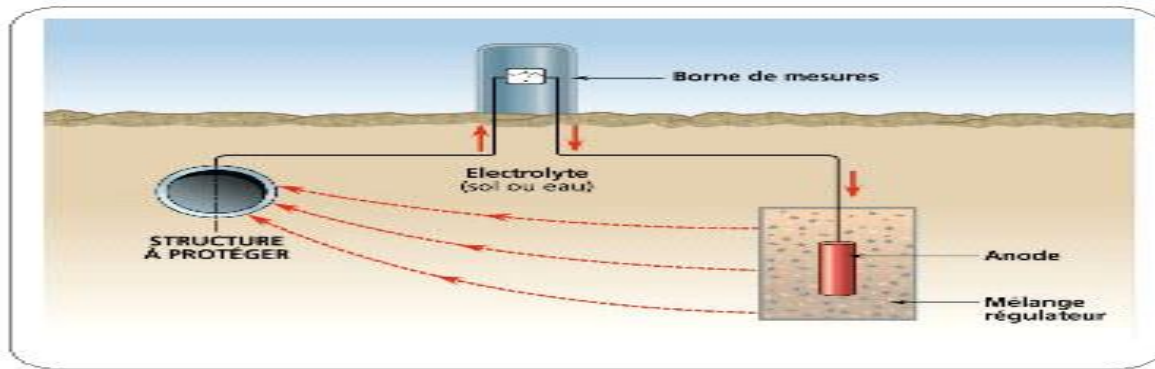


Figure. II.3: schéma d'une installation de protection par anode soluble

La durée de vie de l'installation et le courant de protection délivré par lui dépend essentiellement de nombre d'anodes mise en jeux.

Pour qu'une installation de protection soit réalisée correctement il faut que :

- La pile débite (le courant circule).
- La structure et l'anode baignent dans le même milieu électrolytique.
- L'installation soit adaptée à la structure à protéger (nombre d'anodes, leur dimension et leurs lieux d'implantation)
- L'utilisation d'un mélange régulateur ou backfill. [14]

II.5.2. Domaine d'application

Cette méthode de protection est généralement utilisée pour la protection des structures emmargées ou en contact avec l'eau telle que les navires, les différents types de plates-formes pétrolières (MODU, PP, FPSO), comme elle peut être attribuée aussi pour la protection des ouvrages métallique enterrés à courte distance (oléoducs et gazoducs) et la protection provisoire des canalisations au cours la phase de construction lorsque la protection permanente n'est pas encore établie.

Elle peut aussi être installée pour jouer un rôle de mise à la terre électrique d'un ouvrage, tout en assurant la protection cathodique de l'ouvrage, et en évitant, de ce fait, les couples galvaniques acier/cuivre qui peuvent se développer lors de l'utilisation de terres en cuivre dans des terrains très conducteurs.

Il faut noter que cette méthode est limitée pour certaines valeurs de température pour éviter l'inversion de polarité et aussi pour certaine valeur de PH pour éviter la passivation du matériau de l'anode. [14]

II.5.3. Les types des anodes

Sur la base d'échelle galvanique qui classe les métaux en fonction de leurs potentiels, on peut déduire que les métaux les plus utilisés comme anode pour protéger l'acier sont :

- Le zinc (Zn) : -0.8 (Cu/Cu-SO₄, dans le sol).
- L'aluminium (Al) : -0.5 (Cu/Cu-SO₄, dans le sol).
- Le magnésium (Mg) : -1.3 (Cu/Cu-SO₄, dans le sol). [22]

II.5.4. L'anode de zinc

Le zinc utilisé dans la fabrication des anodes est un zinc de haute pureté (Zn = 99,99 %) additionné en faible quantité d'éléments comme l'aluminium et le cadmium, et dont le pourcentage de fer ne dépasse pas 0,0014 % afin d'éviter la passivation du matériau de base. Ces présentent une très grande fiabilité de fonctionnement, et ont de ce fait une très grande durée de vie, avec consommation presque totale du matériau.

Leur domaine d'utilisation est très varié car elles peuvent être employées aussi bien en terrains acides qu'alcalins, en eau douce ou en eau de mer et sont peu sensibles aux salissures marines mais Il faut s'assurer toujours que le pH du sol ne place pas le zinc dans son domaine de passivation (cas des sols faiblement basiques ou trop calcaires) et il admette aussi des limites d'utilisation en fonction de la température qu'elle soit 60° C au maximum. [22]

Tableau II.6 : Caractéristiques électrochimiques de l'anode de zinc

Caractéristique électrochimique	en sol	En eau de mer
Potentiel à débit nul (V)	-1.1	-1.05
potentiel en charge (V)	-1.1	-1 .05 a -1
Capacité pratique (Ah/Kg)	740	780
Consommation massique pratique (Kg/A.an)	11.9	11.2
Rendement électrochimique	90%	95%

II.5.5. L'anode d'aluminium

Les anodes en aluminium ne sont pas adaptées à la protection cathodique dans les sols, mais plutôt au milieu marin très conducteur et renouvelé.

Les alliages utilisés nécessitent d'être activés par des éléments tel l'indium (0,02 %) ou le mercure (0,04 %) et contiennent de 1 à 5 % de zinc.

Le rôle de ces éléments est de supprimer la couche de passivation par l'alumine, de rendre plus électro-négatif le potentiel de l'anode et d'en améliorer le rendement. [22]

Tableau II.7 : Caractéristiques électrochimiques de l'anode de d'aluminium.

Caractéristique électrochimique	A base d'indium	A base de mercure
Potentiel à débit nul (V)	-1.1	-1.05
potentiel en charge (V)	-1.05	-1 .05 a -1
Capacité pratique (Ah/Kg)	2600	2830
Consommation massique pratique (Kg/A.an)	3.4	3.1
Rendement électrochimique	87%	95%

II.5.6. L'anode de magnésium

Ce type d'anodes est généralement correspond à un alliage à 90 % de magnésium contenant 6 % d'aluminium, et environ 3 % de zinc.

Il est noté que l'anode de magnésium est toujours posée dans une boue, mélange de gypse et d'argile colloïdale benthonique (backfill ou Cook), dont le but est de constituer un milieu assurant une corrosion uniforme de l'anode, tout en améliorant son rendement.

L'anode en magnésium présente, sur celle en zinc, l'avantage d'offrir une tension plus importante, et donc de permettre son utilisation sur des ouvrages plus importants, dans des terrains de forte résistivité ou en eau douce. Cet avantage général peut, dans certains cas, être un inconvénient, car il se traduit par une durée de vie plus faible, des débits de courant plus importants qui, en milieu marin, peuvent être incompatibles avec la tenue de certaines peintures. [22]

Tableau II.8 : Caractéristiques électrochimiques de l'anode de magnésium.

Caractéristique électrochimique	Type standard
Potentiel à débit nul (V)	-1.5
potentiel en charge (V)	-1.5 à -1.4
Capacité pratique (Ah/Kg)	1100
Consommation massique pratique (Kg/A.an)	6.3 à 8
Rendement électrochimique	55%

II.6. Protection cathodique par courant imposé

II.6.1. Principe de système

Ce système est dit aussi à soutirage de courant, Le principe consiste à mettre à profit l'effet d'un courant électrique injecte dans l'électrolyte à partir d'une anode. le courant de protection nécessaire est obtenu à partir d'une source extérieure de courant continu, ce qui implique l'utilisation d'un redresseur dont le pôle positif est relié à l'anode et le pôle négatif a la structure à protéger. Donc la différence de potentiel entre l'anode et la structure à protéger n'est pas naturelle (imposée).

Le courant partant de l'ensemble d'anode ou déversoir, traverse le sol, puis capté par la canalisation et retourne au générateur par circulation dans le métal de la conduite en abaissant leur potentiel.

Cette installation porte l'avantage du non limitation par les conditions du milieu, de pouvoir régler la tension (ou le courant) en fonction des besoins et ceci permet d'optimiser le système et de protéger de grandes surfaces. [14]

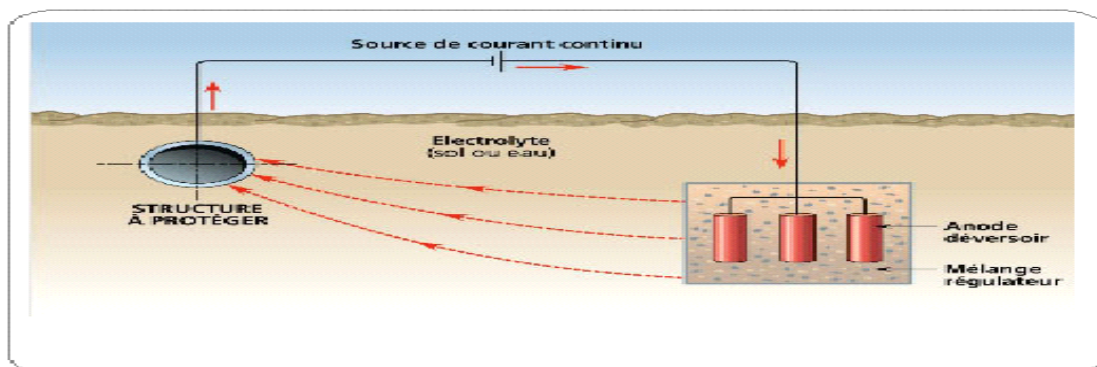


Figure. II.4: schéma d'une installation de protection par courant imposé

Un tel système doit comporter les défèrent constituants suivants :

- Un déversoir (l'ensemble de masse anodique).
- Câble de liaison.
- Poste de soutirage et leur système d'alimentation.
- Appareillages auxiliaires (télésurveillance, control).

II.6.2. Le déversoir

Le déversoir sert à injecter le courant de protection cathodique dans le sol. Il doit donc être constitué de matériaux conducteurs de courant. Se comportant comme une anode, il est soumis aux phénomènes d'oxydation. N'importe quel matériau conducteur est utilisable avec les anodes

et déversoirs mais pour des raisons de budget et de durée de service, leur taux de consommation doit être bas et leur coût raisonnable. Les matériaux de construction des déversoirs peuvent être de la grenaille d'acier au carbone, de la fonte de rebut, des cylindres de graphite, des tiges en alliages spéciaux ou des matériaux nobles plaqués avec des matériaux « inertes » comme la platine ou des oxydes métalliques mixtes. [21]

La différence de potentiel entre la masse anodique et la structure à protéger n'est pas nécessaire car la masse anodique est forcée d'être anode par l'imposition du courant.

Les divers matériaux constituant le déversoir sont décrits dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.9 : caractéristiques des matériaux d'anodes à courant imposé.

Matériau d'anode à courant imposé	Densité de courant maximale, en A/m ²	Densité de courant de travail, en A/m ²	Taux de Consommation pratique
Acier	-	0.5	10 kg/A.yr
Aluminium	10	4.8	2 kg/A.yr
Graphite	25	de 2.5 à 10	0.25 kg/A.yr
Ferro silicium	50	de 5 à 25	0.1 kg/A.yr
Magnétite	200	115	0.02 kg/A.yr
Alliage	300	de 50 à 150	0.085 kg/A.yr
Titane platiné	2000	de 2.5 à 10	8kg /A.yr
Tantale platiné	2000	de 250 à 700	8mg /A.yr
Niobium platiné	2000	de 500 à 1000	8mg /A.yr
Titane MMO	1000	de 500 à 1000	1mg /A.yr

II.6.3. Les configurations possibles des déversoirs

Le choix de la configuration de déversoir n'est qu'une affaire de spécialiste et économiste au même temps, il est basé sur les points suivants :

- La résistivité du sol
- Possibilité d'occupation du sol

Phénomène d'interférence entre les structures voisines. [22]

II.6.3.1. Déversoir en surface

Cette configuration est possible lorsque la résistivité du sol permet de avoir la portée désirée et lorsqu'on dispose de l'espace. Il existe :

- Ensemble d'anodes posées horizontalement.
 - En série
 - En parallèle (dissimilée)
- Ensemble d'anodes posées verticalement.

