

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction mécanique

Thème :

RECHERCHE SUR LA PROTECTION CATHODIQUE DU PIPE DE DISTRIBUTION DE GAZ

Proposé et dirigé par :

Dr: FARSI Chouki

Présenté :

BENBOUGUERRA Fateh

KAHOUL Soufyane

BENBOUGUERRA Abdallah

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
BENARIOUA. Y	Prof.	Président
HOCINE.M	MCB	Examineur
FARSI.C	MCA	Encadreur

Année Universitaire : 2022 / 2023

N° d'ordre : GM/...../2023



Remerciements

Je dois remercier en premier celui qui ma donné la vie, et me prend en soin à chaque instant, **ELLAH**, le Clément de m'avoir donné la foi et le courage pour terminer ce travail.

Je tiens à remercier vivement:

Monsieur tous les enseignants du département de génie mécanique a l'université de Mohamed Boudiaf Msila .

Un grand merci à Monsieur Dr : **FARSI chaouki** pour m'avoir conseillé et orienté tout au long de l'élaboration de mon étude.

Mes remerciements vont aussi aux messieurs **les membres du jury** d'avoir pris le temps et le soin de lire ce mémoire.

Mes remerciements vont également à tous les enseignants qui ont participé à notre formation et l'aide qu'ils nous ont fournie pendant la période d'étude.

Je réservons nos remerciements les plus chaleureux à ma famille.

Rien n'aurait été possible sans le soutien de nos parents, mes sœurs et nos frère, leurs appui qui nous ont aidés beaucoup à tenir jusqu'au bout ce travail.

Merci infiniment a tous.

A decorative scroll with a graduation cap and a ribbon. The scroll is light beige with a dark brown border. At the top left, there is a dark brown graduation cap with a gold tassel. At the top right, there is a gold ribbon. At the bottom right, there is a gold ribbon with a large, circular, scalloped-edged award medal. The background is a light beige color with a subtle pattern of faint, repeating geometric shapes.

Dédicaces

À ma chère mère et mon père qui m'ont guidé dans les moments les plus importants de ce long voyage, à ma mère qui a été à mes côtés et m'a soutenu toute ma vie, et à mon père qui a donné toute sa vie pour moi, merci beaucoup mon père.

Et mes frères et sœurs, toute la famille, ma fille Retaj et mon fils Muhammad Al-Amin.

A tous ceux qui m'ont aidé à poursuivre mes études.

A tous mes amis : Massoud, Adel, Abdel Hamid et Nabil.

À tous mes collègues masters en génie mécanique avec spécialisation en construction mécanique 2022-2023

KAHOUL SOUFYANE

A decorative scroll with a graduation cap and a ribbon. The scroll is light beige with a dark brown border. At the top left, there is a dark brown graduation cap with a gold tassel. At the top right, there is a gold ribbon. At the bottom right, there is a gold ribbon with a large, circular, scalloped-edged medallion. The background is a light beige color with a subtle pattern of faint, repeating geometric shapes.

Dédicaces

À ma chère mère et mon père qui m'ont guidé dans les moments les plus importants de ce long voyage, à ma mère qui a été à mes côtés et m'a soutenu toute ma vie, et à mon père qui a donné toute sa vie pour moi, merci beaucoup mon père.

Et mes frères et sœurs, toute la famille, ma fille kawther et mon fils youcef.

A tous ceux qui m'ont aidé à poursuivre mes études.

A tous mes amis : Massoud, Abdel Hamid et Nabil.

À tous mes collègues masters en génie mécanique avec spécialisation en construction mécanique 2022-2023

BENBOUGUERRA ABDELLAH



Dédicaces

À ma chère mère et mon père qui m'ont guidé dans les moments

les plus importants de ce long voyage, à ma mère qui a été à mes côtés et m'a soutenu toute ma vie, et à mon père qui a donné toute sa vie pour moi, merci beaucoup mon père.

Et mes frères et sœurs, toute la famille, mon fille Ayoub et mon fils Anas.

A tous ceux qui m'ont aidé à poursuivre mes études.

A tous mes amis.

À tous mes collègues masters en génie mécanique avec spécialisation en construction mécanique 2022-2023

BENBOUGUERRA FATEH

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Influence de différents facteurs sur la corrosion des métaux	06
Tableau I.2. Taux de corrosion pour différentes valeurs de pH des sols.....	08
Tableau I.3. Classification de la tenue en corrosion en fonction du taux de corrosion	09
Tableau II.1. Formes et dimensions des anodes.....	24
Tableau II.2. Propriétés et milieu d'utilisation des déversoirs	25
Tableau II.3. Electrodes de référence	27
Tableau II.4. Comparaison des éléments de systèmes P.C.....	29
Tableau III.1. Degré d'agressivité du sol en fonction de la résistivité	35
Tableau III.2. Corrosivité du sol selon la résistivité.....	36
Tableau III.3. Pondération des paramètres caractérisant la corrosivité du sol	37
Tableau III.4. Exemples chiffrés de résistivités.....	41
Tableau III.5. Méthodes de mesures indirectes de l'humidité... ..	43
Tableau IV.1. Caractéristiques électrochimiques de l'anode de zinc.....	53
Tableau IV.2. Caractéristiques électrochimiques de l'anode de magnésium.....	53
Tableau IV.3. Caractéristiques électrochimiques de l'anode de d'aluminium.....	54
Tableau IV.4. Formule de la résistance anodique	56
Tableau IV.5. les sections de câble normalisées à utiliser en fonction de l'intensité.....	57
Tableau IV.6. Résistivité de certains bons conducteurs	59
Tableau IV.7. Récapitulatif Des Différents Contrôles	61
Tableau IV.8.: Caractéristique du gazoduc	68
Tableau IV.9.: Caractéristiques anodes zinc (type 7Z nue).....	68
Tableau IV.10.: Influence de « y » sur le système de protection (Anodes ZINC) («y» variable « psm : 400 Ω. m » constante)	74
Tableau IV.11. : Influence de « psm » sur le système de protection (Anodes ZINC) (« y = 170» constante « psm (Ω. m) » variable).....	75
Tableau IV.12.: Influence de « y » sur le système de protection (Anodes Magn)	78
Tableau IV.13.: Influence de « y » sur le système de protection (Anodes Alum).....	78

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1. la corrosion uniforme	02
Figure I.2 Corrosion localisée.....	03
Figure I. 3. corrosion par piqûres	04
Figure I.4 Corrosion Caverneuse.....	04
Figure I. 5. Corrosion inter granulaire d'un acier inoxydable.....	05
Figure I.6 Corrosion galvanique... ..	05
Figure I.7 Corrosion filiforme sur un échantillon d'aluminium peint et scarifié.....	06
Figure II.1. Revêtement d'un tube.....	14
Figure II.2 La protection par anode galvanique et courant imposé.....	18
Figure II.3. Protection cathodique appliquée à une structure	18
Figure II.4 Polarisation d'une structure	19
Figure II.5. Principes de la protection par anodes galvaniques (sacrificielles)	22
Figure II.6 Soudage des câbles de raccordement.....	22
Figure II.7 Principe de la protection par courant imposé.....	23
Figure II.8 Déversoir anodique posé verticalement	26
Figure II.9 Déversoir anodique posé horizontalement	26
Figure II.10 Joint isolant monobloc	28
Figure II.11 Choix du système de protection cathodique.....	30
Figure III.1. Principe de fonctionnement de la méthode de Wenner.....	39
Figure III.2. Testeur de résistance de terre GEOHM	40
Figure III.3. Matériels pour la mesure du pH	42
Figure IV.1 .Variation du potentiel de protection le long d'une conduite	48
Figure IV.2 .Principes de la protection par anodes réactive	50
Figure IV.3. Principes de la protection par anodes sacrificielle.....	51
Figure IV.4 .Le principe de la soudure aluminothermique.....	58
Figure IV.5. Principes de Mesure Du Potentiel ON/OFF.....	6

Figure IV.6 Méthode de Mesure du potentiel des Fourreaux Métalliques.....	64
Figure IV.7 Méthode de Mesure du potentiel au point d'isolement.....	64
Figure IV.8 Méthode de Mesure du potentiel de la anode réactive.....	65
Figure IV.9 Méthode de Mesure la Tension De Sortie De Transfo-Redresseur.....	65
Figure IV.10 Méthode de Mesure du l'intensite	66
Figure IV.11 Méthode de Mesure du l'intensité (shunt)	66
Figure IV.12. Courbe de variation du nombre de postes en fonction de "y"	75
Figure IV.13. courbe de variation du nombre de postes en fonction de la résistivité du sol....	75
Figure IV.14. Courbe de variation du nombre de Anodes en fonction de "y"	76
Figure IV.15. Courbe de variation du nombre d'anodes pour la résistivité du sol	76
Figure IV.16 Courbe de variation de la puissance des postes en fonction de "y" sur (PH.Pv) 76	76
Figure IV.17. Courbe de la Influence de la résistivité du sol sur valeur de (PH.Pv).....	76
Figure IV.18. Courbe de la Influence de la "y" sur (Idr)	77
Figure IV.19. Courbe de la Influence de la résistivité du sol sur valeur de (Idr).....	77
Figure IV.20. Courbe de la Influence de la "y" sur résistance totale des anodes sur (RtotH.V)77	77
Figure IV.21. Courbe de la Influence de la résistivité du sol sur valeur (Rtot H .V)	77

LISTE DES SYMBOLES

LISTE DES SYMBOLES

symbol	Signification	unite
ρ_{sm}	résistivité moyenne du sol	$\Omega.m$
l_i, ρ_i	longueur du tronçon i correspondant à la résistivité	$\Omega.m$
N_{ppc}	nombre de postes de protection cathodique	nombre
L_p	la longueur de protection d'un poste de soutirage	km
α	Constante de distribution du potentiel le long de la conduite	1/an
R_c	Résistance longitudinale de la conduite par unité de longueur	$\Omega.m$
R_r	Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la conduite	$\Omega.m$
n	nombre de tronçon	nombre
ρ_c	résistivité électrique du matériau de la structure	$\Omega.m^2/m$
ϕ_{ext}	diameter exterior de la structure	mm
ϕ_{ext}	diamètre extérieur de la structure	mm
R_{tm}	Resistance transitoire « conduite-sol »	$\Omega.m^2$
δ	épaisseur moyen de la conduite	mm
β	Coefficient de vieillissement du matériau de la conduite	1/an
t	durée d'exploitation du système de protection	ans
R_{ti}	résistance initiale d'isolement du revêtement	$\Omega.m^2$
Z	Résistance d'entrée d'une conduite revêtue	Ω
k	Coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins	
E_{pmax}	potentiels de protection	V
E_{pmin}	potentiels de protection	V
I_{dr}	de l'intensité du courant nécessaire au début et à la fin de l'exploit	A
m_a	Consommation massique d'anode	kg
M_a	la masse d'une anode	kg
I_s	Courant de protection	A
N_a	nombre d'anodes minimal pour la protection	Ω
DDC	densité de courant(0,3)	mA/m ²
μ	coefficient d'utilisation de l'anode	
R_{pol}	résistance de polarisation	Ω
U_a	composante de polarisation de la chute de tension des anodes	V
R_{ma}	résistance du matériau des anodes	Ω
R_{aH}	résistance totale des anodes posées horizontalement	Ω
l_a	longueur de l'anode	m
d_a	diamètre de l'anode	m
E_a	espace en deux anodes consecutives	m
R_{ps}	résistance due à la protection passive	Ω
R	résistance de terre du déversoir	Ω
U	tension aux bornes du poste de soutirage	V
P	puissance requise par le poste	W
U_{max}	Tension de protection requise	V

LISTE DES SOMMAIRE

SOMMAIRE

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des symboles	
Résumé.	
Introduction générale.	

CHAPITRE 01 : GENERALITES SUR LA CORROSION

Généralités	01
Définition de la corrosion	02
Différents types de corrosion	02
Corrosion uniforme.....	02
I.3.2 Corrosion localisée	03
Corrosion par piquûre	03
Corrosion caverneuse.....	04
I.3.5 .Corrosion inter granulaire	04
I.3.6. Corrosion galvanique	05
I.3.7 .Corrosion filiforme	05
Facteurs de la corrosion	06
Corrosion atmosphérique	07
Corrosion par les sols	07
Vitesse de corrosion	08
La Protection contre la corrosion	09
Protection Electrochimique.....	10
La protection cathodique	10
la protection anodique.....	10
Protection par revêtements.....	10
Les b inhibiteur de corrosion	11
Conclusion	11

CHAPITRE 02 : SYSTEMES DE LA PROTECTION CATHODIQUE

Généralités	12
Histoire de la protection cathodique (PC).....	13
Prévention de la corrosion des conduites souterraines	13
Moyens techniques appliqués contre la corrosion.....	14
Protection par revêtement (passive)	14
Procédés de protection	15
Premier principe	15
Deuxième principe	15
Choix de revêtement	15
Types de revêtement.....	16
Les différents types de revêtements.....	16
Revêtements à base de produits hydrocarbonés	16
Revêtements thermoplastiques	16
Revêtements à base de produits thermodurcissables	16
Perte d'adhérence des revêtements.....	16

Protection par inhibiteur de corrosion.....	16
Protection cathodique (Protection active).....	17
Historique.....	17
Principe de la protection cathodique.....	17
Conception de la protection cathodique	18
Polarisation d'une structure.....	19
Critères de la protection cathodique	19
Facteurs affectant la validité des critères.....	20
Type de protection cathodique.....	21
Protection par anodes galvaniques (sacrificielles).....	21
Choix des anodes galvaniques (sacrificielles).....	22
Câblage de système anode galvanique.....	22
Applications des systèmes d'anodes galvaniques	23
Protection par courant imposé.....	23
Principes de la protection par courant imposé	23
Applications de la protection cathodique par courant imposé.....	24
Installation d'un poste de protection cathodique à courant imposé.....	24
Générateur de courant continu et ces caractéristiques	24
Déversoir anodique et leurs implantations.....	24
Électrodes de référence	27
Câbles de liaison.....	27
Avantages et inconvénients des systèmes de la protection cathodique	28
Choix du système de protection cathodique	30
Facteurs affectant la protection cathodique.....	30
Insuffisance de continuité électrique	31
Influence des courants vagabonds	31
Influence des structures adjacentes.....	31
Conclusion	32