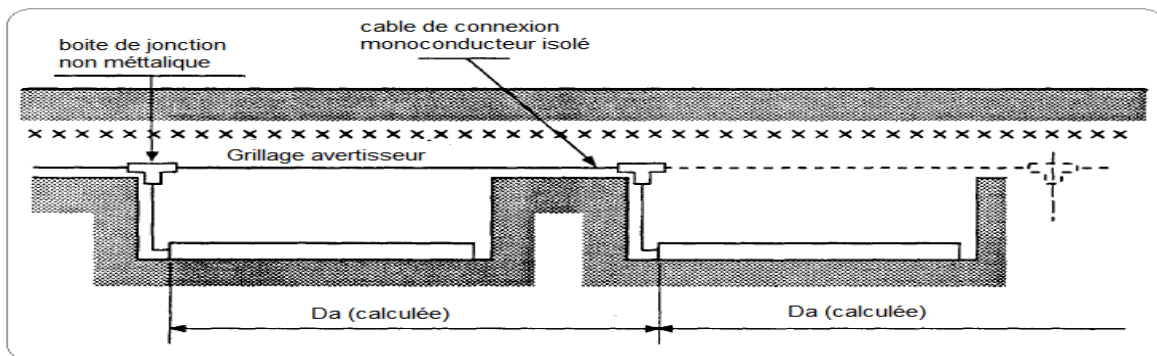


Figure. II.5 : configuration horizontal des anodes (en série).

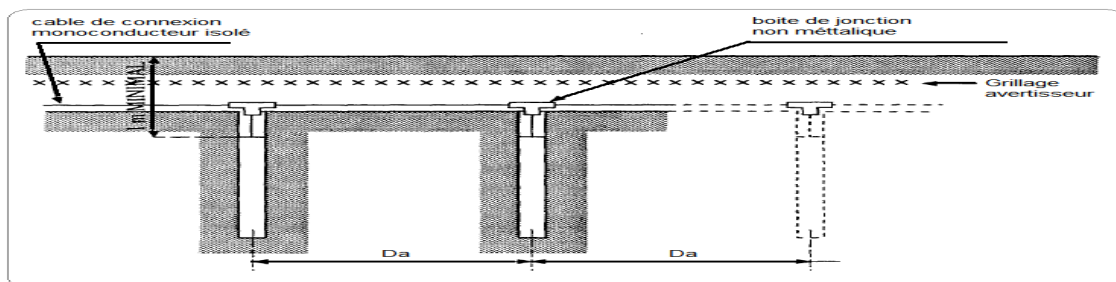


Figure. II.6: configuration vertical des anodes.

II.6.3.2. Déversoir en casing

Selon (NACE International. 2001) : Une ou plusieurs anodes installées verticalement à une profondeur nominale de 15 m (50 pied) ou de plus au-dessous de la surface de la terre dans un trou foré afin d'assurer la protection cathodique.

L'installation de ce type de déversoir est commandée quand :

- La résistivité du sol en surface ne permet pas l'obtention d'une valeur acceptable de tension aux bornes du générateur.
- Le besoin d'une répartition convenable du courant sur la structure à protéger.
- Risque d'interférence avec les structures voisines.

- Réduction au minimum de la surface de perturbation dans les secteurs environne-
mentalement sensible.

Ils peuvent être n'importe quelle profondeur et largeur mais sont typiquement dans la région de la profondeur totale de 100 à 200 m avec les anodes ou la section "active" en partie plus inférieure et jusqu'à 300 millimètres de largeur. La section supérieure est inactive et tient compte de la séparation (éloignement électrique) entre l'anode et la structure.

Des matériaux tels que le graphite, le fer de chrome de haut-silicium, le platine, le MMO (mixed-metal oxide) et l'acier peuvent être employés comme anodes dans les déversoirs profonds. Tous ces matériaux excepté l'acier sont résistants à la corrosion dans des environnements d'halogène. La considération sera donnée au rapport de la superficie d'anode au poids et décharge de courant. Les différentes anodes font partie d'une corde d'anode où des anodes multiples sont reliées au même câble et tendent à être alimentées des deux extrémités. Une ou plusieurs cordes d'anode est insérées dans le déversoir. Les anodes sont centrées dans le trou par des centralisateurs et correctement pesées par un poids d'extrémité. L'enveloppe ou l'évent qui a pour but d'évacuer les gazes que pouvant bloqués l'écoulement de courant peut être métallique ou plastique perforé dans la zone active. [23]

Les anodes peuvent être entourées par un conducteur remblayent du poussier de coke de pétrole backfill) qui a l'effet de créer une basse résistance simple, et le courant est passé de la longueur entière de l'anode et le backfill. Alternativement si l'anode est installée au-dessous d'une table d'eau donc un backfill ne peut pas être exigé. [23]

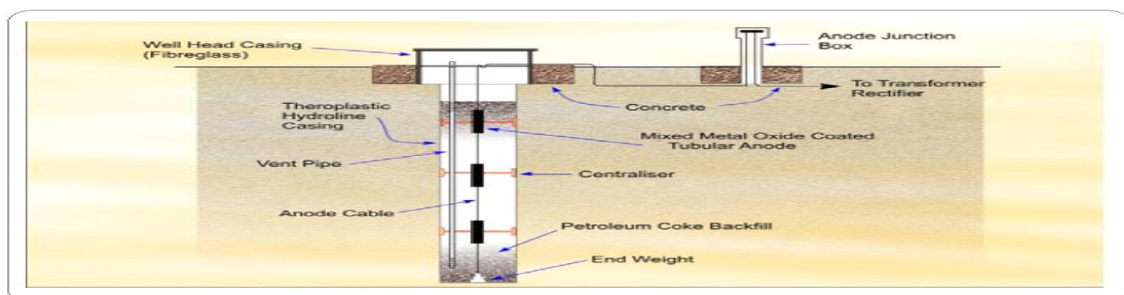


Figure. II.7 : installation d'un déversoir en profondeur (chapelet).

Il faut noter que la distance entre le déversoir et la structure à protéger doit être 200 m au minimum dans le but d'augmenter la portée du poste de soutirage. Cette distance peut être optimisée à l'aide d'un modèle adéquat.

II.7. backfill

Appelé aussi mélange régulateur, à base de carbone ou à faible résistivité est généralement employé dans les déversoirs à courant imposé. Le backfill a pour but d'abaisser la résistance du déversoir en augmentant la surface de contact avec le sol et en prolongeant la durée de vie de l'anode en déplaçant la réaction anodique (formation d'oxygène ou de chlore) de la surface de l'anode vers la surface de la colonne de coke plus inerte et d'avoir une consommation quasi homogène sur la surface des anodes.

Il y a trois matériaux communs qui adaptent cette description :

- Poussier de coke de charbon,
- Poussier de coke calciné de pétrole,
- Particules normales ou synthétiques de graphite,

II.8. Les câbles de connexion

En matière de protection cathodique, il est courant d'employer des câbles en cuivre gainés avec du PVC ou du polyéthylène, isolés au polyéthylène réticulé, avec des sections variant selon le courant transporté et les limites de résistance du circuit. Si de longs parcours de câbles sont nécessaires, il faudra peut-être envisager des sections plus larges pour maintenir la chute de potentiel à un niveau raisonnable. Pour des raisons mécaniques, il faut utiliser une taille de câble (mono conducteur) de 6 mm² minimum.

Les câbles utilisés dans les déversoirs profonds où une production d'oxygène et de chlore ou une forte acidité est possible, doivent être suffisamment résistants. Le PVDF (poly fluorure de vinylidène, par ex. Kynar) est un matériau adapté.

Le courant permanent admissible des câbles de protection cathodique (fil d'interconnexion) est rarement exploité à son maximum. En revanche, la résistance de circuit maximale admissible est une valeur plus sensible. La résistance du câble exerce parfois une influence non négligeable.

Les câbles branchés au circuit positif d'un système de protection cathodique à courant imposé (câble d'anode) devront toujours être dans un état impeccable pour éviter la corrosion électrolytique rapide du conducteur en cuivre.

Tableau II.10 : Tailles de câbles mono conducteur pour la protection cathodique.

Section transversale nominale, (mm ²)	Nombre de conducteurs	Résistance monoconducteur, (Ω /km)	Courant CC nominal classique, (A) (temp. max. 70 C)
6	7	3	31
10	7	1.8	42
16	7	1.1	56
25	7	0.7	73
35	19	0.5	90
70	19	0.26	185

II.9. Poste de soutirage

Appelé aussi générateur a courant continue ou TR (transformateur redresseur), il assure l'alimentation du système de protection en énergie électrique continue. Le transformateur et les redresseurs représentent les sources de courant les plus économiques et les plus fiables pour la protection cathodique à courant imposé. Le courant alternatif qui alimente le transformateur/redresseur peut être monophasé ou triphasé. Il est préférable d'associer un courant triphasé avec les systèmes très puissants pour obtenir un débit en courant continu plus régulier qu'avec un courant monophasé, sauf si des circuits de lissage sophistiqués sont prévus. Le poste de soutirage est composé essentiellement de :

- Coffret de soutirage de courant CSC : il englobe le raccordement du câble anodique au pôle (+) et le câble cathodique au pôle (-), panneau ou interface de command (voltmètre, ampèremètre, mesure potentiel pipe), compteur, disjoncteur.
- Un branchement en tension : provenant d'une source électrique.
- Le compartiment transformateur-redresseur.
- Coffret des résistances variables (de stabilisation). [24]

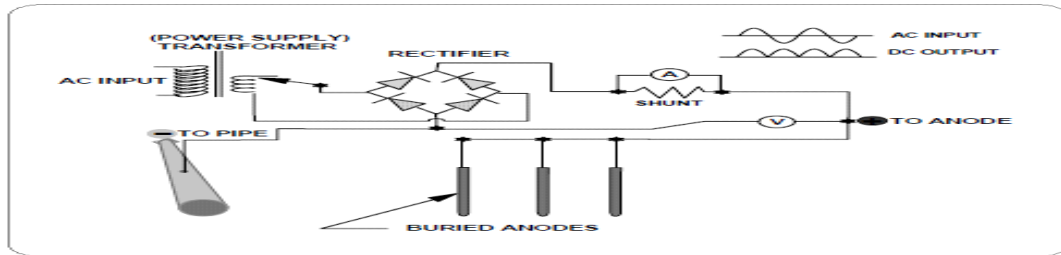


Figure. II.8: schéma simplifié d'un transformateur-redresseur.

Des logements aérés qui prévoient le refroidissement à l'air par convection sont utilisés pour la plupart des applications de transport. Là où les atmosphères fortement corrosives existent (marin ou industriel, par exemple), l'équipement peut être immergé dans l'huile dans un réservoir.



Figure. II.9: poste de soutirage à bain d'huile

(Tirée de : formation de protection cathodique, COSIDER-SONATRACH 2014).

Des résistances variables (ajustable) sont utilisées pour commander l'intensité du courant délivrée à la structure (pipeline ou ouvrage concentré) dans le cas où il n'est pas possible de la régler à partir du poussoir de réglage car la structure ne nécessite qu'un faible courant de quelques milliampères et ça s'apparue au début de vie de l'installation notamment sur les canalisations enduites.

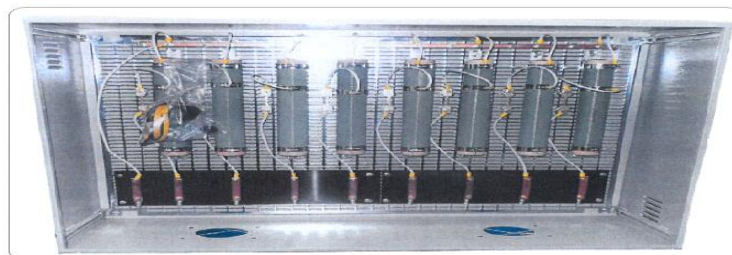


Figure. II.10: coffret des résistances de stabilisation

(Tirée de : formation de protection cathodique, COSIDER-SONATRACH 2014)

En complément de la configuration minimale du poste de soutirage, il est fréquent d'installer certains dispositifs permettant tel que :

- La régulation automatique du potentiel de protection de la structure,
- La limitation du courant (par exemple en limitation du soutirage sur voie ferrée en service
- L'interruption du service, permettant des mesures de potentiels "on" et "off" de la structure lors des contrôles de maintenance,
- La télésurveillance du poste de soutirage, notamment pour signaler son état de fonctionnement ou d'arrêt.

L'implantation d'un poste de soutirage doit tenir compte de plusieurs critères pratiques lesquelles on va les discuter dans le chapitre suivant, mais essentiellement le poste doit assurer une grande portée avec une consommation d'énergie minimale. [24]

II.10. Control de la protection cathodique

Après la mise en service de la protection cathodique définitive, et afin d'assurer un bon rendement de protection ; un contrôle périodique effectué par des spécialistes est indispensable pendant toute la durée de vie de l'ouvrage. Ce dernier est basé essentiellement sur les points suivants :

- Vérification du bon fonctionnement du système de protection cathodique
- Contrôle des PPC existents le long de la ligne ainsi que les ouvrages concentrés
- Mesure du potentiel de la structure afin d'assurer un seuil de protection acceptable.
- Vérification de la consommation du courant par les différents tronçons de la structure à l'aide des PMA. [23]

II.10.1. Les prises de potentiel simple PPS

Elle permet de mesurer localement le potentiel de la structure à protéger par l'intermédiaire d'une électrode de référence portable. Le prélèvement du potentiel à partir de cette pointe est fait avec un multimètre, entre extrémité d'un câble connecté sur la structure et remonté dans la prise de mesure et l'électrode de référence portable posée sur le sol.

Ces prises sont généralement réparties le long du pipeline avec une distance de 2 km entre elles et elles sont utilisées pour trois (3) catégories de mesures :

- A l'état initial pour mesurer le potentiel naturel.
- En dynamique c.-à-d. sous la protection cathodique.
- A la coupure, appelé aussi " on-off " pour l'évaluation de résistance d'isolement. [23]

II.10.2. Les prises de mesure ampérométriques PMA

Les prises de mesure ampérométriques seront installés à un intervalle de 6 Km à 9 Km le long de la ligne et à 250 m en amont et en aval de chaque point d'injection. Ces prises sert à mesurent le potentiel puis calculent le courant à travers la loi d'ohm ($U=RI$) en connaissant la résistance de tronçon considéré. la connaissance de courant consommé dans chaque tronçon donne une bonne indication sur l'état de ce dernier. [23]

II.10.3. Les prises jointes isolant PJI

Ces prises sont localisées au niveau des raccords isolant, leurs contrôles s'effectuées par comparaison des potentiels entre les deux bornes de joint. La prise comporte aussi un éclateur et une résistance de stabilisation dans certains cas.

Il existe aussi d'autres types de prises tell que :

- PCTE (prise de croisement de tiers étranger).
- PTG (prise tube /gaine).
- PEP (prise équipotentielle de parallélisme). [23]

II.11. Les différents systèmes d'alimentation en énergie électrique

Comme la méthode de protection cathodique par courant imposé nécessite une source de courant continu de façon permanente, l'installation doit être reliée à l'un des systèmes suivant :

- Ligne de distribution de sone gaz BT.
- Groupe électrogène.
- Thermo générateur.
- Turbogénérateur.
- Générateur solaire photovoltaïque, ou un éolien. [23]

II.12. L'énergie solaire photovoltaïque

II.12.1. Principe de fonctionnement

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre

un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type « n » et dopée de type « p ». Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau « n » diffusent dans le matériau « p ». La zone initialement dopée « n » devient chargée positivement, et la zone initialement dopée « p » chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone « n » et les trous vers la zone « p ». Une jonction PN a été formée et donc cette différence de potentiel ainsi créée entre les deux couches donne de l'électricité. [25]

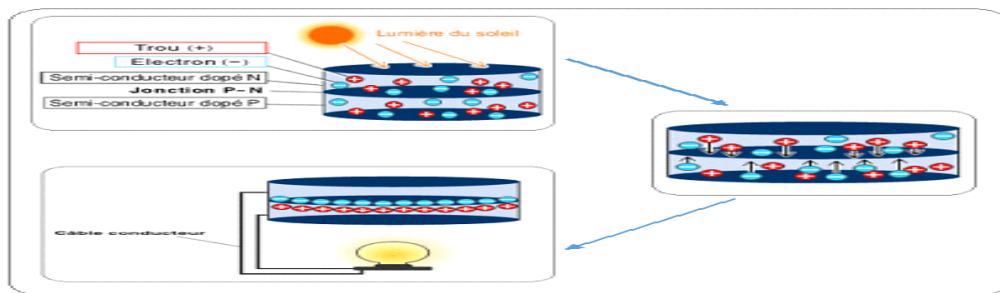


Figure. II.11: principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Le générateur solaire photovoltaïque conçu pour une installation de protection cathodique est composé généralement de :

- Panneaux solaire photovoltaïques.
- Régulateur de charge.
- Batteries d'accumulateurs.

II.12.2. Panneau photovoltaïque

Un panneau (ou module) photovoltaïque est un bloc composé de plusieurs cellules généralement montées sous une plaque de verre, d'une dimension de 0,1 à 3 m² typiquement. Ces panneaux ont pour fonction de réunir assez de cellules pour créer un convertisseur d'énergie, ces cellules devant être protégées des chocs et des intempéries. Leur puissance varie selon le nombre et la taille des cellules qui les composent, de 1 à 300 W typiquement tel que les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnelle à la surface du module. Pour disposer de plus de puissance sur une installation, on associe plusieurs modules en créant un champ photovoltaïque. [25]

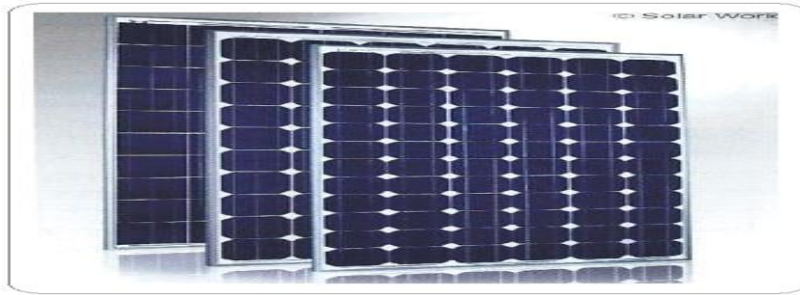


Figure. II.12 : panneau solaire Monocristallin

A la surface, le contact électrique (électrode négative) est établi par la grille afin de permettre à la lumière du soleil de passer à travers les contacts et de pénétrer dans le silicium. Les cellules solaires sont recouvertes d'une couche antireflet qui protège la cellule et réduit les pertes par réflexion. C'est une couche qui donne aux cellules solaires leur aspect bleu foncé.

Il faut noter que si notre site se situe dans l'hémisphère sud, il faut orienter les panneaux fixes vers le nord pour capter les Rayons du soleil tout au long de l'année, par contre si le site est au nord de l'hémisphère, les panneaux sont orientés à Plein sud. Un degré d'inclinaison entre 20° et 60° est recommandé généralement mais La meilleure inclinaison des panneaux solaires photovoltaïques pour un usage à longueur d'année est celle de la latitude de l'endroit où sont installés les capteurs, un écart par rapport à la situation idéale implique donc une perte de rendement de quelques pourcents seulement.

Les panneaux photovoltaïques ne seront pas les mêmes selon les applications, les technologies étant adaptées, pour certaines, aux moyens et forts éclairagements (sous éclairement naturel) et, pour d'autres, aux faibles éclairagements (sous éclairement intérieur). [25]

II.12.3. Régulateur de charge

Ce dispositif est composé d'un système électronique automatisé qui constitue la liaison entre les panneaux, les batteries et la charge.

Il est conçu pour prolonger la durée de vie des batteries lesquelles sont le composant le plus fragile dans le générateur photovoltaïque en contrôlant leurs états de charge et de décharge. Il connecte la batterie au panneau pendant la phase de charge, puis la déconnecte si elle atteint leur limite supérieure de surcharge, la connecte avec le système d'utilisation pour être déchargée, puis la déconnecte si leur état de charge devient inférieur à la limite de sécurité de décharge profonde. [26]

Le processus de régulation est consigné dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.11 : processus de régulation du régulateur.

Etat de la batterie	Le command
Si $V_B > V_{max}$	(1) Déconnecte les modules PV
Si (1) vrai et $V_B < V_{t1}$	(2) Reconnecte les modules
Si $V_B < V_{min}$	(3) Déconnecte la charge (utilisation)
Si (3) vrai et $V_B > V_{t2}$	(4) Reconnecte la batterie à la charge

Avec :

V_{t1} la tension de reconnexion des modules.

V_{t2} la tension de reconnexion des récepteurs (utilisation).

V_B la tension de la batterie.

V_{max} : tension de fin de charge, V_{min} : tension de fin de décharge.

**Figure. II.13:** régulateur de charge solaire type « Steca »

II.12.4. Les batteries

Les batteries incluses dans le système solaire photovoltaïque permettent de stocker l'énergie électrique produite par le champ solaire pendant le jour et de fournir l'électricité pendant la nuit ou durant des périodes de faible ensoleillement. La capacité de la batterie est calculée afin d'obtenir assez d'énergie au jour le jour et pour une utilisation normale dans les périodes de faible ensoleillement incluant une réserve d'énergie pour les périodes de mauvais temps.

Les batteries les plus utilisées dans les installations photovoltaïques sont de type stationnaires à décharge profonde en alliage de plomb, ils sont constitués de quatre éléments indispensables pour leurs fonctionnements : d'une électrode positive, d'une électrode négative, d'un électrolyte et d'un séparateur. Sur le marché l'on trouve des batteries stationnaires en 2, 6, ou 12 volts nominal. Une batterie est également caractérisée par sa capacité exprimée en

ampère heures [Ah], qui est la quantité de courant qu'elle peut fournir au cours d'un nombre d'heures précis. [27]



Figure.II.14 : batteries d'accumulateurs au plomb

Un poste de soutirage alimenté par énergie solaire photovoltaïque peut être représenté par la figure suivante :

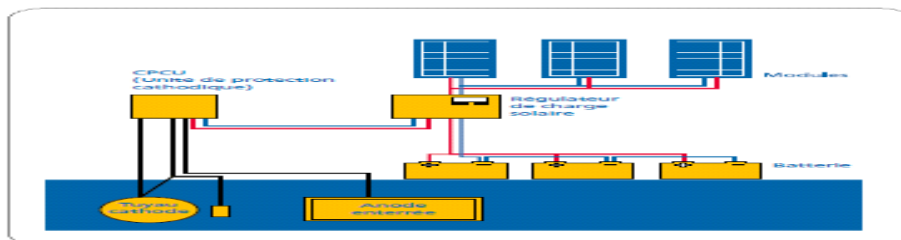


Figure. II.15: générateur photovoltaïque pour un poste de protection cathodique [28]

Conclusion

Tout structures en contact avec un électrolyte doivent être protégée cathodiquement afin d'assurer leur durée de vie souhaitée. Dans ce chapitre nous avons illustrés tous ce qui concerne la protection cathodique et surtout la protection par courant imposé qui est la méthode la plus utilisée pour la protection permanente des structures longiligne comme les gazoducs. N'importe quel projet de la protection cathodique doivent être bien étudié, bien réalisé et enfin avoir un contrôle périodique adéquat durant tout leur duré de vie en assurant le bon fonctionnement des installations et l'application des critères de protection. Le reste de notre travail est réservé au dimensionnement optimal d'un système de la protection cathodique utilisé comme source énergie les panneaux solaires photovoltaïques.

Chapitre

III

***DIMENSIONNEMENT
D'UN SYSTEME PV***

Introduction

Dans ce chapitre qui représente le cœur de cette mémoire nous essayons de dimensionner le système de protection cathodique de l'oléoduc OK1 (Haoud El Hamra-terminal arrivé Skikda), alimenté par un système photovoltaïque, ainsi qu'une étude technico-économique comparative à celui alimenté par un système conventionnel.

Le calcul des paramètres de dimensionnement nécessite la collecte des données essentielles aux calculs, tel que la structure et ses caractéristiques opérationnelles, ainsi que les données environnementales.

III.1. Description de l'Oléoduc OK1 34" Haoud el Hamra-Skikda

L'oléoduc OK1 34" mise en service en 1972 conçu pour le transport du pétrole brut et de condensât à une Capacité de 30 MTA à partir du parc de stockage terminal départ HAOUD EL HAMRA, au parc de stockage terminal d'arrivée SKIKDA.

Il est constitué de quatre stations de pompage (SP1, SP2, SP3BIS et SP4), chacune comprenant trois turbopompes, dont deux normalement en fonction et une de réserve. Les deux pompes en fonction sont en série, pour donner au fluide pompé la hauteur différentielle nécessaire pour transférer le brut ou le condensât de la localité de Haoud el Hamra au terminal de Skikda.