CHAPITRE 03: MATERIELS ET METHODES DE CALCUL DU SOL

Généralités	33
Le sol.....	33
Propriétés physiques des sols.....	34
Propriétés chimiques des sols	34
Classification des sols.....	34
Agressivité du sol.....	35
Méthode d'évaluation de l'agressivité du sol	35
Paramètres déterminant l'agressivité du sol.....	36
Méthodes de mesure de la résistivité du sol.....	38
Calcul de la résistivité.....	40
PH de sol.....	41
L'humidité du sol	42
Validité des mesures de la résistivité du sol	43
Facteurs affectant la résistivité du sol	43

III .10.Conclusion

CHAPITRE 04 : ETUDE ET CALCUL DE PROTECTION CATHODIQUE

IV.1.Généralités.....	45
Les principaux composants de la protection cathodique	46

Poste de soutirage (Transfo-redresseur)	46
Détermination du nombre de postes de soutirage	46
Résistance d'entrée d'une conduite revêtue (Z).....	46
Valeurs des potentiels	46
Coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins (K)	48
Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage (Lp).....	48
Calcul du nombre de postes de protection cathodique (Nppc).....	49
Calcul de l'intensité du courant de drainage (Idr).....	49
L'anode réactive et sacrificielle	49
Anode réactive	49
Installation des anodes avec prise de potentiel	50
IV.2.2.1.2 Avantages et inconvénients des anodes à courant imposé.....	50
Anode sacrificielle	50
Principe 50	
Durée de vie.....	51
Avantages d'application des anodes sacrificielles.....	52
Inconvénients d'application des anodes sacrificielles	52
Choix du déversoir ou masse anodique.....	52
Différents types d'anodes.....	52
Consommation massique d'anode.....	54
IV.2.2.5. Calcul du nombre minimal d'anode	55
IV.2.2.7. Calcul de la résistance anodique.....	56
Les câble de connexion	57
Méthodes de soudage des fils sur le tube	58
Procédé aluminothermique	58
Soudobrasage du câble sur une plaquette acier soudée sur tube	58
Cosse à sertir	59
La résistance d'un résisteur.....	59
Entretien des installations de protection cathodique (Contrôle et Mesure)	60
Des contrôle	60
Contrôle des prises de potentiel.....	60
Contrôle des raccords isolants	60
Contrôle de la continuité électrique.....	61
Contrôle d'isolement tube-fourreau et ouvrage d'art.....	61
Contrôle des anodes réactives.....	61
Contrôle des postes de soutirage (P.S).....	61
Contrôle des postes de drainage (P.S).....	61
Mesures.....	62
Mesure du potentiel	62
Mesure du potentiel des canalisations	63
Mesure du potentiel des Fourreaux Métalliques	64
Mesure du potentiel au point d'isolement	64
Mesure du potentiel de l'anode réactive.....	65
Mesure la Tension De Sortie De Transfo-Redresseur	65
Problème	67
Conclusion	79

Conclusion générale.

Références bibliographique .

المخلص

أصيح رذِّسِ أَلْبَابِ رَحَدِ أَلْسُنِ شِجَتِ ظَبُّشِ اَزْأَكَمِ يَصْدَسِ لَهَكِ يَزْفِرَا ذُ
نَمَطَبْكَدِ اَصْبُكْغِ اَنْجِوَاغِ نَ اَزْدَلِ اَنْزَمْذِيخِ. نَ اِنِالْغِ ، نَوُ اِضْبُذِ
اَسِوُغِ نَ كَذدِ اَلْمَطَبْكَدِ

اَزْأَ رَحْدَسِ نَ شِجْكَبِدِ اِيْذَادَادِ اِنْغِصِ اِنْطِجْكَدِ اِيْضَا اِيْضَا اِنْزُوْغِ اِنْبِوَاغِ اَزْأَ رُزْجِ
كُتَبِ

نَ اَلْصَمِ اِنْجِشِ كُتَبِ رَمِ اِنْجِشِ اِيْضَا اِنْجِشِ اِنْزَمِ اِيْضَا

اِنْبِوَاغِ اِنْجِشِ اِيْضَا اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ

اِنْغِصِ اِنْطِجْكَدِ اِيْضَا اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ

رذِّسِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ

اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ

اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ

اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ

اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ

اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ

اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ

اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ

اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ

اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ

اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ

اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ

اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ

اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ

اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ اِنْجِشِ

Résumé

La détérioration des canalisations souterraines due au phénomène de corrosion est devenue une préoccupation croissante pour les secteurs industriels et environnementaux des pays développés. En effet, l'augmentation annuelle du nombre d'indisponibilités sur les réseaux de distribution de gaz naturel et les énormes budgets de réhabilitation qui en découlent sont à l'origine de la recherche de technologies innovantes en termes d'évaluation et de prévention des dommages dus à la corrosion.

Les tuyaux utilisés dans le système de distribution de gaz naturel sont principalement en acier. La détérioration de ce type de tubes métalliques a reçu beaucoup d'attention de la part des ingénieurs. Dans ce contexte, il est évident que l'absence d'avis cohérent sur les performances en service de ces réseaux continue de remettre en cause les causes plausibles de défaillance, la résistance à la corrosion et les méthodes fiables de prévention de la corrosion. En conséquence, nous avons proposé ce sujet de recherche, dont l'objectif principal est de connaître les causes conduisant à la corrosion de ces conduites et les systèmes de protection utilisés pour protéger les conduites de transport de gaz naturel de la corrosion avec une étude et une connaissance de la résistance et paramètres du sol entourant le tuyau, et à la fin une étude approfondie avec le calcul et l'analyse du temps des séparateurs de la série et l'évaluation du système de protection cathodique le cas échéant. Les corrélations identifiées entre les paramètres qui composent ce modèle ont permis d'effectuer une inspection directe des conduites aux endroits considérés à risque afin d'évaluer l'activité de corrosion développée sur les surfaces extérieures des conduites de gaz naturel. De plus, l'ensemble de données recueillies permet le calcul du nombre d'anodes utilisées et poste soutirage le long du chemin de transport du gaz naturel à travers des tuyaux en acier afin de maximiser le taux de corrosion.

Mots clés : - Protection cathodique - Corrosion - Résistance des sols - acier – poste soutirage

Abstract

The détérioration of underground pipelines due to the phenomenon of corrosion has become a growing concern for the industrial and environmental sectors of developed countries. Indeed, the annual increase in the number of outages on the natural gas distribution networks and the huge rehabilitation budgets that result from it are at the origin of the search for innovative technologies in terms of damage assessment and prevention. due to corrosion.

The pipes used in the natural gas distribution system are mostly made of steel. The deterioration of this type of metal tubing has received much attention from engineers. In this context, it is evident that the lack of consistent advice on the in-service performance of these networks continues to call into question plausible causes of failure, corrosion resistance and reliable methods of corrosion prevention. As a result, we have proposed this research topic, the main objective of which is to know the causes leading to the corrosion of these pipes and the protection systems used to protect natural gas transmission pipes from corrosion with a study and a knowledge of the resistance and parameters of the ground surrounding the pipe, and at the end an in-depth study with the calculation and analysis of the time of the separators of the series and the evaluation of the cathodic protection system if necessary. The correlations identified between the parameters that make up this model made it possible to carry out a direct inspection of the pipes at the places considered to be at risk in order to evaluate the corrosion activity developed on the exterior surfaces of the natural gas pipes.

Collected data set allows the calculation of the number of anodes used and station draw-off along the natural gas transportation path through steel pipes to maximize the corrosion rate.

Keywords: - Cathodic protection - Corrosion - Soil resistance - steel - racking station

Introduction générale

Le gaz naturel est transporté et distribué aux consommateurs par des conduits en acier, Un réseau de canalisation sur plusieurs kilomètres a été construit à travers le monde. En Algérie on estime ce réseau à plus de 500000 Kms tout diamètre confondu et exploité par la société distribution gaz.

La majorité des conduites enterrées utilisées pour acheminer le gaz de leurs sources émettrices vers les consommateurs sont fabriquées en aciers tel que le PE. La plupart de ces aciers se trouvent, à l'état naturel, sous forme de minerais (oxydes). Lorsqu'on enterre ces conduites dans un sol agressif, elles s'oxydent et se dégradent tendant ainsi à retourner à son état naturel (oxydes).

La quantité d'acier détruite chaque année par les phénomènes de corrosion est estimée à un quart de la production mondiale annuelle de fer. Les évaluations du coût des dégâts directs et indirects causés par la corrosion est tres important. Ce coût comprend les pertes en métal, les frais d'entretien et de réparation, le coût des études et de la protection. ce qui est considérable et reflète l'importance du problème.

Pour combattre ce phénomène (la corrosion), il existe plusieurs types de traitement anticorrosion pour protéger les canalisations du milieu corrosif. Le revêtement est le plus utilisé en raison de son double rôle : sa facilité d'application et le pouvoir de séparer le métal du milieu dans lequel il est placé. Cette protection n'est cependant pas totalement efficace car l'expérience a montré que les défauts de revêtements constatés sont dus aux arrachements ponctuels du film de revêtement durant la pose et le remblaiement de la conduite.

Vu les inconvénients de la protection par revêtement, la protection cathodique est incontournable pour suppléer la protection de la conduite. Elle consiste à amener l'ensemble de la surface de l'acier exposé au milieu environnant à un potentiel suffisamment « Électronégatif » pour le placer en situation de corrosion pratiquement négligeable.

Il existe deux techniques pour abaisser ce potentiel, la première consiste à établir une liaison électrique entre la structure à protéger et une masse métallique moins noble qui va se corroder préférentiellement. Ce procédé se limite à la protection des ouvrages à courte distance, cette protection est dite protection cathodique par anode sacrificielle. La seconde consiste à utiliser un générateur qui débite un courant continu entre la canalisation et une électrode auxiliaire
Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre,; nous avons présenté quelques aspects théoriques et généralités sur la corrosion .
- Le second chapitre est consacré au les systèmes de la protection cathodique.
- Le chapitre trois présente les matériels et méthodes de calcul du sol.
- Le chapitre quatre présente la étude et calcul de protection cathodique

Le mémoire se termine par une conclusion générale et des perspectives

CHAPITRE I :

GENERALITES SUR LA CORROSION

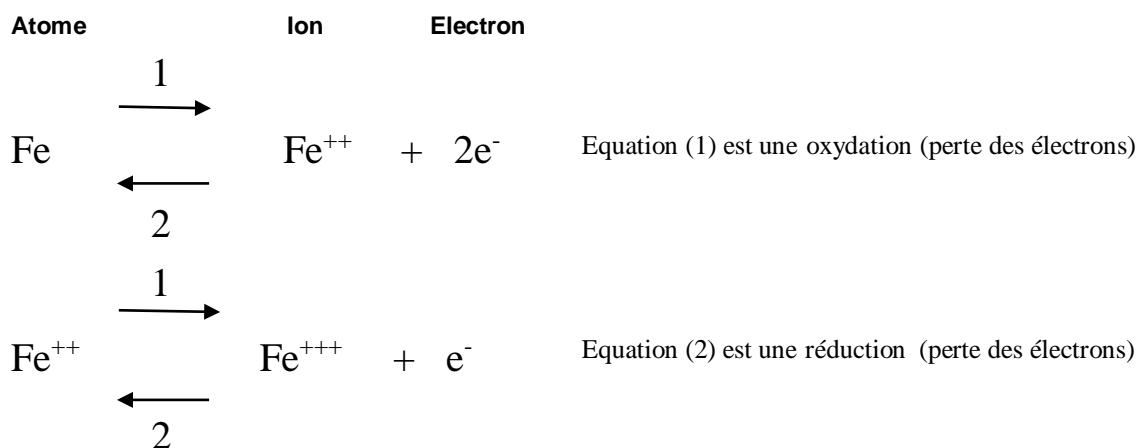
I.1- Généralités:

La matière est constituée d'atomes comprenant un noyau porteur de charges positives, entouré d'un nuage d'électrons. Les charges négatives et positives sont équilibrées électriquement.

Le sol est un milieu complexe comportant des sels minéraux ou organiques (humus par exemple), parfois des acides ou des bases libres, même des gaz comme l'oxygène par exemple, et, surtout, de l'eau qui, neutre par elle-même, dissout tous les produits précédemment cités et en facilite l'ionisation pour constituer un milieu conducteur qu'on appelle électrolyte.

Les atomes de métal, de par la répartition des électrons sur les orbites autour du noyau, ont tendance à perdre les électrons les plus éloignés du noyau. Lorsque le métal est isolé, ce phénomène donne lieu à une agitation interne des électrons, mais l'ensemble reste neutre par équilibre statistique.

Lorsqu'il est plongé dans une solution (milieu conducteur dit électrolyte), les ions positifs du métal ont tendance à passer dans la solution, mais, en même temps, la densité d'électrons s'accroît en surface du métal en exerçant ainsi un freinage à ce départ en solution des ions positifs. Ce phénomène correspond à ce qu'on appelle la couche double. Pour le fer par exemple, ce phénomène s'écrit théoriquement de la façon suivante :



Les ions fer vont pouvoir entrer dans la solution, en combinaison avec des ions négatifs de celle-ci, pour former des hydrates (rouille par exemple) ou des sels; les électrons peuvent neutraliser des ions positifs de la solution et dans ce cas la réaction se poursuit dans le sens 1.

Lorsque la réaction a tendance à se déplacer dans le sens 1, on dit qu'il s'agit d'une oxydation. Lorsqu'elle s'établit dans l'autre sens, c'est une réduction.

Un métal plongé dans un électrolyte prend un certain potentiel. Si deux métaux différents sont plongés dans un même électrolyte, ils prennent un potentiel différent et, si on les lie électriquement, un courant circule.