III.1.1. Stations de pompage SP3 OK1 Selga Biskra :

Cette station, où nous avons effectué notre stage, a été rénovée pour assurer les performances voulues à long terme, et elle est constitué de :

- ✚ Trois groupes turbopompes (TP1B.TP2B et TP3B) alimentés en gaz naturel.
- ✚ Réseau électrique de SONELGAZ.
- ✚ Groupe électrogène.
- ✚ Réservoirs de stockage.
- ✚ Réservoirs de collecte de drainage.
- ✚ Système d'instrumentation et télécommunication.
- ✚ Vannes et pipe nécessaires.
- ✚ Système anti-incendie et bâtiments de (salle de contrôle, groupes électrogènes, garage, atelier et magasin) et les différents services.

III.1.2. Situation géographique

La station SP3 de l'oléoduc OK1 - 34'' mise en service en 1972 est située au PK 338, au lieu dit SELGA. Daïra de TOLGA. Wilaya de BISKRA. Et exactement 34°50' Latitude Nord et 5°45' Longitude Est à 185 mètres d'altitude



Figure. III.1: Situation géographique de SP3.

III.1.3. Profil en long et position de sp3 sur l'ouvrage

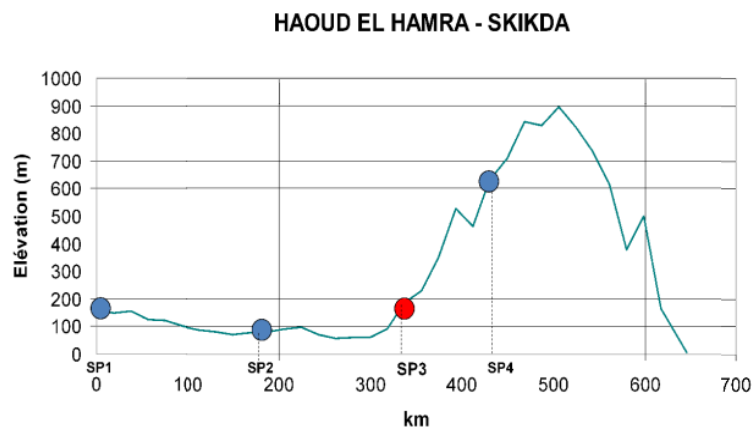


Figure. III.2 : Profile et position de SP3.

III.2. Moyens de lutte pris par l'entreprise

L'entreprise L'oléoduc OK1 34'' protège le pipeline par protection cathodique par courant imposée alimenter par réseau électrique SONELGAZ

III.3. Solution proposée

Nous proposons pour notre part, la protection cathodique avec un courant imposé au moyen d'une source continue reliée à un système solaire photovoltaïque et des anodes métalliques.

III.4. Informations de base pour la conception de la protection cathodique

Le processus de conception de la protection cathodique pour certaines structures peut être très complexe, nécessitant de nombreuses itérations avant d'obtenir à une conception acceptable. La première étape du processus de conception consiste à collecter et à évaluer les données pertinentes concernant la structure, ses caractéristiques opérationnelles et son environnement. Pour un nouveau projet de protection cathodique de pipeline, l'ensemble de données possible comprendrait les éléments suivants :

III.4.1. Informations sur le pipeline

- Spécifications de construction
- Matériau de la canalisation, diamètre, épaisseur de paroi et pression nominale
- Type, épaisseur et conductance du revêtement de canalisation et des joints
- Plages de température, du fluide à l'intérieur de la canalisation
- Tracé au profil de canalisation, nombre et emplacement des interconnexions aux systèmes de tuyauterie connexes et faisabilité de l'installation d'une isolation électrique
- Continuité électrique du pipeline
- Disponibilité de l'alimentation CA et accès routier aux installations de CP possibles
- Nombre, longueur et emplacement des gaines de tuyauterie
- Nombre, emplacement et fonctionnement des vannes de canalisation principale et type de revêtement

III.4.2. Informations environnementales

III.4.2.1. Conditions du sol

- Résistivité du sol le long du tracé à la profondeur de la pipe.
- Informations géotechniques (types de sol et profondeur).
- Variabilité de l'humidité (saisonnière).
- Variabilité de la température et Ph.

III.4.2.2. Interférences électriques

La présence, l'emplacement et les caractéristiques opérationnelles des systèmes suivants doivent être examinés :

- Systèmes de protection cathodique à courant imposé sur les pipelines étrangers ou d'autres structures
- Systèmes de transit électrique, lignes électriques DC haute tension, opérations de soudage et tout autre système électrique utilisant la terre indirectement ou directement comme chemin de courant
- Systèmes de transmission ou de distribution d'énergie AC parallèles au pipeline ou dont les pieds de tour ou les terres électriques sont adjacents au nouveau pipeline
- Les structures métalliques étrangères et leur susceptibilité aux dommages causés par les interférences

III.4.3. Action préliminaire

- Mesures la résistivité du sol le long du tracé à la profondeur du pipeline et aussi au niveau dès l'emplacement les anodes au l'endroit approprié
- Inspection visuelle du tracé du pipeline afin de vérifier la disponibilité de l'énergie électrique.
- Test de courant alternatif induit sur un fil isolé le long du tracé de conduite parallèle aux lignes électriques AC
- Localisation des « points chauds » de corrosion de la longue ligne sur la tuyauterie nue

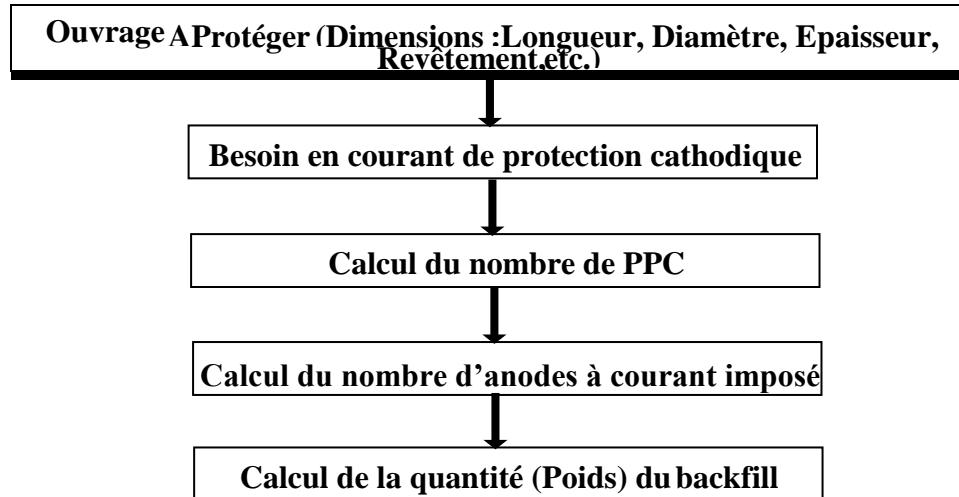
III.5. Hypothèses de calcul

Selon la norme ISO 15589-1 : 2015 ; l'étude des besoins en courant de protection est calculée, en prenant les hypothèses suivantes :

- Basée sur les facteurs de dégradation du revêtement.
- Basée sur la densité de courant pour les canalisations revêtues.

III.6. Procédure de dimensionnement du système de PC

Le diagramme général de calcul des systèmes de protection cathodique est comme suivi



III.7. Théorie et note de calcul

III.7.1. Les équations mathématiques utilisées pour les calculs d'atténuation

III.7.1.1. Résistivité du sol

Comme précisé dans le chapitre premier, ce paramètre très important est déterminé par la méthode des quatre piquets. De façon générale elle est mesurée le long de la structure avec un intervalle de 100 à 500 m pour un ouvrage en projet et à chaque 100 à 200 m pour un ouvrage existant.

Ceci étant pour une longue structure, tels les pipelines, plusieurs mesures sont effectuées, la résistivité du sol est donc été estimée à une valeur moyenne, qui est donnée par l'équation ci-dessous :

$$\rho_{sm} = \frac{1}{N} * \sum \rho_i \quad (\text{III.1})$$

Où :

N : Nombre de tronçons = 893

ρ_{sm} : Résistivité moyenne du sol

ρ_i : Résistivité du sol de tronçon

Les instruments de mesure de la résistivité du sol par cette technique sont largement disponibles. La méthode la plus utilisée pour déterminer la résistivité des sols est la méthode des quatre piquets de Wenner.

III.7.1.2. Résistance Longitudinale de la conduite par unité de longueur R_c

Les structures métalliques traversées par le courant de protection sont considérées comme des conducteurs et tout conducteur présente une résistance au passage d'un courant électrique. Dans le cas des canalisations, cette résistance est appelée résistance longitudinales et dépend de la nature du matériau et de ses dimensions.

Autrement appelé résistance transversale, par unité de longueur elle s'exprime en $[\Omega/m]$ et est donnée par :

$$R_c = \frac{\rho_c}{\pi * (\varnothing_{ext} - \delta) * \delta} \quad (III.2)$$

Avec :

ρ_c : Résistivité électrique du matériau de la structure $[\Omega \cdot mm^2/m]$

ρ_c de l'acier peut être accepté pour $0.245 \Omega \cdot mm^2/m$

\varnothing_{ext} : Diamètre extérieur la structure [mm]

δ : Epaisseur moyen de la conduite [mm]

III.7.1.3. Résistance transitoire "conduite-sol" R_t

La variation de la résistance transitoire « conduite-sol » notée $R_t(t)$ et exprimée en $[\Omega \cdot m^2]$, peut être évaluée, pour des pipelines en projet ou en exploitation par la relation suivante :

$$R_t(t) = R_{ti} * e^{-\beta * t} \quad (III.3)$$

Néanmoins, en général pour les calculs en protection cathodique on utilise plutôt la valeur moyenne de la résistance transitoire conduite – sol qu'on note (R_{tm}) pour une durée de protection « t » connue. Exprimée en $[\Omega \cdot m^2]$, elle est obtenue par :

$$R_{tm} = \frac{R_{ti}}{\beta * t} * [1 - e^{-\beta * t}] \quad (III.4)$$

Avec :

β : Coefficient de vieillissement du matériau de la conduite $[1/an]$

β_{acier} peut être égal à 0.124: $1/an$

t : Durée d'exploitation du système de protection [an]

R_{ti} : Résistance initiale d'isolement du revêtement ; à $t = 0$ [$\Omega.m^2$]

III.7.1.4. Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la conduite R_r

Elle s'exprime en [$\Omega.m$] et est notée $R_r(t)$ pour une durée d'exploitation t .

$$R_r(t) = \frac{R_{tm}}{(\pi * \Phi_{ext})} \quad (III.5)$$

En outre, au début de l'installation du système de protection la résistance d'isolement du revêtement est plus importante. Notée $R_r(0)$, elle est donnée par :

$$R_r(0) = \frac{R_{ti}}{(\pi * \Phi_{ext})} \quad (III.6)$$

III.7.1.5. Calcul du coefficient d'atténuation α

Est appelé aussi la constante de la distribution du potentiel le long de la conduite, il traduit l'abaissement du potentiel le long de bras de potentiel. Il est donné par la relation suivante :

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_c}{R_r(t)}} \quad (III.7)$$

III.7.2. Détermination du nombre de postes de soutirage et du nombre d'anodes

Selon les caractéristiques du pipeline, un certains nombres de postes de soutirage est nécessaire pour abaisser suffisamment le potentiel de la conduite afin de satisfaire au critère de protection.

III.7.2.1. Résistance d'entrée d'une conduite revêtue Z

Dans le domaine du transport des hydrocarbures par canalisation, les pipelines sont toujours revêtus, et ce revêtement constitue le siège d'une résistance ; dite résistance d'entrée.

Comme toutes résistances, elle s'exprime en ohm et est donnée par :

$$Z = \frac{\sqrt{R_c * R_{r(t)}}}{2} \quad (III.8)$$

III.7.2.2. Valeurs des potentiels

Généralement on distingue pour les structures métalliques immergées ou enterrées trois types de potentiels pris en compte dans les calculs de protection cathodique. Ces potentiels sont donnés par rapport à une électrode de référence, qui sera tout au long de ce travail, l'électrode au cuivre-sulfate de cuivre (Cu-CuSO4)

- Le potentiel naturel
- Les potentiels de protection E_{max} et E_{min}
- Gain de potentiel

$$E_{p,max} = E_{max} - E_{nat} \quad (III.9)$$

$$E_{p,min} = E_{min} - E_{nat} \quad (III.10)$$

Comme le courant qui est déversé dans l'électrolyte pour ensuite pénétrer dans la conduite, afin de baisser son potentiel, le potentiel que prend le métal une fois connecté au système de protection cathodique n'est pas constant, il varie suivant l'allure d'une loi exponentielle. Afin d'établir l'expression de cette variation du potentiel et du courant j'émetts les hypothèses suivantes :

- L'électrolyte (sol) est homogène le long du pipeline
- Le diamètre, l'épaisseur de la paroi et la résistance électrique des tubes soudés sont constants.
- Le revêtement de la conduite est uniforme le long de la canalisation.

Ainsi, après calcul on retrouve les expressions donnant la variation du potentiel et du courant à un point « x » quelconque de la conduite :

$$E(x) = E_{max} * \left(\frac{2 * \pi * z}{(2 * \pi * y * z + \rho sm)} e^{(-\alpha * x)} \frac{\rho sm * y}{(2 * \pi * y * z) * \sqrt{x^2 + y^2}} \right) \quad (III.11)$$

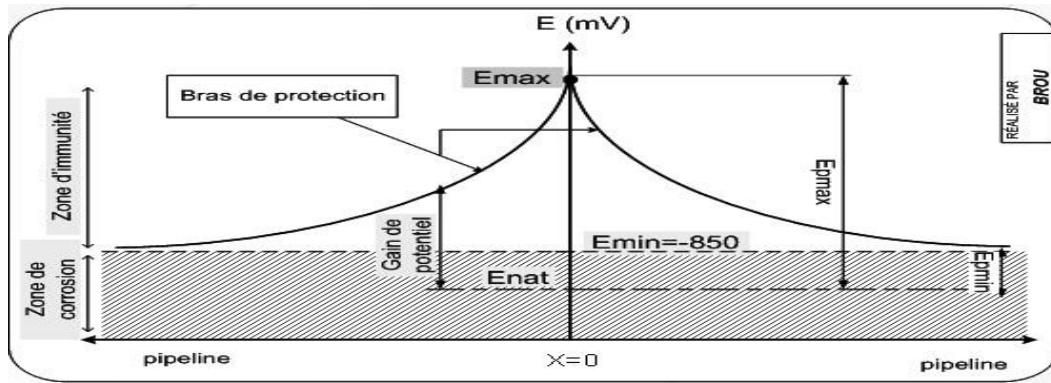


Figure. III.3 :Variation du potentiel de protection le long d'une conduite.

III.7.2.3. Coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins K

La plupart du temps les canalisations de transport d'hydrocarbures sont assez longues, par conséquent, un seul poste de soutirage ne suffirait pas à livrer le courant nécessaire pour la protection. C'est pourquoi l'on tient compte d'un facteur (de valeur approximative 0.5) dans les calculs de la longueur de protection d'un poste donné. Ce coefficient est obtenu par l'expression ci- dessous :

$$K = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{E_{pmin}}{E_{pmax}}\right)^2 * \frac{2 * \pi * \gamma * Z + \rho sm}{2 * \pi * \gamma * Z}}} \tag{III.12}$$

III.7.2.4. Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage Lp

On appelle longueur de protection Lp [m], d'un poste de protection cathodique, la longueur maximale de conduite qui peut être protégée à l'aide du courant fourni par ce poste. En d'autre terme, c'est la portée du poste de soutirage.

Quant au bras de protection, c'est la moitié de la longueur de protection. Ainsi, un poste de soutirage à deux bras de protection.

Lp s'exprime en mètre [m] et est déterminer suivant la relation :

$$Lp = \left(\frac{2}{\alpha}\right) * \ln \left[\frac{2 * \pi * \gamma * Z}{k * \left(\frac{E_{pmin}}{E_{pmax}}\right) * (2 * \pi * \gamma * Z + \rho sm)} \right] \tag{III.13}$$

Où Y [m] désigne la distance entre le lit d'anode et la conduite.

III.7.2.5. Calcul du nombre de postes de protection cathodique N_{PPC}

Connaissant la longueur totale (L) exprimée en mètre, du pipeline à protéger et ayant déterminé la portée d'un poste de soutirage, nous pouvons établir l'expression donnant le nombre de postes de soutirage.

$$N_{ppc} = L / (L_p + 1) \quad (III.14)$$

III.7.3. Calcul de l'intensité du courant de drainage I_{dr}

Quant au courant de drainage, c'est le courant nécessaire que doit fournir le poste de protection afin de satisfaire au critère de protection en tout point de la conduite. Elle est exprimée en Ampère, et donnée par la relation ci-dessous :

$$I_{dr} = |E_{pamx}| / (z * [1 + 2 * \text{EXP}(-\alpha * L_p)] + (\rho_{sm} / (2 * \pi * y))) \quad (III.15)$$

Il est important de noter que le courant délivré par le poste de soutirage au début de l'installation est relativement plus faible que le courant nécessaire, à la fin de la durée d'exploitation. Cela est particulièrement lié à la résistance d'isolement du revêtement qui est assez élevé en début d'exploitation. Le courant en début d'exploitation est déterminé par la relation suivante tout en négligeant les variations de k :

$$I_{dr(0)} = |E_{pamx}| / (z(0) * [1 + 2 * \text{EXP}(-\alpha * L_p)] + (\rho_{sm} / (2 * \pi * y))) \quad (III.16)$$

III.7.4. Calcul du nombre d'anodes minimal nécessaire à la protection N_a

Connaissant la durée de vie de la protection et les caractéristiques de l'anode choisie, nous pouvons estimer le nombre d'anodes nécessaire à la protection contre la corrosion d'une structure par la relation ci-dessous :

$$N_a = \frac{I_{dr} * t * m}{\mu * M_a} \quad (III.17)$$

Sachant que :

I_{dr} : Courant de protection (ou de drainage)

[A] t : Durée de l'exploitation [an]

m : Consommation massique de l'anode kg/ A.ans

M_a : Masse d'une anode [Kg]

μ : Coefficient d'utilisation de l'anode

III.7.5. Calcul de la résistance de terre du déversoir $R_{dév p}$

La résistance du déversoir est donnée par :

$$R = R_{ma} + R_t + R_{pol} \quad (III.18)$$

Avec :

R_t : Résistance du lit d'anode [Ω]

R_{ma} : Résistance du matériau de l'anode [Ω]

R_{pol} : Résistance de polarisation [Ω]

III.7.5.1. Calcul de la résistance de polarisation R_{pol}

Elle est exprimée en ohm et donnée par l'expression :

$$R_{pol} = U_a / I_{da} \quad (III.19)$$

U_a : Composante de polarisation de la chute de tension des anodes [V], $U_a = 2v$

I_{da} : Moyenne arithmétique entre $I_{dr(0)}$ et I_{dr} [A]

III.7.5.2. Calcul de la résistance du matériau de l'anode R_{ma} Elle est donnée par la relation ci-dessous :

$$R_{ma} = \rho_a * L_a / S_a \quad (III.20)$$

III.7.5.3. Calcul de la résistance du lit d'anodes R_t

Il existe plusieurs méthodes pour le calcul ce paramètre. Mais nous utiliserons celles données par NACE (National association of corrosion engineers) La résistance totale des anodes dépend de plusieurs facteurs :

- Position des anodes, verticalement ou horizontalement
- La profondeur de pose des anodes
- L'espacement entre les anodes
- La résistivité du backfill

Pour le cas des anodes placés verticalement dans un puits profond, la résistance totale est donnée par la relation ci-dessous

$$R_{Dev-P} = [\rho / (2 * \pi * L_{Active})] * [\ln ((8 * L_{Active}) / d_{puits}) - 1] \quad (III.21)$$

Avec :

R_{Dev-P} : Résistance d'un déversoir profond [Ω]

ρ : Résistivité du sol en profondeur 120 [$\Omega \cdot \text{cm}$]

d_{puits} : Diamètre du puits anodique 8" [cm]

$$N_{Anode} = (L_{Active} - e) / (L_{Anode} + e) \quad (III.22)$$

Et :

N_{Anode} : Nombre d'anodes à courant imposé

L_{Active} : Longueur active du déversoir [m]

L_{Anode} : longueur d'une anode 1.5[m]

e : espacement entre anode 5[m]

III.7.6. Calcule la puissance de poste soutirage

La puissance P [W] du poste de soutirage permet de dimensionner la source d'énergie. Mais avant de déterminer ce paramètre, il faut estimer la tension de la station de soutirage

III.7.6.1. Détermination de la tension du poste de soutirage U

La tension du poste U [V], est obtenue en appliquant la loi d'Ohm. Mais pour une régulation et disponibilité du courant de protection lors de l'exploitation du système, le poste de protection cathodique doit avoir une réserve en tension, ce qui nous conduit à une correction de la tension en tenant compte du rendement du poste noté ; $\eta_p = 0.85$

$$U = [R_{tot} * I_{dr}] / \eta \quad (III.23)$$

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

En effet du point de vu électrique le système protection cathodique par courant imposé peut-être schématisé comme le circuit suivant

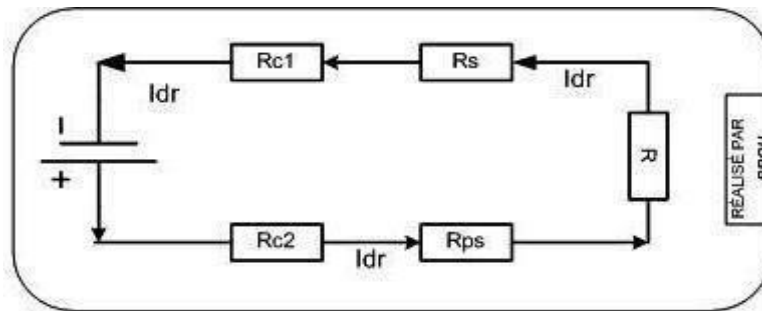


Figure. III.4 : Circuit électrique du système de protection.

Toutes ces résistances étant en série on peut déterminer la résistance équivalente R_{tot} , qui est la résistance totale du système tout en négligeant R_s pour sa valeur assez faible devant les autres.

$$R_{tot} = R_c + R + R_{ps} \tag{III.24}$$

Où

$R_c = R_{c1} + R_{c2}$: résistance du câble [Ω]

R_{ps} : résistance due à la protection passive = z [Ω]

R : résistance de terre du déversoir [Ω]

R_s : résistance du sol entre la canalisation et le déversoir [Ω]

III.7.6.2. Détermination de la puissance du poste de protection cathodique P

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

$$P = U * I_{dr} \tag{III.25}$$

Ayant la puissance, nous pouvons procéder au choix et au dimensionnement de la source d'alimentation en énergie électrique du poste de soutirage.

Pour cette étude nous avons choisie d'utilisé l'énergie solaire photovoltaïque suite aux raisons évoqué dans le chapitre précédent.

III.7.7. Dimensionnement du système photovoltaïque

Etant donnée une localisation géographique et donc des données météorologiques, le dimensionnement d'un générateur photovoltaïque est la recherche de l'équilibre entre la satisfaction de la demande énergétique exprimée.

Le générateur solaire ainsi préconisé est donc, étroitement lié aux valeurs d'entrée (données d'ensoleillement, demande énergétique) et l'autonomie du générateur peut être affectée, par exemple par une augmentation de la consommation lors des périodes critiques, qui peut être résolu suite à la flexibilité de ce procédé de production d'électricité.

III.7.7.1. Données d'entrée d'ensoleillement

Comme, souligné précédemment l'ensoleillement ; durée d'exposition d'un lieu au soleil est un facteur très important dans le dimensionnement d'un générateur photovoltaïque A titre indicatif l'ensoleillement (irradiation) journalier reçu à l'angle optimal pendant le mois le moins favorable de toute l'année de certaines régions est consigné dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.1: Irradiation moyenne de certaines régions.

Localité	Irradiation moyenne
Sud algérien	6 à 7 Kwh/m ²
Cote d'ivoire	4 à 5 Kwh/m ²
France	2 à 4 Kwh/m ²

III.7.7.2. Données d'entrée de la demande énergétique

Elle consiste en l'évaluation de l'énergie nécessaire au fonctionnement de la charge qui est le poste de soutirage dans le cas présent.