Le courant passe dans le conducteur qui ferme le circuit, du potentiel le plus élevé au potentiel le moins élevé, mais, dans l'électrolyte, c'est l'inverse.

Comme les électrons ne circulent pas dans l'électrolyte, ce sont les ions qui assurent dans celui-ci le transfert équivalent des charges électriques.

Par exemple, si une canalisation de cuivre et une canalisation d'acier, voisines dans le sol, sont reliées électriquement, le potentiel de la première étant supérieur à celui de la deuxième, il y aura départ d'ions ferreux ou ferriques donc corrosion du fer. Il est à noter que la liaison électrique peut être effectuée au sein de l'électrolyte. [1].

Définition de la corrosion:

La corrosion est un phénomène de dégradation des métaux qui se produit sous l'effet des réactions chimiques, électrochimiques et électrolytique, lorsqu'ils sont en contact avec le milieu environnant (ambient). Elle est due à la tendance des métaux à se transformer en composés chimiques nouveaux vers un état physique de plus en plus stable (minerai, sel oxyde, etc...). [1].

Différents types de corrosion:

Dans les paragraphes suivants, nous présentons un bref aperçu sur les différents types de corrosion auxquels sont sujets les matériaux métalliques lorsqu'ils sont en contacts d'environnements agressifs.

Corrosion uniforme:

La corrosion uniforme est la plus courante ; elle se produit d'une manière uniforme sur toute la surface du métal. En présence d'un moteur de corrosion, le métal subit une dissolution; Autrement dit, une perte de matière [2].

La corrosion uniforme attaque toute la surface du métal [3]

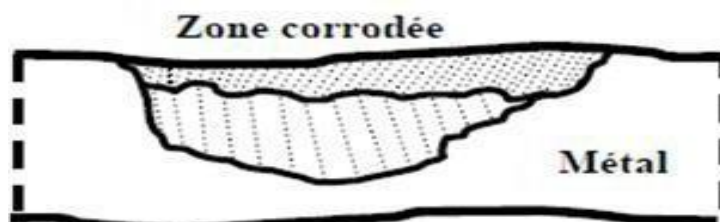


Figure I. 1. la corrosion uniforme [3]

Corrosion localisée:

Contrairement à la corrosion uniforme, le matériau se corrode localement. Autrement dit, certaines parties de la surface du métal sont plus actives que les autres. Ce type de corrosion est dû à l'hétérogénéité du matériau ou bien à une modification de la concentration locale [4].

On peut classer les phénomènes de corrosion localisée observés en six catégories principales [5].

- La corrosion sous contrainte.
- La corrosion par piqûres.
- La corrosion caverneuse.
- La corrosion inter granulaire.
- La corrosion galvanique.
- La corrosion érosion.

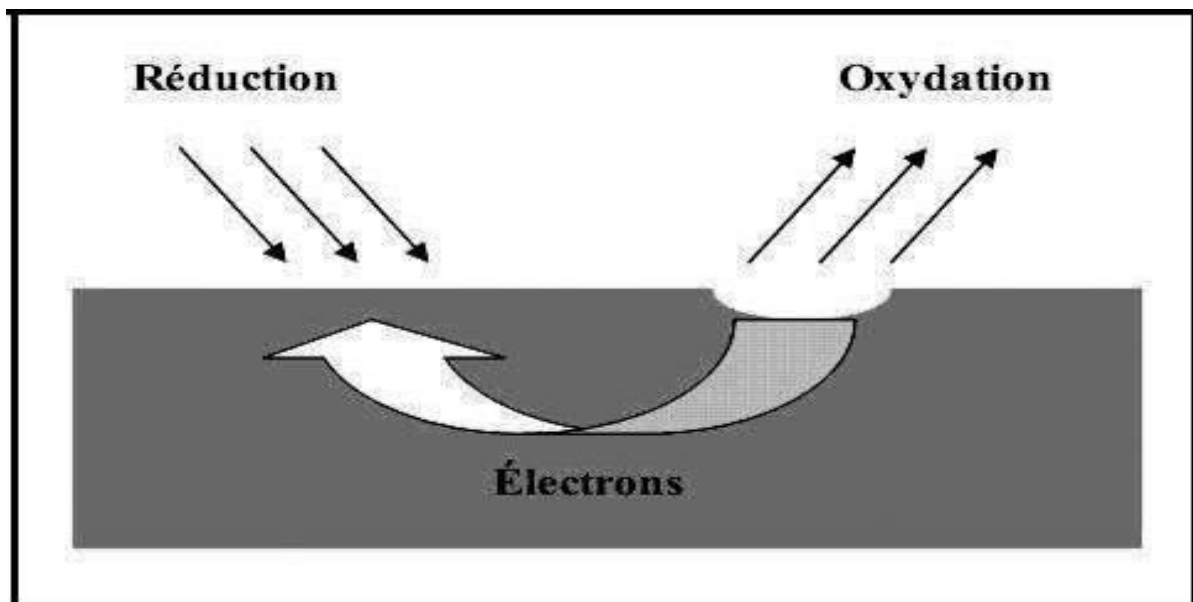


Figure I.2 Corrosion localisée

Corrosion par piqûre:

La corrosion par piqûres est une attaque très localisée du métal qui résulte des conditions de corrosion locales spécifiques. La piqûre constitue ainsi une anode, le reste de la surface joue le rôle de cathode. La petite surface de l'anode et la grande surface de la cathode provoque un courant de forte intensité du côté anode et ainsi une vitesse de corrosion élevée.

En fait, ce type de corrosion apparaît particulièrement sur les métaux et alliages qui peuvent être passivés comme l'acier inox, l'aluminium exposés à un environnement aqueux chloruré [6].

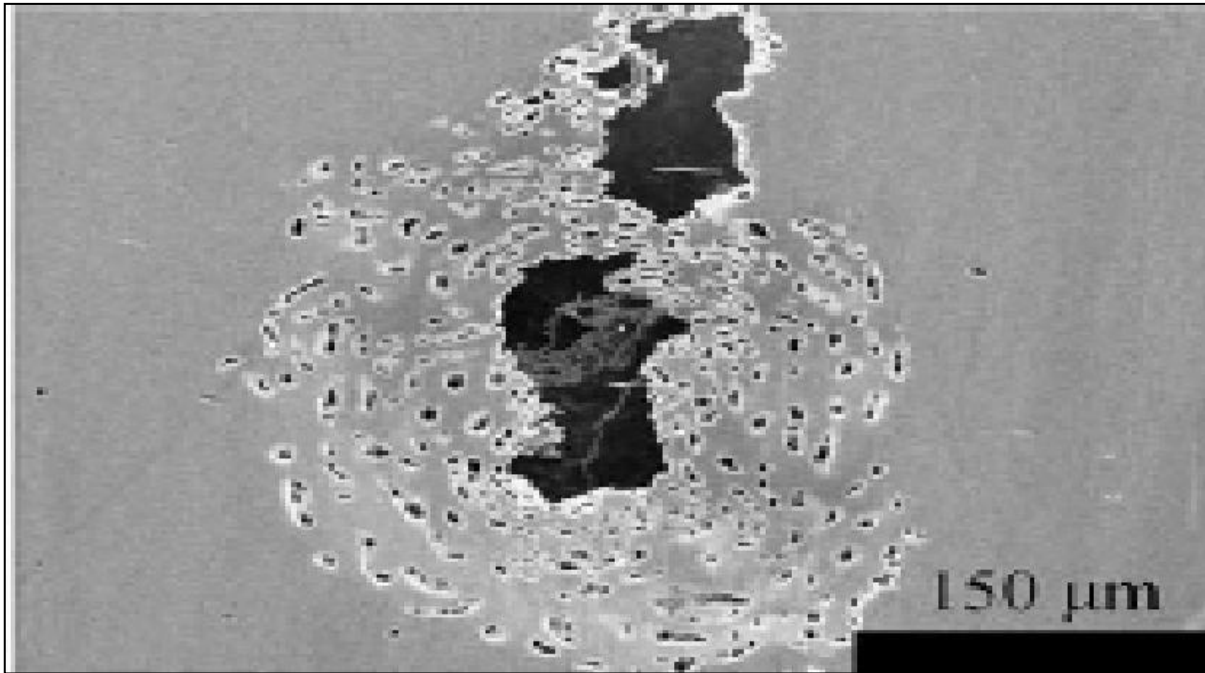


Figure I. 3.La morphologie de la corrosion par piqûres d'un acier inoxydable 316L dans une solution qui contient 5% NaCl. [7].

Corrosion caverneuse:

La corrosion caverneuse (corrosion par effet de crevasse) comme la corrosion par piqûre sont des phénomènes mettant en jeu des processus électrochimiques complexes liés notamment à des paramètres géométriques (existence de zone confinées) et métallurgiques (inclusions, précipités). Ces processus se produisent surtout à la surface de métaux résistant à la corrosion telle que les aciers inox. L'amorce de l'attaque est directement liée au film passif et à sa rupture localement [8].



Figure I.4 Corrosion Caverneuse

Corrosion inter granulaire:

La corrosion inter granulaire correspond à une dissolution préférentielle des zones d'émergence des joints de grains à la surface des matériaux mis en présence d'environnement agressifs. Les cas de corrosion inter granulaire sont nombreux et variés, elle se rencontre dans les aciers inoxydables dans la plupart des cas elle est causée par le dépôt de carbures de chrome sur les joints de grains qui appauvrissent les zones adjacentes chromées et les rendent plus sensibles à la corrosion [9, 10].

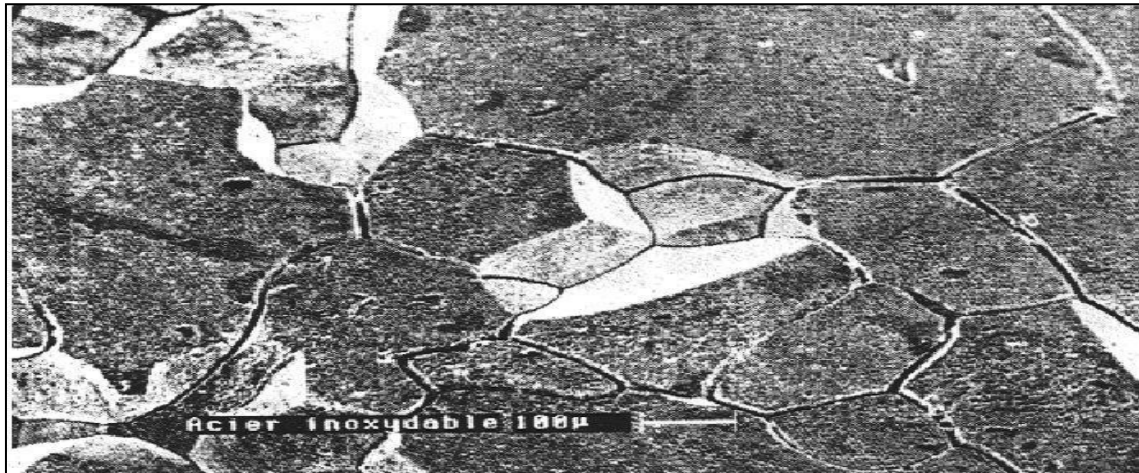


Figure I. 5. Corrosion inter granulaire d'un acier inoxydable [11].

Corrosion galvanique:

La corrosion galvanique dite aussi corrosion bimétallique a pour origine un contact entre deux métaux différents, reliés électriquement, immergés dans une solution aqueuse. On aura la formation d'une pile où le métal le moins noble est l'anode (siège d'une réaction d'oxydation: dissolution du métal) ; le métal le plus noble est la cathode (siège d'une réaction de réduction) [12].



Figure I.6 Corrosion galvanique

Corrosion filiforme:

Elle est décrite pour la première fois en 1940, cette forme de corrosion est spécifique aux métaux peints (revêtement protecteur). L'attaque est superficielle dont l'origine est les défauts de revêtement (rayures) et des points faibles (arêtes, bords,...). Elle se propage à l'interface métal/revêtement en formant des filaments d'environ 0.1-0.5 mm de large et de quelques millimètres de long [13, 14].

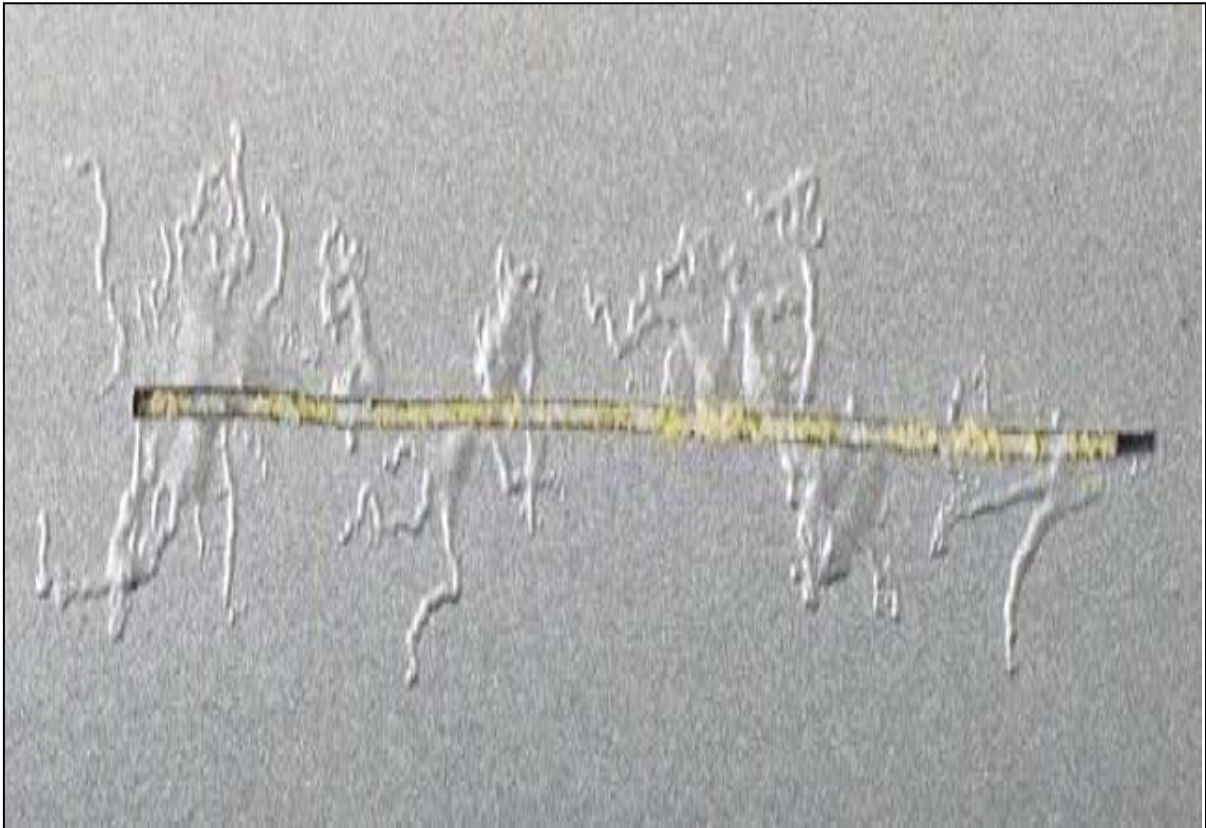


Figure I.7 Corrosion filiforme sur un échantillon d'aluminium peint et scarifié

Facteurs de la corrosion :

La plupart des métaux purs n'est pas stable d'un point de vue thermodynamique. Au contact de l'atmosphère, ils forment une couche superficielle d'oxyde plus ou moins protectrice. Ainsi, la fragilisation de cette couche superficielle conduit à la corrosion sans frein du métal selon plusieurs critères comme la nature et constitution du milieu agressif, la température, le pH, et les inhomogénéités de la structure réticulaire du métal, entre autres paramètres [15].