III.7.7.3. Calcul de l'énergie nécessaire au poste de soutirage E_n

L'énergie nécessaire au poste de soutirage, c'est l'énergie minimale dont le poste à besoin pour assurer sa fonction sous une puissance et pendant un temps de fonctionnement donnés.

$$E_n = P * t_f \quad (\text{III.26})$$

Avec :

E_n : énergie nécessaire au poste de soutirage

[wh/j] P : puissance du poste de soutirage [w]

t_f : temps de fonctionnement du poste du générateur solaire [h/j]

III.7.7.4. Calcul de l'énergie à produire par le générateur photovoltaïque E_f

L'énergie à fournir par le générateur photovoltaïque est donc donnée par :

$$E_f = E_n / [1 - F] \quad (\text{III.27})$$

E_f : Energie à fournir [Wh/j]

F : Pertes ; estimée de 25 à 45%

E_n : Energie nécessaire au poste de soutirage [Wh/j]

Ces pertes ont plusieurs origines :

- Pertes par accumulation de poussière sur le panneau
- Pertes (chutes de tension) dans le câblage et les équipements de conditionnement de l'énergie.
- Pertes dues aux batteries.
- L'incertitude météorologique...

III.7.7.5 Calcul de la taille du générateur photovoltaïque à installer

▪ Calcul de la puissance crête (maximale) du générateur photovoltaïque PC_G

La puissance crête totale du champ photovoltaïque, dépend de l'irradiation quotidienne du lieu d'utilisation, elle est donnée par :

$$PC_G = E_f / I_r \quad (\text{III.28})$$

I_r : Irradiation quotidienne moyenne annuelle [kWh/m².j]

▪ Détermination du nombre de panneau solaire N_{ps}

Le nombre de module solaire est un nombre entier fonction de la puissance crête du générateur et de la puissance crête du panneau (PC_{ps}) solaire choisi.

$$N_{ps} = PC_G / PC_{ps} \quad (III.29)$$

III.7.7.6. Dimensionnement du parc batteries

▪ Calcul de la capacité des accumulateurs nécessaires C

Pour déterminer la capacité des batteries, on utilise l'équation suivante :

$$C = [E_n * A] / [D * U] \quad (III.30)$$

Sachant que :

C : Capacité du parc de batteries [Ah]

E_n : Energie nécessaire = énergie consommée [Wh]

A : Autonomie de la batterie [Jours]

D : Limite de décharge profonde

U : Tension de fonctionnement du système [V]

D'après les conditions climatiques du site, le meilleur type de batterie c'est ; (Ni-Ca) Parce que sa marge de fonctionnement correspond à notre site (-5° +50°C)

▪ Calcul du nombre de batteries nécessaire

Le nombre de batteries à prévoir est donné par le rapport entre la tension choisie (tension sous laquelle fonctionnent les équipements du système) et la tension délivrée par une batterie. Ainsi, les batteries sont assemblées en série pour fournir la tension nécessaire.

III.7.7.7. Choix des câbles de connexions

Il est nécessaire de limiter la longueur des câbles électriques entre le générateur photovoltaïque et les récepteurs. Cette distance n'excède jamais quelques mètres.

En effet les systèmes solaires fonctionnent généralement sous faible tension (12V, 24V, 48V), donc ; avec un courant élevé ($P = U \times I$), Si U est faible, I est très élevé pour la même puissance). Le transport à distance de ce courant de plusieurs ampères provoque des pertes par effet joule aux niveaux des conducteurs.

III.7.7.8. Détermination de la section des câbles (panneaux –boitier)

Elle se fait en suivant les étapes suivantes :

- **Calcul du courant de sortie d'un panneau à sa puissance nominale I_s**

$$I_{ps} = PC_{ps} / U \tag{III.31}$$

- **Détermination de la section des conducteurs**

Soit ΔU_{max} , la chute de tension maximale entre panneaux – boîte de raccordement et R_{max} [Ω], la résistance maximale de la ligne ; la surface en [mm^2] du câble de résistivité ρ [$\Omega \cdot mm$] et de longueur L [mm] est donnée par :

$$S_{ps-boitier} = (\rho * L) / R_{max} \tag{III.32}$$

$$\Delta U = U * \Delta U_{max} \tag{III.33}$$

$$R_{max} = \Delta U / I_s \tag{III.34}$$

III.7.7.9. Détermination de la section des câbles boitier –régulateur

Elle s'effectue également en deux étapes, qui sont :

- **Calcul du courant circulant entre le boîtier et le régulateur I_{b-o}**

$$I_{b-o} = [N_{ps} * PC_{ps}] / U \tag{III.35}$$

- **Détermination de la section des conducteurs**

Pour une longueur L et une résistance R

$$S_{B-ol} = (\rho * 2 * L) / R \tag{III.36}$$

III.7.7.10. Détermination de la section des câbles régulateur-batterie

Calcul du courant circulant entre les batteries et le régulateur : $I_{o-b} = I_{maxB}$

Ce courant est calculé en supposant que la batterie débite à sa puissance nominale

$$I_{maxB} = \frac{P_{MaOndu}}{U} \tag{III.37}$$

$$S_{B-ol} = \frac{\rho^* L}{R} \quad (\text{III.41})$$

Ayant les relations et les données nécessaires, nous passons à la partie suivante qui consistera au dimensionnement du système de protection cathodique de l'oléoduc **OK1**.

III.8. Dimensionnement du système de protection cathodique de OK1

III.8.1. Les Caractéristiques

III.8.1.1. Caractéristiques de l'oléoduc OK1

- Longueur de la canalisation = 646 Km.
- Diamètre de la canalisation = 30''
- Epaisseur de la canalisation = 7.5 mm
- Nuance de l'acier de la canalisation : API 5L X70
- Type de revêtement : Polyéthylène tri-couche PEHD
- Résistivité électrique du matériau : 0.18 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
- Coefficient de vieillissement du revêtement : 0.124 an^{-1}
- Durée de vie de la protection : 25 ans
- Résistance d'isolement initial du revêtement : 20000 $\Omega \cdot \text{m}^2$
- Potentiel naturel du tube : 550 (-) mV
- Potentiel de protection Max : 1200 (-) mV
- Potentiel de protection Min : 850 (-) mV

III.8.1.2. Caractéristique de l'électrolyte (résistivité du sol)

Le relèvement des mesures de résistivité du sol a été effectué à chaque 250 m. Un total de 2584 mesures (points) a été effectué sur la totalité de la longueur de la trace 646 Km, qui est divisée en quatre sections :

Section 1 : SP1-SP2(190 km), $\rho_{sm}=150.00 \Omega.m$

Section 2 : SP2-SP3 (148 km), $\rho_{sm}=224.23 \Omega.m$

Section 3 : SP3-SP4 (93km), $\rho_{sm}=219.76 \Omega.m$

Section 4 : SP4-SKIKDA(215km), $\rho_{sm}=192.76 \Omega.m$

III.8.1.3. Généralités du système

- Irradiation moyenne : 7 KWh/m².jours
- Tension de fonctionnement : Tension du poste (normalisée)
- Chute de tensions maximale : 0.02 V
- Perte : (F) 20 %
- Distance panneau-boitier : 7 m
- Distance boîtier –régulateur : 10 m
- Distance batterie –régulateur : 4 m
- Temps de fonctionnement : 24 H/jours

III.8.2. Dimensionnement du système de protection

En utilisant la note de calcul exposée dans la première partie de ce chapitre et les données concernant la structure à protéger et les éléments de protection, j'effectue les calculs ci-après afin de dimensionner le système de protection.

III.8.2.1. Calcul de la résistivité moyenne du sol

En utilisant la relation (III.1) j'obtiens :

$$\rho_{sm} = 219 \Omega.m$$

III.8.2.2. Calcul de la résistance longitudinale du tube par unité de longueur

L'application de la relation (III.2), nous donne :

$$R_C = 1.21 * 10^{-5} \Omega/m$$

III.8.2.3. Résistance transitoire moyenne, "conduite-sol"

Par application de la relation (III.4) ; j'effectue le calcul suivant :

$$R_{tm} = 6.15 * 10^3 \Omega/m$$

III.8.2.4. Calcul de la résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la conduite à la fin et au début de l'exploitation

Elles s'obtiennent par application des formules (III.5) et (III.6) respectivement :

$$R_r(t) = 2.26 \cdot 10^3 \Omega \cdot m$$

$$R_r(0) = 7.37 \cdot 10^3 \Omega \cdot m$$

III.8.2.5. Calcul du coefficient d'atténuation

Il est déterminé par application de relation (III.7) :

$$\alpha = 7.31 \cdot 10^{-5}$$

III.8.2.6. Calcul de la résistance d'entrée de la conduite

En appliquant l'équation (III.8), j'obtiens :

$$Z = 0.08 \Omega \quad Z(0) = 0.149 \Omega$$

III.8.2.7. Calcul des gains de potentiel

Elles s'obtiennent en appliquant les relations (III.9) et (III.10) :

$$E_p \text{ max} = - 650 \text{ mV}$$

$$E_p \text{ min} = - 300 \text{ mV}$$

III.8.2.8. Calcul du coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins

D'après l'équation (III.112) , en optant pour $y = 300 \text{ m}$, j'ai :

$$K = 0.41$$

III.8.2.9. Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage

Par application de la relation (III.13), j'obtiens :

$$L_p = 21096.5 \text{ m}$$

III.8.2.10. Calcul du nombre de postes de protection cathodique

Le nombre de postes de soutirage doit être un entier, par conséquent au cas où le calcul nous donne un nombre décimal, j'arrondirai cette valeur à l'entier immédiatement supérieur. La formule (III.14), donne :

$$N_{ppc} = 4$$

Sachant le nombre de postes à prévoir pour la protection de ce gazoduc, la question qui se pose immédiatement est d'évaluer le courant débité par chaque poste.

III.8.2.11. Calcul de l'intensité du courant nécessaire au début et à la fin de l'exploitation

En appliquant respectivement les relations (III.15) et (III.116), j'obtiens :

$$I_{dr} = 5.26 \text{ A}$$

$$I_{dr}(0) = 2.82 \text{ A}$$

NB : On remarque que le courant en fin d'exploitation est relativement élevé par rapport à celui nécessaire en début d'exploitation ; cela est directement lié au revêtement. En effet en début d'exploitation le revêtement à toutes ces caractéristiques, donc il participe fortement à la protection, ce qui réduit l'impact de la protection active, mais au fil du temps le revêtement.

(La protection passive) perd de ses qualités, et donc il faut plus de courant pour assurer la protection de la structure.

III.8.2.12. Calcul du nombre d'anodes minimal pour la protection

Pour cette étude nous utiliserons Les anodes à courant imposé seront en alliage Ferro-Silicium additionné de Chrome appelé communément Ferro silicium (Fe-Cr-Si).

Tableau III.2: Composition chimique d'anodes Ferro silicium.

ELEMENT	%
Carbone	0.70 - 1,1
Silicium	14.25 -15.25
Magnésium	1.75
Cuivre	0,3 – 0.6
Molybdène	0,2
Chrome	3,5 - 5
Fer	Reste

- Dimension des anodes : 3''X60'' double tête
- Poids des anodes Fe-Si-Cr :49 à 52Kg
- Anodes en chapelets
- Chaque chapelet est composé de 4 anodes
- La consommation des anodes Ferro-silicium-chromé est de 0,3 Kg /Ampère. An.
- Densité de courant admissible est de 0,2 A/dm².
- Masses spécifique : 6,6 à 7 g / cm³
- Profondeur de pose :1.50 m

Le nombre d'anodes minimal nécessaire à la protection de la structure doit être un nombre entier. Il est donné par l'équation (III.17).

$$N_a = 16$$

III.8.2.13. Calcul de la résistance de terre du déversoir pour des anodes posées

▪ Calcul de la résistance de polarisation

L'application de la relation (III.19) nous donne :

$$R_{pol} = 0.49 \Omega$$

▪ calcul de la résistance du matériau des anodes

D'après l'équation (III.20), on a :

$$R_{ma} = 0.96 * 10^{-4} \Omega$$

▪ **Calcul de la résistance totale des anodes**

Pour la résistance du déversoir est d'après l'équation (III.21) :

$$R_{dev p} = 3.76 \Omega$$

Elle s'obtient par application des formules (III.18) :

$$R = 0.49 + 0.96 * 10^{-4} + 3.76$$

$$R = 4.25 \Omega$$

NB : En pratique, l'une des contraintes à laquelle doit satisfaire un dimensionnement de protection cathodique est que, la résistance de terre du déversoir soit la plus faible possible, réduisant ainsi la tension aux bornes du générateur ce qui implique une réduction du coût de l'installation du système de protection.