Les phénomènes de la corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs et ils peuvent être classés en quatre groupes principaux :

Tableau I.1. Influence de différents facteurs sur la corrosion des métaux [16].

<p>Facteurs relatifs au milieu et définissant le mode d'attaque (milieu corrosif).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Concentration du réactif. - Teneur en Oxygène, en impuretés, en gaz - Dissous (CO₂, NH₃ H₂S...). - Acidité du milieu, salinité, résistivité. - Température, pression. - Présence de bactéries
<p>Facteurs métallurgiques</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Composition d'alliage, hétérogénéités cristallines. - Procédés d'élaboration. - Impuretés dans l'alliage, inclusions. - Traitements thermiques, mécaniques. - Additions protectrices.
<p>Facteurs définissant les conditions d'emploi</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Etat de surface, défauts de fabrication. - Formes de pièces. - Sollicitations mécaniques. - Emploi d'inhibiteurs. - Procédés d'assemblage (couples galvaniques, soudures, etc.). - Croûte d'oxydes superficiels. - Force électromotrice extérieure (électrolyse).
<p>Facteurs dépendants du temps</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Vieillessement. - Tensions mécaniques internes ou externes. - Température- modalité d'accès de l'oxygène ou autre gaz dissous. - Modification des revêtements protecteurs. - Apparition d'un dépôt (calcique ou autre).

Corrosion atmosphère:

Lorsqu'un métal ou bien un alliage est exposé à l'air libre; il est en contact direct avec l'atmosphère. L'humidité et la composition de l'atmosphère déterminent le degré de corrosivité de cette dernière [17, 18].

La corrosion atmosphérique existe sous plusieurs types (rural, urbain, industriel, marine) qui sont distingués selon le taux de corrosivité qui dépend du milieu [19].

Corrosion par les sols:

La corrosion dans le sol est aqueuse donc elle dépend de la teneur en eau ou en humidité. L'hétérogénéité du sol peut engendrer une différence de potentiel du métal en contact avec le sol et le passage de charge à travers l'interface métal-sol, par conséquent l'apparition des zones cathodique et anodique. Le mécanisme de cette réaction est électrochimique. L'aération différentielle, la différence de pH dans le sol ($6 < pH < 9$) ou la différence de concentration de sel (NaCl) conduisent à la formation d'une pile de corrosion. La corrosion augmente avec la conductivité du sol (en effet, pour des valeurs de conductivité élevées la corrosion sera plus sévère) [19].

Tableau I.2.Taux de corrosion pour différentes valeurs de pH des sols [20].

Caractéristique de sol	Valeur de pH	Taux corrosion	
Excrément acide	Inférieur à 4.5	Très forte corrosion	
Acide très fort	4 ,5-5,0		
Acide fort	5,1-5,5		
Acide moyen	5,6-6,0		
Acide faible	6,1-6,5		
Neutre	6,6-7,3		
Alcalinité moyenne	7,4-7,8		Corrosion faible
Modérément alcalin	7,9-8,4		
Forte alcalinité	8,5-9,0		
Très forte alcalinité	9,1 est plus	Corrosion très élevée	

Vitesse de corrosion

La vitesse de corrosion d'un métal dans un milieu corrosif dépend de plusieurs paramètres :

➤ **Température :**

L'augmentation de la température accélère la cinétique de la réaction et les phénomènes de corrosion, et par conséquent diminue le domaine de stabilité des métaux [21].

➤ **Acidité :**

L'agressivité d'un électrolyte est en fonction de son pH, une forte concentration en protons dans la solution augmente l'agressivité du milieu. Donc la vitesse de corrosion augmente avec la diminution du pH du milieu[22].

➤ **conditions hydrodynamique :**

La vitesse de la réaction est fixée par les conditions hydrodynamiques en contrôlant le transport de matière dans la couche de diffusion (couche de Nernst), ce qui explique l'importance de l'agitation de l'électrolyte lors des essais de corrosion aux laboratoires [23].

➤ **Salinité :**

La salinité augmente la conductivité du milieu est accélère donc la corrosion [24].

➤ **Ions chlorures:**

La présence des ions chlorures dans l'eau conduit à une acidification du milieu et donc accélère sa corrosivité en réduisant le pouvoir protecteur des couches de surface du métal.

Tableau I.3.Classification de la tenue en corrosion en fonction du taux de corrosion [25].

Taux de corrosion	Excellente
<0.05 mm/an	Excellente
0.05 à 0.130 mm/an	Bonne
0.130 à 1.25 mm/an	Satisfaisante
>1.25mm/an	Non satisfaisante

La Protection contre la corrosion:

La lutte contre la corrosion est une préoccupation constante dans beaucoup de domaines Industriels , elle doit être prise en considération depuis le début d'un projet et jusqu'à sa réalisation , il s'agit de garantir une certaine durée de vie à un objet pour un minimum de Charges.

Etant donné que la corrosion résulte de l'action de deux partenaires, le métal ou l'alliage D'une part, la solution d'autre part, il sera possible de lutter contre ces effets par [26] :

- Protection électrochimique
- Protection par revêtements
- Protection par inhibiteurs de corrosion.

Protection Electrochimique :

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 un potentiel suffisamment bas pour que la vitesse de corrosion devienne négligeable, voire nulle. [27].

On distingue deux méthodes de protection [28] :

- La protection cathodique.
- La protection anodique.

La protection cathodique :

Elle consiste à abaisser la tension métal-milieu de manière à l'amener dans sa zone d'immunité. Deux possibilités sont utilisées : [5].

- la protection cathodique par courant imposé : Cette méthode utilise un générateur extérieur et une anode auxiliaire. Elle offre l'avantage de pouvoir régler la f.é.m ou le courant en fonction des besoins, ceci permet d'optimiser le système et de protéger de grande surface.[29].
- La protection cathodique par anode sacrificielle : dans ce cas La f.é.m nécessaire est obtenue a partir de la différence entre le potentiel moyen du couple de corrosion et le potentiel propre d'une anode (est plus négatif) dite sacrificielle[5].

la protection anodique:

On utilise ce type de protection dans le cas de matériaux passifs ou passiva blés. Elle consiste à réduire la vitesse de dissolution du métal en diminuant la valeur du potentiel de corrosion mixte du spécimen jusqu'à ce qu'il atteigne le potentiel réversible de la réaction

anodique. Même dans cette condition, il y aura corrosion mais à faible vitesse, ce que l'on accepte étant donné qu'il s'agit alors d'une corrosion uniforme. La transition de l'état passif à l'état actif implique la baisse de la densité de courant jusqu'à une très petite valeur. Cette caractéristique est très utilisée industriellement : protéger un métal en le maintenant dans son domaine de passivité s'appelle la protection anodique [30]. [31].

Protection par revêtements :

Ils constituent une barrière physique entre le milieu agressif et le métal à protéger. La structure à protéger est isolée de l'agressivité du milieu corrosif. On distingue les revêtements métalliques et les revêtements non métalliques [5]

Les b inhibiteur de corrosion :

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 [32].

I.7 Conclusion :

Les causes de la zone de corrosion sont multiples et compliquées et qu'elles résultent d'interactions chimiques et ou physiques entre le tissu et son atmosphère.

La question de la corrosion de nombreux ouvrages sont consacrés à ce fléau.

Au cours de ce chapitre, nous avons tendance à nous intéresser à une étude extrêmement bibliographique sur ce développement, sur les stratégies de protection standard et l'intérêt appliqué. Il y a un certain nombre de voies et moyens pour combattre la corrosion, que nous étudierons dans le deuxième chapitre.

CHAPITRE II :
SYSTEMES DE LA PROTECTION CATHODIQUE

II.1- Généralités:

La prévention de la corrosion doit commencer déjà dans la phase de la conception, en d'autres mots, on doit prendre en considération la corrosion depuis le début d'un projet et jusqu'à sa réalisation, Il s'agit de garantir une certaine durée de vie (25ans d'une canalisation de gaz par exemple) pour un coût minimal, comprenant tant les frais d'investissement que d'entretien. En plus, la solution adoptée doit être compatible avec les prescriptions concernant la protection de l'environnement naturel, et doit permettre le recyclage ou l'élimination des différents composants à la fin de leur utilisation.

La Protection des ouvrages métalliques contre la corrosion peut se faire par revêtements, protection cathodique et par inhibition.

La présence permanente de la conduite dans un sol corrosif et une eau agressive augmente les probabilités d'activité des cellules de corrosion. C'est ainsi que l'application des procédures de protection contre l'évolution de la corrosion sur les conduites des réseaux est indispensable. En termes de prévention, il existe quatre moyens pour lutter contre la corrosion, à savoir :

Cette étape vient en priorité du fait qu'elle donne l'avantage au réseau de mieux résister aux conditions opérationnelles et environnementales.

La protection par revêtements a pour but d'isoler la conduite électriquement et d'éliminer tout contact direct avec le milieu environnant. Ainsi, ce revêtement anticipe la formation des cellules de corrosion sur la surface de la conduite.

La technique de protection cathodique repose sur l'injection d'un courant électrique continu permettant d'abaisser le potentiel de la structure métallique à protéger jusqu' à la zone d'immunité.

L'utilisation des inhibiteurs de corrosion :

Ce type de protection est destiné à la protection des surfaces internes de la conduite métallique. Ils forment une couche passive sur la paroi interne avant d'empêcher la production des cellules de corrosion.

Histoire de la protection cathodique (PC) :

La protection cathodique a été appliquée pour la première fois en 1824, lorsque Humphry Davy a protégé les coques de cuivre contre la corrosion marine par des anodes en fer, dans un projet financé par la marine Britannique. En effet, la PC est efficace pour la protection des navires qui a été décrite dès 1950 par la marine canadienne. La première utilisation de la protection cathodique par courant imposé pour protéger les structures souterraines, a été réalisée en Angleterre et aux Etats-Unis ente 1910-1912. Actuellement, la protection cathodique est largement utilisée dans divers domaines tels que les pipelines enterrés, les condenseurs, les réservoirs d'eaux, les équipements chimiques [33].

Prévention de la corrosion des conduites souterraines :

La présence permanente de la conduite dans un sol corrosif et une eau agressive augmente les probabilités d'activité des cellules de corrosion. C'est ainsi que l'application des procédures de protection contre l'évolution de la corrosion sur les conduites des réseaux est indispensable.

En termes de prévention, il existe quatre moyens pour lutter contre la corrosion, à savoir :

***Choix du matériel de fabrication des conduites :**

Cette étape vient en priorité du fait qu'elle donne l'avantage au réseau de mieux résister aux conditions opérationnelles et environnementales.

***Application de revêtements :**

Ce type de protection a pour but d'isoler la conduite électriquement et d'éliminer tout contact direct avec le milieu environnant. Ainsi, ce revêtement anticipe la formation des cellules de corrosion sur la surface de la conduite.

***Application de la protection cathodique :**

La technique de protection repose sur l'injection d'un courant électrique continu permettant d'abaisser le potentiel de la structure métallique à protéger jusqu' à la zone d'immunité.

***Utilisation des inhibiteurs de corrosion :**

Ce type de protection est destiné à la protection des surfaces internes de la conduite métallique. Ils forment une couche passive sur la paroi interne avant d'empêcher la production des cellules de corrosion.

Moyens techniques appliqués contre la corrosion :**Protection par revêtement (passive) :**

La protection de la surface extérieure de la conduite métallique par un type de revêtement approprié a pour but de former une barrière qui l'isole de son milieu environnant. Ce type de revêtement ne fournit pas de protection absolue et définitive en raison des défauts susceptibles de se produire lors de la pose ou au cours de la vie de l'ouvrage. Afin d'être performant, le revêtement appliqué doit répondre à certaines spécifications dont, entre autres, l'adhérence, la bonne résistance à l'impact, le bon isolement électrique et aussi une stabilité durable de sa composition chimique [34].



Figure II.1 Revêtement d'un tube.

Procédés de protection :

La protection par revêtement extérieurs vise à isoler le plus parfaitement possible, le métal du milieu ambiant pour prévenir le mécanisme de la corrosion. Deux principes permettent d'assurer la protection par revêtement :

Premier principe :

Le 1er principe repose sur l'imperméabilité élevée du revêtement.