III.8.2.14. Calcul de la tension aux bornes du poste de soutirage

Selon la relation (III.23), la tension est donnée par :

$$U = 26.30 \text{ V}$$

III.8.2.15. Calcul de la puissance requise par le poste

D'après l'équation (III.25) j'ai :

$$P = 138.34 \text{ W}$$

Interprétation des résultats

Le résultat du dimensionnement d'un système de protection cathodique doit permettre de répondre à une série de question dont :

- ✚ Combien de postes de protection seraient nécessaire pour une protection certaine de la structure ?
- ✚ Quelle est l'intensité du courant maximal à délivrer par chaque poste en fin d'exploitation ?
- ✚ Quelle est le nombre minimal d'anodes par station de protection faut-il pour assurer la protection de la structure ?

- ✚ Existe-t-il des conditions spéciales, à certains endroits qui exigent des modifications dans le plan général de protection établis ?
- ✚ Les paramètres de dimensionnement déterminés précédemment sont-ils ceux qui nous assurent un minimum d'investissement ?

A ce stade du travail, sur la base d'une résistivité moyenne de 219 $\Omega.m$ et pour un puits d'anode posé à 300 m du pipeline, la protection contre la corrosion de l'oléoduc OK1 par la méthode de soutirage du courant nécessite 4 postes de soutirage pour section 3 (SP3-SP4). Chaque poste de protection, ayant une portée de 21.09 Km, débitant un courant en fin d'exploitation (25 ans) de 5.26 A et d'un puits profond constitué de 16 anodes en fer-silicium chrome, sous une puissance de 138.34 w. Toutefois, nous ne saurions apporter une réponse satisfaisante aux deux dernières questions sans passer par d'autres analyses (étude de sensibilité) et calculs, mais avant nous passons au dimensionnement du générateur solaire.

III.8.3. Dimensionnement Du Générateur Photovoltaïque

Avant de passer au dimensionnement du générateur photovoltaïque, il faudrait d'abord évaluer l'énergie consommée par la charge. Une fois que cette énergie est déterminée, j'évaluerai l'énergie que doit fournir le générateur en tenant compte des pertes.

Ensuite le nombre de panneaux ou modules solaire est définie par la puissance crête du générateur et enfin on déterminera les caractéristiques de la batterie et des câbles.

III.8.3.1. Estimation de l'énergie consommée

C'est l'énergie nécessaire dont le poste de soutirage à besoin pour assurer la protection du de l'oléoduc. Elle est donnée par la relation (III.26) :

$$E_n = 3320.18 \text{Wh/j}$$

III.8.3.2. Détermination de l'énergie fournir par le générateur

L'application de l'équation (III.27) nous donne :

$$E_f = 4150.23 \text{Wh/j}$$

III.8.3.3. Calcul de la puissance crête du générateur

Elle représente la puissance maximale que le générateur doit développer afin de répondre convenablement aux besoins de la charge, Selon la formule (III.28) :

$$P_{CG} = 592.89 \text{ W}_c$$

▪ Calcul et choix du régulateur de charge

Les critères de dimensionnement d'un régulateur sont :

- 1 : La puissance maximale du champ photovoltaïque doit être inférieure à la puissance nominale du régulateur $P_{\text{Régulateur}} = 1.25 * P_c$
- 2 : La tension à vide du champ photovoltaïque (majorée par le coefficient de sécurité de 20%) doit être inférieure à la tension maximale admissible par le régulateur.
- 3 : Le courant de sortie du champ photovoltaïque (majorée par le coefficient de sécurité de 20%) doit être inférieur au courant d'entrée du régulateur.
- 4 : Le régulateur doit être compatible avec la tension du parc de batteries.

$$P_{\text{Régulateur}} = 1.25 * P_{cG}$$

$$P_{\text{Régulateur}} = 1.25 * 592.89$$

$$P_{\text{Régulateur}} = 741.11 \text{ W}$$

Sur le marché, nous avons trouvé un régulateur MPPT de puissance 1000 W, 24V avec une tension maximale en circuit ouvert du champ PV : $V_{\text{reg}} = 90 \text{ V}$, qui supporte un courant de court-circuit égal à $I_{\text{reg}} = 60 \text{ A}$.

III.8.3.4. Détermination du nombre de modules solaires à installer

Connaissant la puissance maximale du générateur et celle d'un panneau ; on peut déterminer aisément le nombre de panneaux nécessaires comme suit :

Nous avons choisi les panneaux de puissance $P_{\text{pan}} = 75 \text{ W}$ avec une tension en circuit ouvert

$V_{oc} = 22.5 \text{ V}$ et un courant de court-circuit $I_{cc} = 4.28 \text{ A}$.

$$N_{ps} = 8 \text{ Panneaux}$$

Nous avons pu déterminer précédemment le nombre de panneaux, mais nous ne pouvons comment sont assemblés ces panneaux.

En effet pour une tension de fonctionnement du système fixée, on détermine le nombre de module en série comme suit :

$$N_p \text{ serie} = 4 \text{ Panneaux}$$

Le nombre de modules en série étant de quatre, on déduit que le système sera constitué de deux rangées de quatre modules chacune.

III.8.3.5. Calcul de la capacité des batteries

Nous avons choisi les batteries à GEL de capacité $C_b = 130 \text{ AH}$, de tension $V_b = 12\text{V}$ et 1200 cycles en décharge $D = 80\%$ et de rendement de $\eta_b = 90\%$.

La capacité totale du système de stockage :

D'après l'équation (III.30), on a :

$$C = 789.72 \text{ Ah}$$

Nombre total de batteries :

$$N_b = C/C_b = 789.72/130 \rightarrow N_b = 6.06 \approx 6 \text{ batteries}$$

Nombre de batteries raccordées en série $N_b(s)$:

$$N_b(s) = V_{\text{sys}}/V_b = 26.3/12 \rightarrow N_b(s) = 2.19 \approx 2 \text{ batteries}$$

Nombre de batteries raccordées en parallèle $N_b(p)$:

$$N_b(p) = N_b/N_b(s) = 6/2 = 3 \text{ batteries}$$

Nombre de batteries corrigées est :

$$N_b = N_b(s) * N_b(p) = 2 * 3$$

$$N_b = 6 \text{ batteries}$$

Donc le nombre de batteries nécessaires : $N = 6B$

III.8.3.6. Un hacheur boost pour élever la tension de système à la tension souhaitée

Nous allons utiliser un convertisseur DC-DC boost 900W, un régulateur élévateur de commande numérique V/C à sortie réglable, 8V-60V à 10V-120V avec un max. de 15A et une alimentation précise du convertisseur boost de commande avec affichage.

L'affichage à 4 chiffres peut montrer la tension, le courant, la puissance et la capacité en temps réel, et nous pouvons sélectionner tour à tour l'affichage automatique ou manuel. Cela nous permette d'élever la tension de 24 V vers 85 V.



Figure. III.5 : Convertisseur DC-DC boos.

III.8.3.7. Détermination de la section des câbles

- **Détermination de la section des câbles (panneaux –boitier)**

- a. **Calcul du courant de sortie d'un panneau à sa puissance nominale I_s**

D'après l'équation (III.31), on a : $I_s = 2.85 \text{ A}$

- b. **Détermination de la section des conducteurs**

Donc on prendra : $S = 1.5 \text{ mm}^2$

- **Détermination de la section des câbles (boitier –régulateur)**

- a. **Calcul du courant circulant entre le boîtier et le régulateur I_{b-o}**

D'après la relation (III.35), on a :

$$I_{b-o} = 22.81 \text{ A}$$

- b. **Détermination de la section des conducteurs**

Donc on prendra :

$$S = 10 \text{ mm}^2$$

- **Détermination de la section des câbles : régulateur-batterie**

D'après la relation (III.37), on a :

$$I_{\max B} = 64.63 \text{ A}$$

Donc on prendra :

$$S = 10 \text{ mm}^2$$

III.9. Etude technico-économique

III.9.1. Problématique

La protection cathodique des canalisations de transport des hydrocarbures par un courant imposé nécessite une tension maximum d'environ 150 V DC (courant continu).

Durant notre petit stage au niveau de la station SP3 OK1, nous avons su que des investissements considérables ont été mis en place et le sera encore, afin de garantir cette tension essentielle aux postes de protection cathodique.

Le problème est que la majorité des canalisations de transport des hydrocarbures se trouvent éloignées des réseaux électriques à de grandes distances ce qui augmente les coûts d'acheminement de l'électricité aux postes de protection, et nous citons dans notre cas d'étude qu'il y a un poste éloigné de la ligne HT de presque 34 KM. L'oléoduc Ok1 notre étude est protégé par deux techniques l'un est par un système de protection cathodique à courant imposé et la deuxième par le système galvanisé.

L'oléoduc comprend 30 postes de protection cathodique à courant imposé dans toute sa longueur dont l'électricité a été acheminée via les lignes HT Sonalgaz les plus proches sous la charge de sonatrach.

III.9.2 Objectif de l'étude

L'objectif de cet étude technico-économique est de présenter les coûts et les avantages et les inconvénients de l'alimentation électrique des postes de protection cathodique à travers le réseau HT Sonal gaz, et via l'énergie solaire.

III.9.3. Alimentation par réseau HT Sonal gaz

III.9.3.1. Equipements et installations nécessaires

Les installations nécessaires pour acheminer l'électricité de La ligne HT Sonal gaz jusqu'au poste de protection Cathodique.

- ✓ Support électrique,
- ✓ Câble électrique,
- ✓ Transformateur 30KV/400V, 100KVA
- ✓ Compteur,
- ✓ Disjoncteur

Les installations nécessaires au poste de protection cathodique :

- ✓ Transformateur redresseur avec réglage par variateur
- ✓ Coffret de contrôle du système anodique et pour le contrôle de défaut de potentiel, défaut de résistance de déversoir
- ✓ Déversoirs anodiques.

III.9.3.2. Coups des installations réseau Sonal gaz

A raison d'une moyenne approximative de 05 KM d'éloignement pour chaque poste nous essayons de donner des coûts et charges d'installations.

Tableau III.3 : Coups des installations réseau Sonal gaz.

Item	Désignation	Qté	Prix U (HT)	Total (HT)
01	Support électrique BS 106/66	180	100000.00	18000000.00
02	Câble électrique 3 ph	5KM	50.00	3000000.00
03	Transformateur 100 KVA	04	800000.00	3200000.00
04	Installation et pose			14000000,00
05	Transformateur redresseur	04	437917.00	1751668.00
06	Anodes FeSiCr	64	19239.79	1231346.56
07	IACM	04	340000.00	1360000.00
Total 4 postes				211023014.56DZD

III.9.3.3. Coûts d'exploitation des installations réseau Sonal gaz

Tableau III.4 : Coups d'exploitation des installations réseau Sonal gaz.

	Prix moyen Trim	Par An	Durant 25 an
Facture élect	6 000,00	24 000,00	600 000 ,00
Total 30 postes			180 000 000 ,00 DZD

III.9.3.4. Avantages et inconvénients de cette variante

Cette solution conventionnelle est adoptée afin d'assurer et garantir continuellement et sans cesse l'alimentation électrique aux postes de protection cathodique et sans système de secours pendant les coupures (Batteries).

Les inconvénients de cette solution sont :

- Coûts d'installations et de pose très élevées,
- Perturbation fréquente du réseau électrique,
- Coupures prolongées suite aux travaux d'entretien et intervention,
- Coupures accidentelles suites aux intempéries et fortes vents,
- Consommation de grandes espaces qui peuvent être utile à d'autre secteur comme celui de l'agriculture.

III.9.4. Alimentation par énergie solaire

III.9.4.1. Equipements et installations nécessaires

Les éléments qui constituent un système de protection cathodique par courant imposé avec appoint d'énergie solaire sont les suivants.

Un générateur photovoltaïque constitué des éléments suivants :

- Un ou des modules de cellules photovoltaïques,
- Un système de régulation,
- Un système de stockage (Batteries),
- Un onduleur pour les charges alternatives.

III.9.4.2. Coûts d'investissement système solaire

Tableau III.5 : Coûts d'investissement système solaire.