Celui-ci doit adhérer parfaitement à la surface métallique, et être étanche à l'eau et à l'air. En outre, il doit constituer une barrière vis-à-vis d'espèces ioniques, avoir une résistivité et une rigidité diélectrique suffisantes et conserve toutes ces propriétés dans le temps. Ce système est généralement employé sur les structures enterrées. Il est complété d'une façon systématique par la protection cathodique pour pallier les risques de corrosion là où le revêtement est dégradé. [35].

Deuxième principe :

Le 2ème principe consiste à créer au niveau du métal une couche protectrice en utilisant soit le pouvoir passivant de certains sels métallique (chromates, phosphates), soit le caractère anodique relativement à l'acier de certains métaux (zinc, aluminium).

Afin d'en augmenter la durabilité, ces systèmes sont le plus souvent revêtus d'une couche de peinture limitant ainsi les échanges avec l'environnement. L'utilisation de ce procédé est destinée en particulier aux ouvrages aériens. Suivant la catégorie de l'ouvrage à protéger, la sélection, la mise en œuvre et le contrôle du revêtement protecteur doivent répondre à un ensemble de critères.

Choix de revêtement :

Le choix d'un revêtement anticorrosion doit répondre aux exigences suivantes :

- Résistance d'isolement élevée.
- Imperméabilité à la vapeur d'eau, à l'air.
- Faible transmission d'espèces ioniques.
- Inertie chimique et bactériologique.
- Adhérence et de mouillabilité à la surface métallique.
- Résistance mécanique, de sorte que les propriétés de résistance à l'usure peuvent être maintenues de manière permanente [35].

Types de revêtement :

Le revêtement du pipeline dépend de trois éléments principaux :

- Revêtements à base de produits hydrocarbonés.
- Revêtements thermoplastiques.
- Revêtements à base de produits thermodurcissables [35].

Les différents types de revêtements :**Revêtements à base de produits hydrocarbonés :**

Le revêtement est constitué d'un primaire synthétique ou hydrocarboné et d'une armature en toile de verre imprégnée d'un liant hydrocarboné. Les brais de houille et les bitumes de pétrole, ainsi appliqués, présentent des épaisseurs d'environ 3 mm [36].

Revêtements thermoplastiques :

- Revêtement en polyéthylène extrudé, avec primaire d'accrochage à base de caoutchouc butyle d'épaisseur 3 mm environ.
- Bandes adhésives minces, à support PVC, ou polyéthylène, appliquées sur primaire, et recouvertes d'une bande de protection mécanique supplémentaire [36].

Revêtements à base de produits thermodurcissables :

Ce sont des revêtements constitués par des résines époxydes, en épaisseur de 500µm environ, ou par des polyuréthanes ou des produits composites tels les brais polyuréthanes et les brai-époxydes [36].

Perte d'adhérence des revêtements :

L'apparition du phénomène de décollement des revêtements provoqué par un excès de protection cathodique exige aux utilisateurs de ce système de respecter le seuil de potentiel d'évolution du gaz d'hydrogène une fois que le système est opérationnel. L'application d'une telle spécification permet d'éviter le décollement du revêtement et la dépolarisation rapide de la structure [35].

Protection par inhibiteur de corrosion :

L'inhibiteur de corrosion est une forme de substance rajoutée avec une faible concentration au liquide transporté pour réduire le taux de corrosion sur les conduites du réseau. Les interactions chimiques s'établissant entre l'inhibiteur et la surface du métal permettent de former un écran passif sur la paroi de la conduite qui sert à empêcher le processus de corrosion de se produire.

Les inhibiteurs de corrosion sont de deux types, soit anodique ou cathodique (Bofardi, 1987).

Les inhibiteurs anodiques sont conçus pour interférer avec la réaction de corrosion sur les sites anodiques. Quant aux inhibiteurs cathodiques, ces produits sont destinés à réduire le flux par l'effet de la réaction cathodique.

Par ailleurs, les inhibiteurs de corrosion peuvent fonctionner autrement comme agent d'inhibition. Ils peuvent être injectés dans le liquide transporté pour ajuster son pH, récupérer la quantité d'oxygène dissout et neutraliser les espèces acides en solution.

Ainsi, ces formes d'utilisation sont très pratiques et en même temps efficaces dans la lutte contre la corrosion [35].

Protection cathodique (Protection active) :

Historique :

La première utilisation de la protection cathodique remonte à 1824, lorsque Sir Humphrey Davy, de la British Navy, fixa des morceaux de fer à l'extérieur au dessous de la ligne de flottaison sur le revêtement de cuivre de la coque d'un navire. Le fer se corrode plus facilement sous forme de rouille que le cuivre lorsqu'il est en contact avec la coque si bien que la vitesse de corrosion du cuivre s'en trouve considérablement réduite [37].

Principe de la protection cathodique :

La protection cathodique d'un ouvrage métallique en contact avec un électrolyte consiste à placer cet ouvrage à un potentiel électrique négatif tel que la corrosion devienne thermodynamiquement impossible. Comme valeur de potentiel, au dessous duquel l'acier ne peut se corroder dans un milieu ayant un pH compris entre 4 et 9, on admet le critère de -850mV, mesuré par rapport à l'électrode impolarisable au sulfate de cuivre en solution saturée.

Le principe de la Protection Cathodique trouve son application dans la pile élémentaire où l'une des électrodes (anode) est toujours corrodée alors que l'autre ne l'est pas. Voir (schémas de principe ci-dessous).

Deux méthodes sont utilisées pour rendre un ouvrage cathodique par rapport à une anode extérieure [36]:

- L'anode sacrificielle appelée encore anode réactive Figure (II.2)/ Fig .1 .
- Le soutirage de courant ou dispositif à courant imposé Figure (II.2)/Fig .2 .

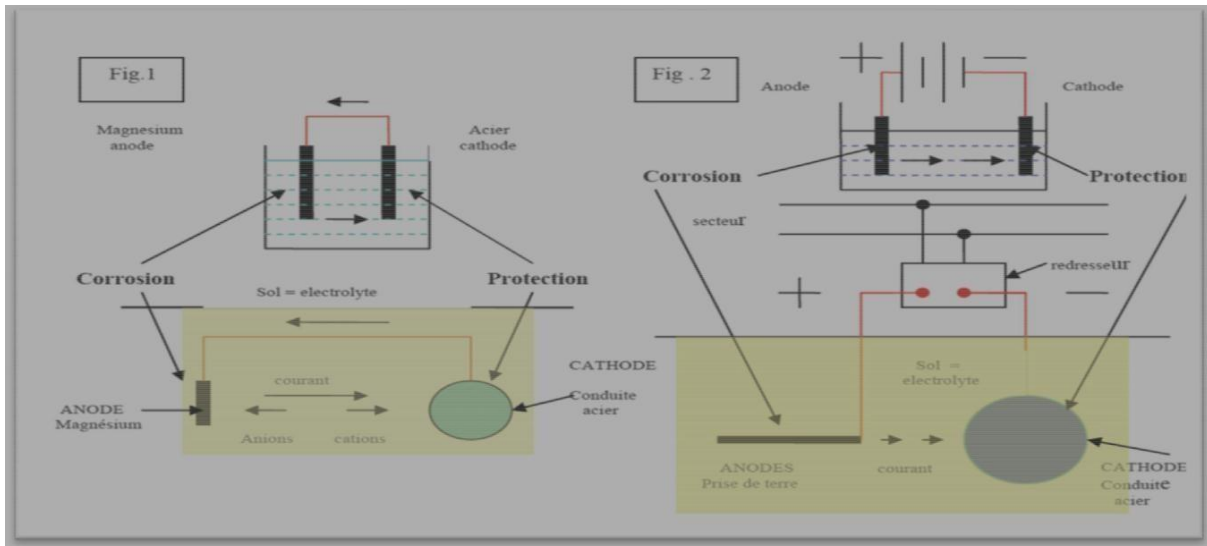


Figure II.2: La protection par anode galvanique et courant imposé.

Conception de la protection cathodique :

La conception de la protection cathodique PC implique de réduire à zéro la différence de potentiel entre les sites anodiques et cathodiques locaux, ce qui entraîne un flux de courant de corrosion nul. Cela peut être accompli en imprimant du courant sur la structure à partir d'une électrode externe et en polarisant les sites cathodiques dans une direction électro négative. À mesure que les potentiels des sites cathodiques se polarisent vers les potentiels des sites anodiques, le courant de corrosion est réduit. Lorsque les potentiels de tous les sites cathodiques atteignent le potentiel de circuit ouvert des sites anodiques les plus actifs, la corrosion est éliminée sur la structure. La structure est maintenant la cathode d'une cellule de corrosion microscopique. La corrosion du métal ce sera une fois que le courant de protection cathodique appliqué sera égal ou supérieur au courant de corrosion [38].

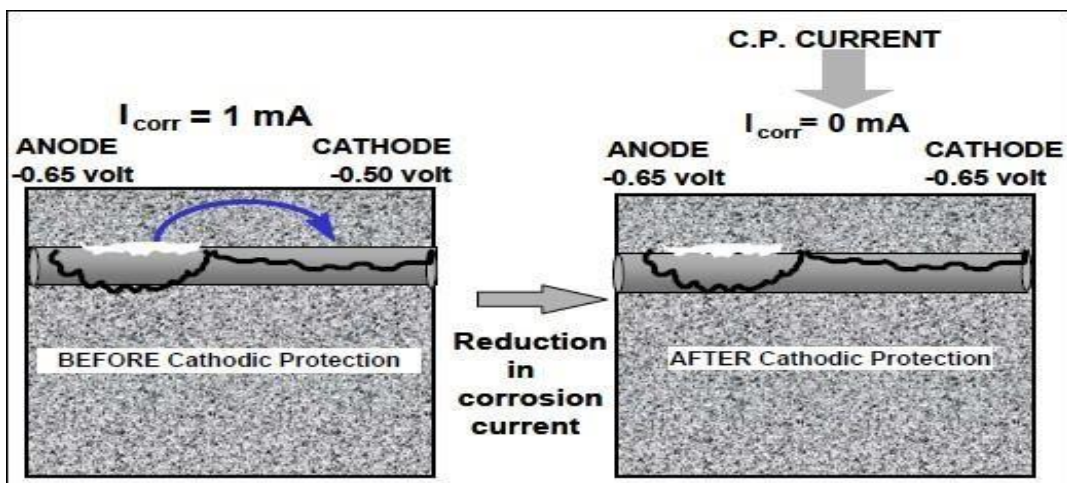


Figure II.3 Protection cathodique appliquée à une structure .

Polarisation d'une structure :

La protection cathodique est un phénomène de polarisation et la polarisation est un changement de potentiel provoqué par le courant. Lorsque le courant passe de l'électrolyte au métal, une réaction de réduction se produit. Les produits de ces réactions modifient la composition chimique de l'électrolyte à l'interface structure / électrolyte. La différence de chimie à l'interface, mesurée par le potentiel de structure, est appelée polarisation. Lorsque le courant de protection cathodique est interrompu, la polarisation se dissipe de la même manière que la dissipation de tension d'un condensateur, mais peut ne jamais atteindre le potentiel négatif d'origine en fonction des produits de la réaction [38].

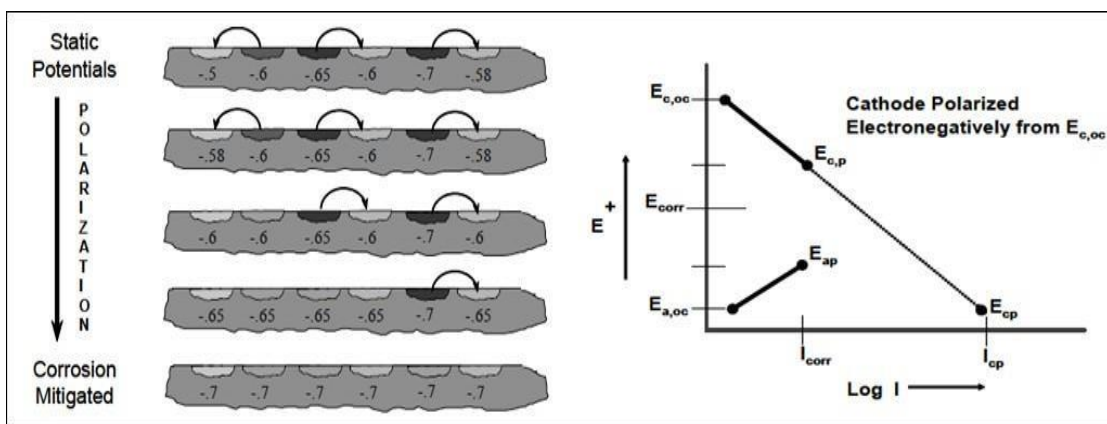


Figure II.4 Polarisation d'une structure .

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 ». 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.

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 et la qualité du métal de la structure [6].

***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.

***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.

***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.

***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.

***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.

***Décollement de revêtement**

Lorsque le potentiel de la protection cathodique atteint le niveau de $-1,12\text{ V}$ (Cu/CuSO_4) à l'instant «OFF», l'évolution de l'hydrogène gazeux commence à se produire. Le gaz généré est généralement pris en otage à l'interface métal/revêtement ce qui provoque le décollement du revêtement (décollement cathodique). 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.

Type de protection cathodique :

La transformation d'une surface métallique corrodée à une surface protégée cathodiquement nécessite de ramener le potentiel naturel de celle-ci vers celui de la zone d'immunité. Pour y parvenir, on doit procéder à une installation d'un système de protection par courant continu dans le même électrolyte. La mise en œuvre d'un tel système requiert l'application de l'un des deux types d'anodes suivants :

1. Anodes galvaniques (sacrificielles) ayant un potentiel plus électronégatif que le métal à protéger.
2. Anodes branchées à un générateur électrique assurant la protection par courant imposé.

Protection par anodes galvaniques (sacrificielles) :

Le principe de protection par anodes sacrificielles est basé sur la connexion d'une anode ou une série d'anodes sacrificielles avec la structure à protéger en présence d'un milieu électrolytique conducteur (sol ou eau) comme le montre la figure II.5. La structure se polarise négativement jusqu'à ce qu'elle atteigne un niveau de potentiel suffisant et uniforme qui assure l'immunité de la surface contre l'activité de corrosion. Le courant généré par les anodes sacrificielles du système de protection est la source du processus de polarisation de la structure métallique.

Au fil des années, l'anode se consomme graduellement selon un principe électrochimique défini par la loi de Faraday qui stipule que la masse consommée d'une matière impliquée dans la réaction d'oxydo-réduction est directement proportionnelle à la quantité du courant délivré. Ainsi, le taux de consommation de l'anode ($\text{g}/\text{A} \cdot \text{Ans}$) dépend de la quantité du courant émis par l'anode, de la taille de l'anode et sa composition chimique ainsi que de la structure à protéger et de l'environnement [34].

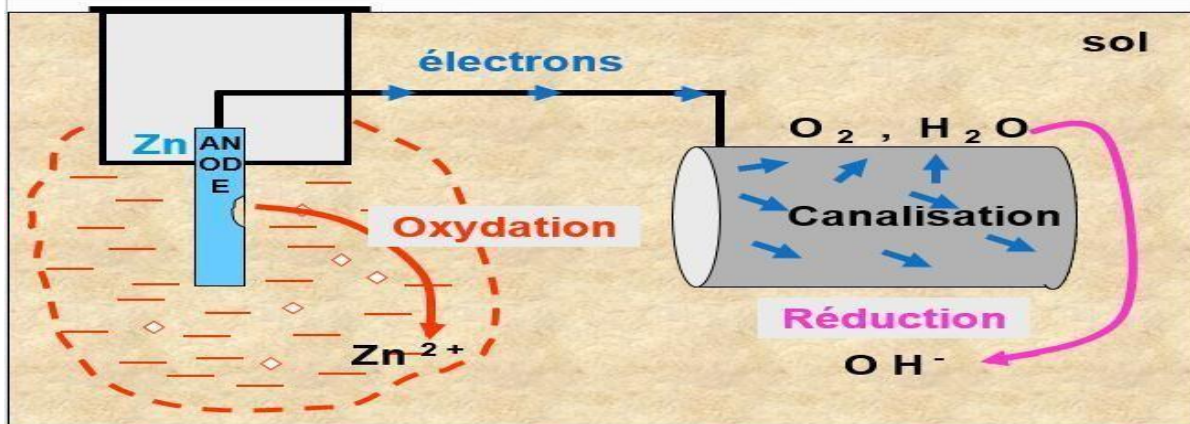


Figure II.5 : Principes de la protection par anodes galvaniques (sacrificielles) .

Choix des anodes galvaniques (sacrificielles) :

Il existe plusieurs types d'anodes dont les caractéristiques et les applications sont différentes. Dans le cas de la protection de l'acier, les anodes utilisées sont à base de zinc, d'aluminium ou de magnésium. Des études et l'expérience ont permis de déterminer, pour chacun des métaux les seuils d'impureté admissibles ainsi que les éléments d'alliage complémentaires nécessaires pour obtenir les meilleures performances. De nombreux alliages spécifiques pour la protection cathodique existent aujourd'hui sur le marché.

Câblage de système anode galvanique :

Les anodes galvaniques peuvent être fixées à la structure soit directement en soudant ou en boulonnant des sangles intégrales à la structure, par exemple, des anodes montées sur la coque et des anodes de bracelet, ou en connectant un fil entre l'anode et la structure. Si un fil est utilisé, le fabricant le fixe à l'anode. Le fil est attaché à la structure à l'aide d'une connexion mécanique, d'une soudure à la thermitte ou d'une autre méthode appropriée. La soudure à la thermitte est la méthode préférée, car elle fournit la connexion la plus fiable. Le fil doit être revêtu d'une isolation diélectrique et les connexions doivent être revêtues [38].



Figure II.6 Soudage des câbles de raccordement

Applications des systèmes d'anodes galvaniques :

Lorsqu'une quantité de courant relativement faible est requise.

Électrolytes à résistivité généralement plus faibles.

Pour que la protection cathodique locale fournisse du courant à une zone spécifique.

Lorsqu'un courant supplémentaire est nécessaire dans les zones à problèmes. Certaines structures avec les systèmes de protection cathodique actuels globalement [39].

Protection par courant imposé :

Dans certaines situations de protection, les anodes sacrificielles ne peuvent pas délivrer suffisamment de courant pour une protection idéale. Cette situation est souvent rencontrée dans les cas de longues conduites ayant un grand diamètre et de conduites présentant un problème d'isolation. De même, certaines conditions environnementales peuvent parfois être à l'origine de ce genre de problèmes. Devant des circonstances pareilles, les ingénieurs de design favorisent l'application de la protection par courant imposé [34].

Principes de la protection par courant imposé :

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

Masse anodique ou (un déversoir).

L'électrolyte (sol ou eau).

La structure à protéger.

Le pôle positif de la source est relié au déversoir alors que le pôle négatif est relié à la structure à protéger. Comme le montre la figure II.7 Le courant venant du déversoir traverse l'électrolyte, puis entre dans la structure créant ainsi un abaissement de potentiel recherché correspondant à l'immunité du métal. Par exemple, pour de l'acier dans un sol type, la différence de potentiel entre l'électrode de référence au sulfate de cuivre saturé est inférieure à $-0,850$ V en tous points de la structure [40]

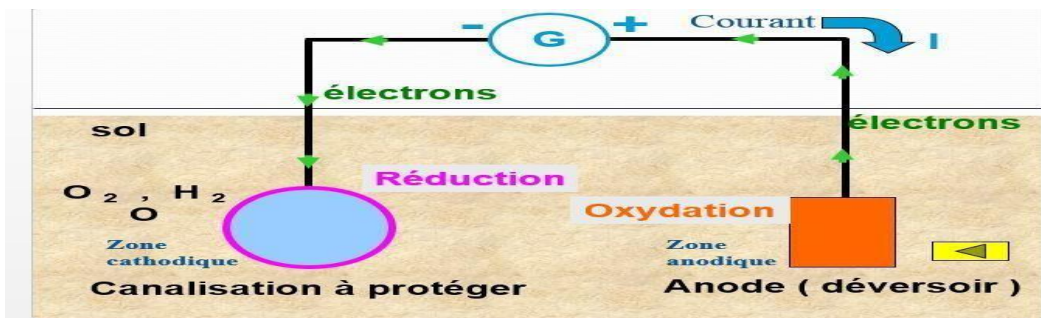


Figure II.7 : Principe de la protection par courant imposé.

Applications de la protection cathodique par courant imposé :

- Les grandes exigences de courant, en particulier pour les surfaces nues ou mal enduites les ~~stuts~~
- Surmonter les courants parasites ou les problèmes d'interférences cathodiques.
- Protection des grandes boîtes à eau des échangeurs de chaleur, des réchauffeurs autres navires.
- L'intérieur des réservoirs de stockage d'eau.
- Les fonds extérieurs (primaires et secondaires) de stockage hors sol réservoirs.
- Les composants sous-marins des structures offshores.
- Les pieux de fondation et les palplanches, sous terre et dans l'eau [39].

Installation d'un poste de protection cathodique à courant imposé :

Générateur de courant continu et ces caractéristiques :

Habituellement, il est constitué par un transfo-redresseur

- Les panneaux solaires photovoltaïques, alimenté à partir du réseau électrique basse tension. Mais d'autres sources d'alimentation peuvent être envisagées tel que :
- Les groupes électrogènes,
- Les thermo générateurs,
- Les générateurs de type éolien,
- Piles à combustibles, Générateur nucléaire

Déversoir anodique et leurs implantations :

Le déversoir anodique est constitué d'un ensemble d'anodes, ces dernières peuvent être de forme et de dimensions très variables.

Tableau II.1 Formes et dimensions des anodes.

Dimensions	Longueur (mm)	Masse (kg)
Section circulaire Ø 200 mm	400 à 650	10 à 23
Section rectangulaire 102×102 à 127×114mm	200 à 550	4 à 15
Section en forme de D côté rectiligne de 90 à 110 mm	20 à 1500	2 à 30
Section trapézoïdale de 25 à 65 cm ²	500 à 1500	19 à 50

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. La masse du matériau constituant le déversoir devra être déterminé pour que l'installation ait une durée de vie de l'ordre de 15 à 20ans.

Les matériaux généralement utilisés pour la réalisation d'un déversoir sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau II.2 Propriétés et milieu d'utilisation des déversoirs .

Déversoir	Consommation (kg/A.an)	Milieu d'utilisation
Acier	9	Tous types de sol Eau de mer Eau douce
Graphite	0,25 à 0,5	Tous types de sol Eau de mer Eau douce
Ferro silicium	0,5	Tous types de sol Milieus liquides chlorurés Milieus de faible résistivité
Magnétite	1,5 g/A.an	Tous types de sol Eau de mer
Titane platiné	10 mg/A.an	Milieu de faible résistivité

L'implantation du déversoir devra être installée à environ 50 mètres de la canalisation, de façon à favoriser son rayonnement et augmenter ainsi la portée du poste de protection. En règle générale, il faudra veiller impérativement à s'écarter d'au moins 50 mètres de tout ouvrage métallique enterré susceptible de capter les courants déversés.

On distingue deux types d'emplacement :

✓ **Déversoir anodique posé verticalement :**

Le procédé de pose consiste à enterrer les anodes verticalement dans un trou creusé au fond d'une tranchée à une profondeur comprise entre un et deux mètres selon la nature du

terrain tel que montré sur la Figure (II.8). Le courant I débité par une anode dépend de la résistance de cette dernière et également de la structure à protéger.

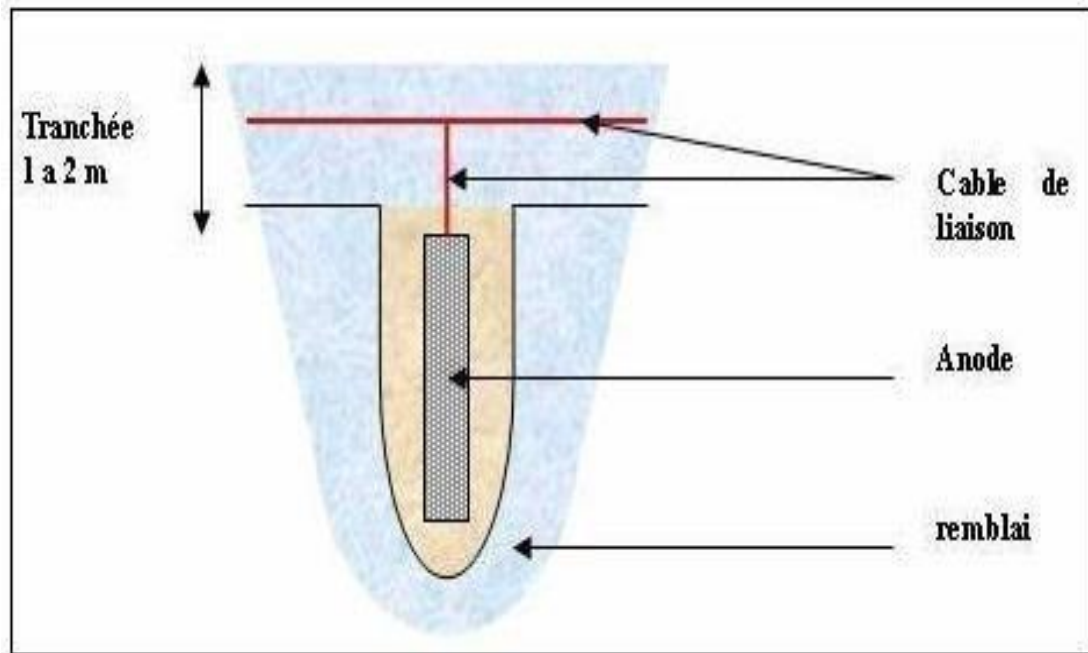


Figure II.8 Déversoir anodique posé verticalement

✓ **Déversoir anodique posé horizontalement :**

Ce type de pose est conseillé lorsque la résistivité du sol en surface est faible et lorsqu'on dispose de place sur le terrain tel qu'illustré sur la Figure (II.9). Il est recommandé, par exemple l'utilisation de vieux rails ou autre ferraille de forme similaire.

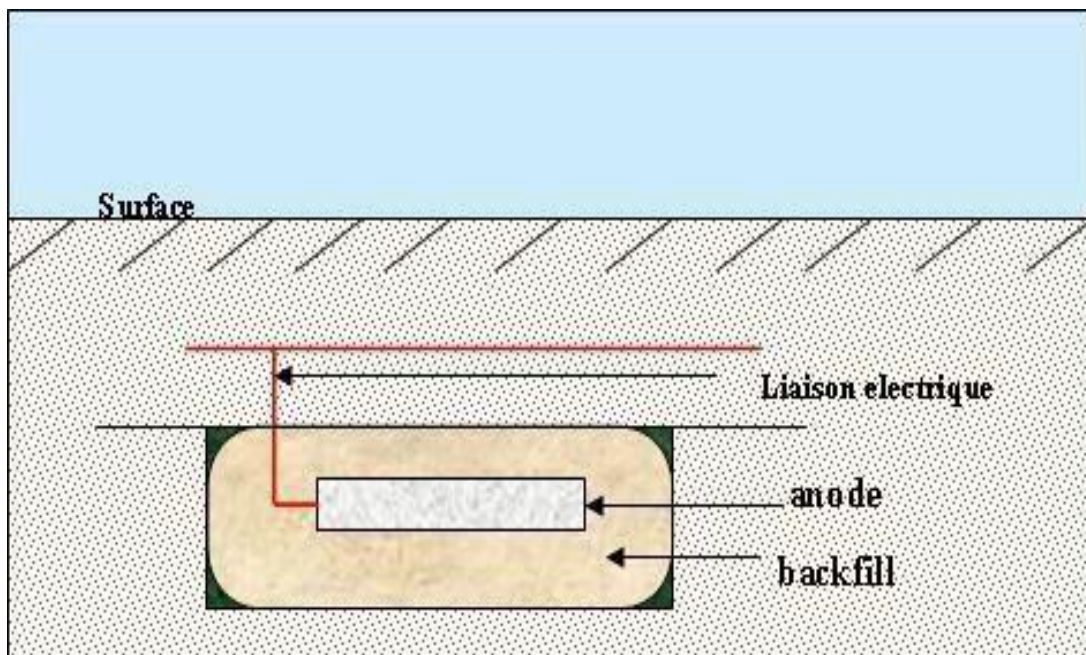


Figure II.9 Déversoir anodique posé horizontalement.