N	Elément	Marque	Quantité	Prix unitaire	Prix total
1	Panneaux Photovoltaïques	Sonde	32	12475.55	399217.60
2	Batteries	ULTRACELL	24	6575.45	157810.80
3	Anodes FeSiCr	Cosider	64	19239.79	1231346.56
4	Régulateur de charge solaire	MORNINGSTAR	4	157993.48	631973.92
5	Convertisseur DC-DC boost	ABB	4	4566.28	18265.12
6	Fusibles et porte fusibles de 6A	ENERGICAL	16	171.90	2734.40
7	Fil électrique 1.5 mm ²		56 m	50.65	2836.40
8	Fil électrique 10 mm ²		85 m	107.44	9132.40
					2453317.20
					DZD

III.9.4.3. Avantages et inconvénients de cette variante

Les avantages de cette solution sont de grande valeur et nous citons quelques-uns :

- La disponibilité et l'intensité de l'énergie solaire dans notre pays,
- L'évolution de la technologie et la robustesse du système solaire,
- Les faibles coûts d'installations,
- Les faibles coûts d'exploitation et d'entretien,
- L'occupation d'un espace faible,
- Une durée de vie des panneaux atteint plus de 25 ans

Le seul inconvénient et qui n'a pas une grande influence dans notre pays est les pertes d'énergie solaire prolongées pendant les intempéries et qui nécessite un système de grande autonomie à travers une série de batteries bien déterminés.

Interprétation

$$CTOT(c)/CTOT(p) = (211023014.56 + 2400\ 000,00) / 2453317.20 = 87$$

En conclusion après 25 ans de temps, l'Entreprise aura investi 87 fois plus que la solution proposée.

Conclusion

La protection cathodique par soutirage de courant est l'une des techniques les plus efficaces de lutte contre la corrosion des ouvrages enterrés. Ce mode de protection nécessite une source d'énergie électrique. Lorsque l'on dispose, à proximité, d'un réseau de distribution, le transfo-redresseur est d'usage. Le problème se pose en cas d'éloignement de tels réseaux des installations à protéger. Dans le cas de la protection d'ouvrages traversant des zones désertiques, l'utilisation de générateurs solaires s'impose.

Donc, l'étude approximative qu'on a faite montre clairement la rentabilité et la rationalité obtenue via l'utilisation des générateurs solaires.

CONCLUSION

***CONCLUSION
GÉNÉRALE***

Nous avons choisi de décortiquer les concepts de la corrosion et les moyens de lute contre ce phénomène qui a une grande importance et qui représente un grand souci chez les industriels, où nous avons dimensionné le système de protection cathodique à courant imposé, ainsi que leurs variantes d'alimentation en électricité.

L'objective de cet étude rentre dans le cadre de l'optimisation de la rentabilité des investissements et des installations industrielles et en particulier les canalisations enterrées, afin d'augmenter la durée de vie de ces dernières et garantir la continuité de la productivité avec les moindres coûts.

Et comme L'Algérie possède l'un des gisements solaires les plus élevés au monde avec une durée d'insolation de 2.000 à 3.900 heures par an, et une irradiation journalière de 3.000 à 6.000 Wh/M², soit l'équivalent de 10 fois la consommation mondiale, et que notre étude technico-économique a clairement montré les grosses pertes que subie l'entreprise Sonatrach transport des hydrocarbures par canalisation via l'alimentation électrique de ses postes de protection cathodique de la HT Sonalgaz, tel que :

- Grands montants pendant les réalisations des projets,
- Des factures d'abonnement et de consommation trimestrielles,
- Coupures et perturbations électriques continues,
- Effets négatifs sur l'économie nationale vue que Sonatrach et Sonalgaz sont des entreprises publiques à caractère social,

Et afin d'éviter ces pertes et promouvoir les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique nous recommandons l'installation des modules photovoltaïques pour les raisons suivants:

- Les faibles coûts d'installation,
- Les faibles coûts d'exploitation et d'entretien,
- La robustesse et la durée de vie qui peut dépasser les 25 ans,
- Installation des postes dans les endroits nécessaires sans considération aux HT Sonalgaz,
- Possibilité de transfert et de déplacement des équipements,

Nous envisageons également qu'il est de notre devoir en tant que future cadre de booster vers l'exploitation des énergies renouvelables dans tous les endroits où les conditions le permet et surtout comme notre cas d'étude où nous consacrons de gros installations, afin de produire une tension inférieure à 150 V en courant continu, alors qu'il est disponible via l'énergie solaire à moindre installation, coût et entretien.

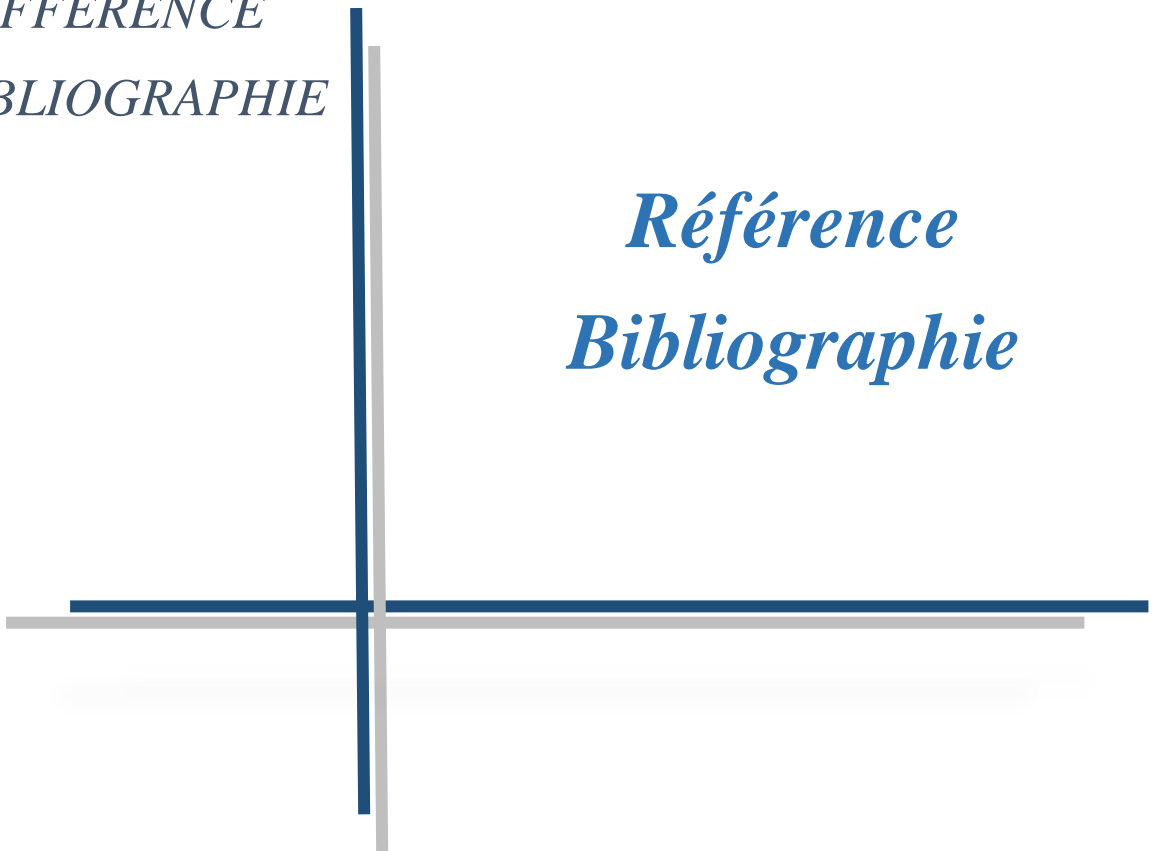
Et en fin, cette mémoire a enrichi nos connaissances dans ce vaste et important domaine et nous souhaitons qu'elle puisse être une source d'idées où de soutien aux lecteurs.

REFERENCE

BIBLIOGRAPHIE

Référence

Bibliographie



- [1] M. K. Amine, “Option : Spectrochimie et méthodes d’analyses,” 2013.
- [2] “Thème : Effets de la corrosion sur les installations gazières et leurs méthodes de protections . Cas de SH / HASSI R ’ MEL . Filière : Hygiène Sécurité Industriel Spécialité : Hygiène Sécurité Environnement Thème : Effets de la corrosion sur les installati”.
- [3] C. Mouats and L. Babouri, “République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l’Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique PRESENTE A L’UNIVERSITÉ DU 20 AOÛT 1955-SKIKDA Option : ELECTROCHIMIE-CORROSION Thème Devant le Jury composé de : MEMOIRE DE MAGISTER,” 2008.
- [4] D. Bouzidi, “©Tous droits réservés, Djamel Bouzidi, 2011,” 2011.
- [5] L. Messaoud, Z. Emna, and E. B. Ahmed, “République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l ’ enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique Université 20 Août 1955 Skikda Faculté de Technologique Département de Génie Mécanique présenté e n vue de l ’ obtention du diplôme de ,” 2018.
- [6] K. Ali, L. Figures, and L. Tableaux, “Présenté par : NEGGAZ Djamel Intitulé Optimisation des Méthodes de Réparation des Gazoducs Corrodés Année Universitaire : 2019 / 2020 Table des Matières Dédicaces Résumé,” 2020.
- [7] R. Draï, “C a b a,” 2003.
- [8] K. Clarisse, “Moyens de lutte contre la corrosion,” pp. 1–9.
- [9] M. Hélie, “Materiaux métalliques - phenomenes de corrosion,” *Cefracor*, 2002, [Online]. Available: [https://www.cefracor.org/fr/le-cefracor/la-](https://www.cefracor.org/fr/le-cefracor/la-corrosion/)
- [10] M. ROCHE, “L ’ Essentiel Sur La Protection Cathodique,” pp. 1–14, 2015.
- [11] Paul, S. 1990. «Minimizing Infrastructure Corrosion ». Technical Articles Providing Total Corrosion Control Solution. Peabody, Arland Wentworth. 1976. Control of Pipeline Corrosion. Houston, Tex: National Association of Corrosion Engineers, 190 p.
- [12] Barlo, Thomas J.and Berry, We. 1984. «An Assessment of The Current Criteria for Cathodic Protection of Buried Steel Pipelines». *Materials Performance: Corrosion Prevention and Control Worldwide Nace International*, vol. 23, no 9, p.9-16.

- [13] Anon, *Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems.*, vol. 22, no. 4. 1983.
- [14] NACE, “CP 3 – Cathodic Protection Technologist,” *NACE Int.*, no. January, p. 1:12, 2008.
- [15] shano, “Earth and Rock-Fill Dams -- General Design and Construction Considerations,” *Em 1110-2-2300*, no. July, p. 78, 1994.
- [16] N. Noor *et al.*, “Methodology for Soil-Corrosion Study of Underground Pipeline,” no. January 2016, 2010.
- [17] B. De Paul, R. Compléments, and F. D. Vansina, “Bibliographie de Paul Ricœur. Compléments (jusqu’en 1990),” pp. 243–288, 1990.
- [18] M. Kutz, *Handbook of Environmental Degradation of Materials*. 2005.
- [19] “BADORIS - Document de synthèse relatif à une barrière technique de sécurité (BTS) Protection cathodique Version 1.1 – janvier 2008,” pp. 1–41, 2008.
- [20] ADRAO, *Manuel du formateur*. 1995.
- [21] “Corrosion et protection,” *La Prat. des Ind. Mécaniques*, vol. 39, no. 2, pp. 52–53, 1956, doi: 10.1051/mattech/195639020052.
- [22] NACE International., “Standard recommended practice : design, installation, operation, and maintenance of impressed current deep groundbeds,” vol. 1, no. 281, p. 16, 2001.
- [23] H. Ahmad, “Corrosion and cathodic protection.,” pp. 1–10, 1990, doi: 10.1108/eb006714.
- [24] B. Flèche and D. Delagnes, “Production d ’ énergie électrique : Énergie électrique photovoltaïque.,” *Ebook, Cours Sti Elt, Juin 2007*, pp. 1–18, 2007, [Online]. Available: <http://www.livrespourtous.com/e-books/detail/Energie-solaire-photovoltaique/onecat/0.html>
- [25] A. Ricaud, “Systèmes photovoltaïques Polytech ’ Savoie 5eme année,” 2011.
- [26] S. Bus and A. Steca, “Steca Tarom 4545, 4545-48,” p. 4545.

- [27] A. Oury, “Accumulateurs au plomb-acide m ’ a circulation d ’ ’ electrolyte pour les applications iques et support des r ’ eseaux Etudes fondamentales et réacteurs innovants pour batteries redox à circulation de type « plomb soluble- acide méthanesulfonique »,” 2013.
- [28] S. Kharzi, M. Haddadi, and A. Malek, “Conception d’un dispositif de protection cathodique alimenté par énergie solaire photovoltaïque,” *Rev. des Energies Renouvelables*, no. January, pp. 199–206, 2007.