Électrodes de référence :

Pour mesurer le potentiel d'une électrode, on utilise une électrode de référence qui devrait satisfaire aux conditions suivantes :

- Avoir un potentiel reproductible.
- Etre non polarisable (aux faibles intensités de courant, le potentiel ne varie pratiquement pas).
- Etre facile à utiliser.

Tableau II.3 Electrodes de référence.

Électrodes	Électrolytes	E/V
Calomel (Hg/Hg ₂ Cl ₂ /Cl ⁻)	KCl saturé	0,241
	KCl 1M	0,28
	KCl 0,1M	0,33
Sulfate mercuries (Hg/HgSO ₄ /SO ⁻²)	K ₂ SO ₄ , saturé	0,658
Oxyde mercurique	NaOH, 1M	0,098
Chlorure d'argent (Ag/AgCl/Cl ⁻)	KCl, saturé	0,195
Sulfate de cuivre (Cu/CuSO ₄)	CuSO₄, saturé	0,316

Câbles de liaison :

La section des câbles est déterminée en fonction de la chute admissible et de l'échauffement. Pour des raisons de tenue mécanique une section minimale de 10 mm² est recommandée, la nature de l'isolant des câbles est déterminée en fonction du milieu. Dans beaucoup de cas un câble isolant en PVC est suffisant.

Les bornes (+) et (-) sur l'appareil de soutirage et les câbles doivent être clairement repérés afin d'éviter des inversions qui provoqueraient la corrosion de la partie à protéger.

En plus des appareils déjà cités, il faut disposer d'autres appareils électriques :

- **Appareils de coupure** : des interrupteurs permettant d'établir ou d'interrompre l'alimentation du post de soutirage.
- **Appareils de protection** : des disjoncteurs permettant la coupure et la protection contre les surcharges et les sur intensités.
- **Appareils de mesure** : qui ont pour but d'indiquer :
 - Tension d'alimentation.

- Intensité débitée.
 - Potentiel de la structure.
 - Temps de fonctionnement.
- **Utilisation des Joints Isolants** : Dans un couplage galvanique, on distingue une zone anodique (faible potentiel) et une zone cathodique, par conséquent une circulation de courant électrique conduisant à la dégradation d'une des pièces. Pour protéger cette pièce il est nécessaire d'intercaler à la jonction bimétallique (entre les deux pièces) un raccord isolant, organe dont le rôle est de couper le circuit électrique et d'empêcher toute circulation de courant.

On distingue dans l'industrie deux types de raccord isolant à savoir :

- Joint isolant à bride
- Joint isolant monobloc

Ses raccords isolants sont aussi utilisés dans l'industrie du transport du gaz pour isoler les postes de livraison au reste du réseau et pour isoler les conduites principales des conduites secondaires lors des soutirages ou injections de gaz.

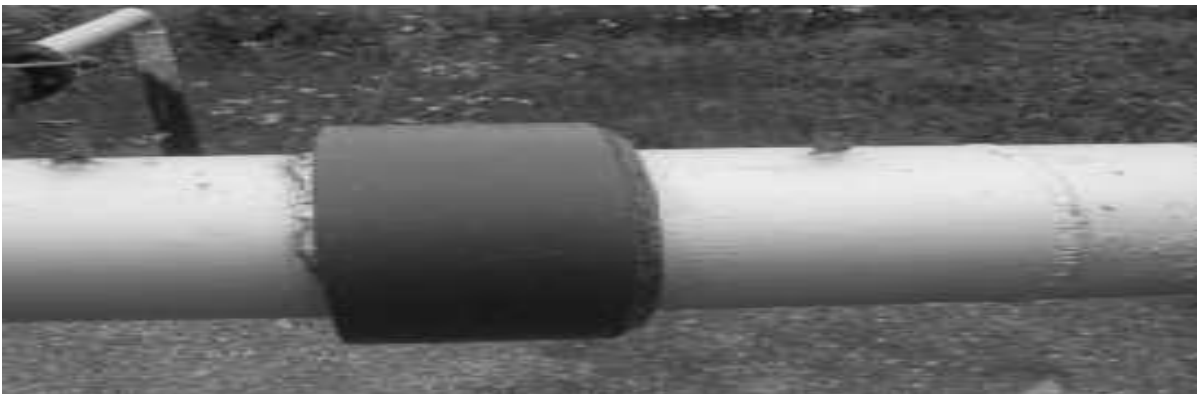


Figure II.10 Joint isolant monobloc

Avantages et inconvénients des systèmes de la protection cathodique:

L'utilisation d'un système de protection cathodique soit toujours bénéfique, la sélection du système à adopter demeure généralement assujettie à des conditions environnementales, énergétiques et économiques. Pour cela, une étude comparative doit être établie par l'ingénieur de design afin de mettre en relief les avantages et les inconvénients de chacun des systèmes de protection. À titre d'exemple, le tableau II.4 donne un aperçu sur les éléments comparatifs en question.

Tableau II.4 Comparaison des éléments de systèmes P.C

	Anode galvanique ou sacrificiel	Système à courant imposé
Complexité de l'installation	Simple	Complexe
Source d'énergie	Non nécessaire	Nécessaire
Distribution du courant sur la structure	Homogène	Souvent hétérogène
Poids de la structure	Importante surcharge en poids pour les longues durées de vie	Peu d'accroissement
Influence de la résistivité du milieu	Non envisageable si la résistivité du milieu est trop grande	Pas de difficulté
Débit par anode	Faible	Elevé
Nombre d'anode	Important	Faible
Facilité d'adapter le courant consommé en fonction de la demande	adaptation possible à travers une liaison résistance	Adaptation facile
Risque de surprotection	Pratiquement aucune	Possible
Interférence avec d'autres structures	Non	Possible
Risques humains	Non	Possible (Poste de soutirage)
Surveillance	Aisée et occasionnelle	Surveillance fréquente

Choix du système de protection cathodique :

Le choix d'une méthode de protection par rapport à une autre selon Beckmann et scwenk, dépend essentiellement de la demande en courant et de la résistivité du sol (électrolyte) telle qu'illustré dans la **Figure (II.11)**.

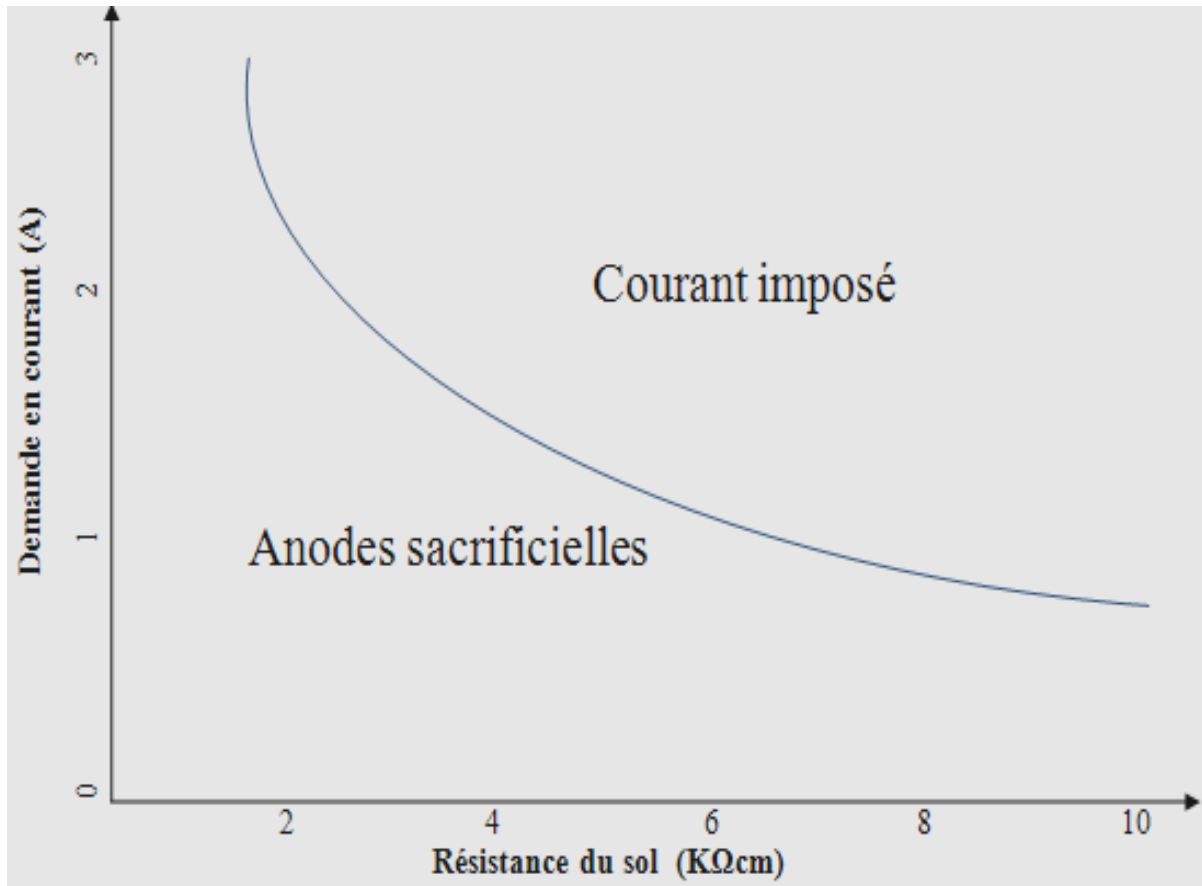


Figure II.11 Choix du système de protection cathodique.

Facteurs affectant la protection cathodique :

Atténuée par L'efficacité d'un système de protection cathodique appliquée sur une conduite donnée peut être certains facteurs mécaniques, physiques et environnementaux qui se manifestent sous différentes formes :

- Insuffisance de continuité électrique.
- Perte d'adhérence des revêtements sur la conduite à protéger.
- Influence des structures adjacentes.
- Influence des courants vagabonds (courant continu et courant alternatif).

Insuffisance de continuité électrique :

L'insuffisance de la continuité électrique dans le système de protection cathodique se manifeste suite à une faible conductibilité électrique de l'électrolyte, soit par la présence d'un revêtement qui inhibe le passage du courant de protection. Ce manque de flux de courant se traduit par une insuffisance au niveau de la polarisation de la structure. Il s'ensuit alors que les critères de protection cathodique ne peuvent pas plus être conclus. Pour éviter que cela ne se produise, il est donc nécessaire d'assurer la continuité électrique en tous points de la structure. Il est à noter que, pour le cas des réseaux d'aqueduc, la présence des joints de raccordement non continus électriquement entre les différents éléments de l'ouvrage forme un blocage de circulation de courant. Ce fait oblige le courant de s'échapper de la conduite pour aller suivre d'autres chemins moins résistants ce qui crée des zones chaudes au niveau la structure (points de corrosion).

Influence des courants vagabonds :

Les courants vagabonds se définissent comme étant des courants qui abandonnent leurs sources d'origine pour aller circuler dans le sol et chercher par la suite le parcours qui leur offre le minimum de résistance. Ces courants électriques qui empruntent le chemin métallique le plus proche à rencontrer. Le comportement de ce type de courant est généralement variable en termes d'intensité, de direction et de trajet. Ils affectent souvent le système de protection cathodique de la structure et conduisent à la formation des cellules de corrosion aux points de sorties.

Les courants vagabonds proviennent souvent des installations nourries aussi bien en courant continu qu'en courant alternatif. En courant continu, ces courants s'émanent d'installations mal isolées par rapport au sol comme les voies ferrées électrifiées. En courant alternatif, les structures métalliques sont susceptibles de recevoir des interférences au voisinage des lignes de haute tension où l'excès de courant injecté dans les structures produit sous l'effet inductif et capacitif perturbe les critères de la protection cathodique.

Ainsi, l'emplacement des lignes de transmission de courant alternatif devrait être souligné lors de la conception des systèmes de protection cathodique.

Influence des structures adjacentes :

La présence voisine des structures métalliques dans un électrolyte conducteur peut induire des interférences électriques défavorables sur la structure.

Le courant électrique délivré par les anodes de protection a tendance à s'échapper de la source pour embarquer sur une structure adjacente non protégée et ce avant de rejoindre la

structure à protéger. De ce fait, les critères de protection cathodique peuvent être affectés et les points de sortie du courant de protection créés sur la structure voisine sont exposés à la corrosion.

L'étude contribue au dimensionnement d'un système de protection cathodique par soutirage de courant avec comme source d'énergie électrique des panneaux photovoltaïques. Les résultats montrent que la configuration étudiée du système solaire assure la protection de la canalisation enterrée, le critère de protection cathodique est atteint.

CONCLUSION :

Les causes de la corrosion sont multiples et complexes et elles résultent d'interactions chimiques et /ou physiques entre le matériau et son environnement. La corrosion jusqu'à ce jour n'est pas complètement éclairée et cela est expliqué par les essais de laboratoire qui ne permettent pas de prévoir avec certitude le comportement d'un métal ou d'un alliage donné lorsqu'il est exposé à la corrosion et de même il n'y a pas de métal résistant, d'une manière générale un métal résiste à la corrosion dans des conditions bien déterminées.

La protection passive par revêtements a pour but d'isoler la conduite électriquement et d'éliminer tout contact direct avec le milieu environnant. Ainsi, ce revêtement anticipe la formation des cellules de corrosion sur la surface de la conduite.

La technique de protection active (protection cathodique) repose sur l'injection d'un courant électrique continu permettant d'abaisser le potentiel de la structure métallique à protéger jusqu'à la zone d'immunité.

CHAPITRE III :
MATERIELS ET METHODES DE CALCUL DU SOL

Généralités:

Le sol entourant la conduite est un élément indispensable à la réalisation de la réaction de corrosion.

Celui-ci est non seulement le chemin emprunté par les électrons et le courant de corrosion, mais de part sa nature, il influence la formation de zones anodiques et la vitesse de corrosion à ces endroits de la conduite. Plus les électrons peuvent circuler facilement dans le sol, plus la vitesse de corrosion sera grande et donc plus la conduite sera détruite rapidement. L'hétérogénéité du sol, de part sa composition, son humidité, sa perméabilité, sa porosité, sa teneur en sel ou autres contaminants et par la présence de gaz dissous, favorise l'apparition des phénomènes de corrosion.

De même les fluctuations se produisant dans le sol tel que, les changements saisonniers et climatiques, les variations de l'activité biologique et le niveau de la nappe phréatique, favorise ce phénomène.

La corrosivité des sols peuvent être estimée en mesurant sa résistivité. En effet la corrosion des structures enfouies est d'autant plus importante que l'échange d'électrons (quantité de courant) entre zones anodiques et cathodiques ainsi que la dissolution du fer est facilitée par la faible résistivité de l'électrolyte, et donc par la faculté du sol à conduire le courant et à permettre la corrosion. par conséquent la résistivité est un facteur déterminant dans la propagation de la corrosion. un sol résistif (faiblement agressif) aura pour caractéristique une faible contribution au processus de corrosion tandis qu'un sol très peu résistif (agressif) permettra l'initiation et la propagation rapide de la corrosion et par conséquent une apparition précoce et importante des bris. De ce fait, la connaissance de la résistivité du sol environnant les conduites en acier peut s'avérer un bon indicateur pour estimer la corrosivité du sol et déterminer les zones propices à la corrosion et établir des plans d'intervention et de prévention en fonction des propriétés. De plus, la connaissance de la résistivité du sol permettra les calculs détaillés de la conception du système de protection cathodique et d'établir les positions stratégiques d'implantation de lits d'anodes permettant d'assurer une fonctionnalité optimisée du système de protection cathodique mise en place [41].

Le sol :

Le sol est un milieu complexe comportant des sels minéraux ou organiques, parfois des acides ou des bases libres, même des gaz comme l'oxygène qui font qu'il est parfois agressif, ce qui conduit à des corrosions extrêmement rapides, mais qui dans certains cas

parfaitement inerte.

L'agressivité absolue du sol pour un métal découle de ses propriétés physiques et chimiques.

1 Propriétés physiques des sols :

Le sol contient de grandes quantités de minéraux différents de granulométrie variable selon leur provenance. Les sables contiennent des particules pouvant atteindre 2 mm, les particules constitutives de l'argile n'ont que quelques microns de diamètre. Les sols contiennent de l'eau :

- Une eau libre amenée par les mouvements de la nappe phréatique à profondeur variable (1 à 100 m), qui joue un rôle important surtout pour les structures enterrées verticales, comme les puits.
- Une eau libre qui s'infiltré depuis la surface du sol, eaux de pluie, d'irrigation et d'inondation.
- Une eau interstitielle qui migre par capillarité, dont la quantité dépend de la nature de la terre et fixe le taux d'humidité d'un sol.
- Les sols contiennent des gaz.

A la profondeur des conduites, il y a presque toujours de l'air, donc de l'oxygène, beaucoup dans les sols sableux ou poreux, moins dans les sols compacts argileux.

III.2. 2 Propriétés chimiques des sols :

Elles sont mises en évidence par la mesure du pH. La plupart des sols ont un pH compris entre 5 et 8.

Les sols contiennent des sels dissous à des concentrations de 100 à 1500 ppm.

La teneur en sel est fonction des précipitations. Des pluies abondantes lavent les terrains et leur salinité est faible. Dans les régions arides, au contraire, où l'eau remonte du sol pour s'évaporer, la concentration en sels peut devenir très importante.

Les cations les plus répandus, cause d'agressivité, sont les ions potassium, sodium, magnésium et calcium.

Les anions présents, chlorures et sulfates, augmentent la conductibilité de l'électrolyte et facilitent donc les transferts électriques causant les corrosions

III.2. 3 Classification des sols :

L'agressivité des sols, évaluée en fonction de la résistivité est d'autant plus forte que la résistivité est plus faible. Une classification assez communément admise de degré d'agressivité (corrosivité) en fonction de la résistivité du sol est la suivante :

Tableau III.1 : Degré d’agressivité du sol en fonction de la résistivité

Résistivité du sol ($\Omega.m$)	Degré d’agressivité du sol
< 10	Très Fortement agressif
10 - 20	Fortement agressif
20 - 35	Moyennement agressif
35 - 50	Faiblement agressif
50 - 100	Très faiblement agressif
> 100	Non agressif

III. 3 Agressivité du sol :

L’agressivité du sol est considérée comme la principale caractéristique qui contribue directement au processus de corrosion des structures enfouies. [42] 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. [43]

La conduite en fonte ductile présente généralement une bonne résistance à la corrosion externe. Cependant, en présence des sols agressifs, les risques d’activité de corrosion sont élevés. [44] 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.

III.3.1 Méthode d’évaluation de l’agressivité du sol :

Le chemin parcouru par le courant de corrosion entre les zones anodiques et cathodiques d’une structure métallique enterrée dans un milieu conducteur comme le sol est facilité par la faible résistivité de celui-ci. La résistivité du sol présente ainsi un facteur déterminant dans la propagation de la corrosion [45].

Les spécialistes en études de sol ont fait appel au développement de techniques d’évaluation d’agressivité de sol. Par ailleurs, aucune norme n’a été raffinée et acceptée par les organisations de standardisation telles que l’ASTM & NACE [43].

Les seules références disponibles, soit les normes PACE (Règlement sur les produits pétroliers), AWWA C105 (American Water Works Association) et AFNOR A05-250 (Évaluation de la corrosivité des sols pour les canalisations enterrées en matériaux ferreux non ou peu alliés). Ces essais permettent d’évaluer la corrosivité de l’échantillon de sol de

manière assez précise.

Pour ces raisons, on s’est basé sur ces normes existantes afin de définir des limites de résistivité sur le terrain concernant les conduites d’aqueduc en fonte. Les limites de résistivité considérées sont présentées au **tableau III.2** où cinq classes de sol sont ainsi définies en fonction de leur résistivité et de la corrosivité associée à chacune d’elles.

Tableau III.2 Corrosivité du sol selon la résistivité.

Plage de résistivité du sol (Ω .cm)	Catégorie du sol
0 – 1500	Très corrosif
1500 – 3000	Corrosif
3000 – 5000	Moyennement corrosif
5000 – 10000	Faiblement corrosif
> 10000	Peu corrosif

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

III. 3.2 Paramètres déterminant l’agressivité du sol :

L’analyse du taux d’agressivité du sol consiste en la détermination des paramètres suivants [44]:

- **Résistivité du sol** : La résistivité du sol est inversement proportionnelle à la capacité du courant de corrosion et donc à l'activité de la corrosion. Un sol avec une résistivité de 1500 Ohm cm ou moins se fait attribuer 10 points et est considéré comme potentiellement corrosif.
- **pH** : Le pH exprime la teneur en ions acidifiants dissous dans l'électrolyte (le sol) et indique l'aptitude d'un sol à être le siège de certaines réactions particulières influençant la corrosion. Un sol à faible pH indique un sol aux propriétés acides et un sol avec un pH élevé indique la présence de sels alcalins dans le sol.

- **Sulfures** : La présence des sulfures indique l'existence de bactéries sulfato-réductrices. L'analyse considère les degrés de la réaction du catalyseur de l'échantillon du sol étudié (positif, trace ou aucune).
- **Potentiel d'oxydoréduction (Redox)** : Le potentiel redox vise à mesurer la capacité d'un sol à permettre l'échange d'électrons, ce qui est le fondement même du processus de corrosion.
- **Humidité** : Le taux d'humidité et ses variations ont un impact double : ils affectent autant la résistivité que le transport d'oxygène aux zones de corrosion. L'analyse de l'humidité considère les conditions de drainage (excellente, moyenne, pauvre) plutôt que la teneur en eau effective de l'échantillon. À chacun de ces paramètres énumérés ci-dessus, il est possible d'affecter un pointage relatif à son agressivité. Le cumulatif des points pour un échantillon détermine le taux d'agressivité du sol (T.A.S.). Les points attribués aux taux d'agressivité du sol selon la norme «AWWAC 105/A21.5-99» sont illustrés dans le tableau III.3 [46].

Tableau III.3 Pondération des paramètres caractérisant la corrosivité du sol.

Résistivité (Ohm .cm)	Points
< 1500	10
≥ 1500 – 1800	8
> 1800 – 2100	5
> 2100 – 2500	2
> 2500 – 3000	1
> 3000	0
pH	
0-2	5
2-4	3
4-6.5	0
6.5-7.5	0

7.5-8.5	0
> 8.5	3
Potentiel Redox (mV)	
> 100	0
50-100	3.5
0-50	4
< 0	5
Sulfures	
Positive	3.5
Trace	2
Négative	0
Humidité	
Élevé	2
Moyenne	1
Pauvre (sec)	0

III. 4 Méthodes de mesure de la résistivité du sol :

La méthode la plus utilisée pour déterminer la résistivité des sols est la méthode des quatre électrodes de Wenner [48]. 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.

Principe de mesure de la résistivité du sol :

Tel qu'illustré sur la figure III.4, on fait circuler un courant d'intensité I entre les deux piquets extérieurs et on mesure la différence de potentiel ΔE qui en résulte par l'effet Ohmique entre les deux piquets intérieurs. Les valeurs obtenues des mesures de I et ΔE

permettent de calculer la résistivité du sol selon l'équation (III.1) [49]. Comme le sol n'est pas homogène, la valeur obtenue par la mesure ne correspond pas à la résistivité réelle du sol mais plutôt à une moyenne des résistivités des diverses couches le constituant. Ainsi, cette valeur est appelée la résistivité apparente.

La résistivité moyenne du sol peut être déterminée à partir de la résistance mesurée par l'Ohm-mètre. Toutefois, la connaissance de la distance entre chaque piquet de terre est nécessaire dans chaque mesure. Ceci rend la procédure lente et compliquée [50]. Pour cela, la norme ASTM G57-97 a été conçue pour simplifier l'utilisation de la méthode de Wenner. Cette norme exige que les quatre piquets de terre soient alignés suivant une distance égale pour être connectés par la suite avec des fils conducteurs aux bornes d'un résistance-mètre. La conception actuelle de résistance-mètre utilisé permet de générer le courant à injecter, de mesurer le voltage et d'afficher la valeur de la résistance qui présente en fait la résistance moyenne du sol.

La mesure s'effectue à partir de la surface du sol en disposant de quatre (04) piquets métalliques distant entre eux d'un intervalle égal à « a ». Ces piquets sont raccordés par des fils conducteurs aux bornes de l'appareil (GEHOM-METRE).

Le principe de la mesure consiste à injecter un faible courant alternatif entre les deux piquets externes et mesurer la chute de tension entre les deux piquets internes.

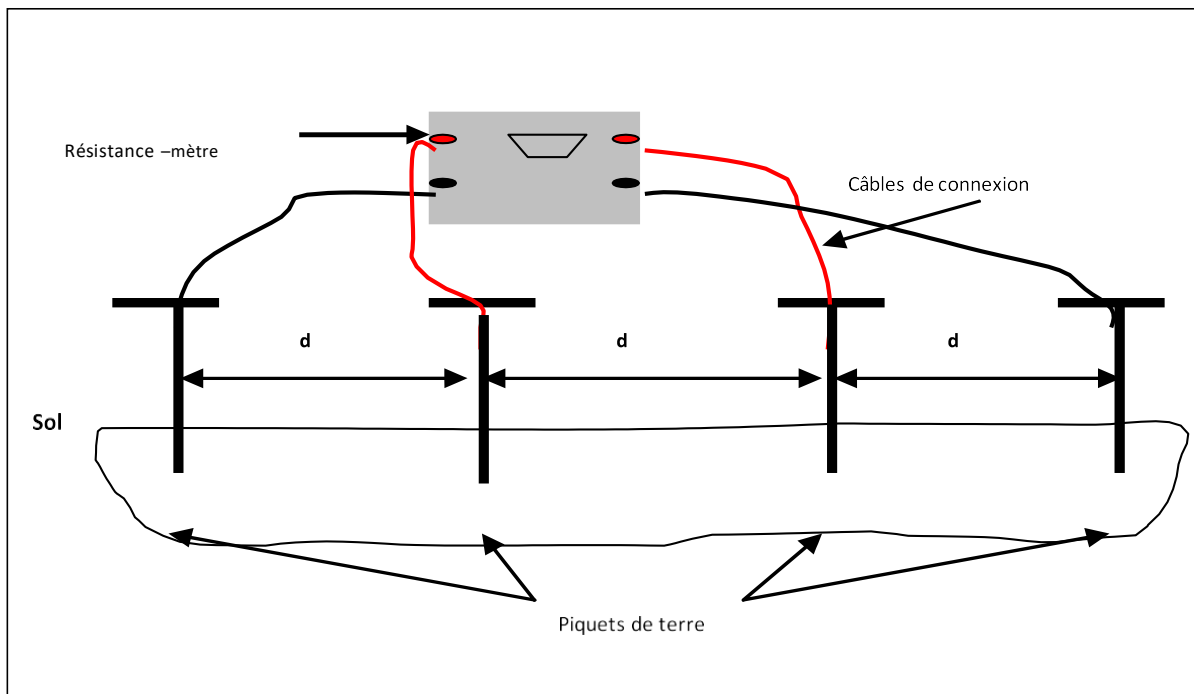


Figure III.1 Principe de fonctionnement de la méthode de Wenner.



Figure III.2 : Testeur de résistance de terre GEOHM.

III. 5 Calcule de la résistivité :

La résistivité moyenne du sol (ρ) peut être calculée en fonction de la résistance moyenne du sol mesuré avec l'application de la formule III.1 [51]

La formule concernant la valeur de la résistivité :

$$\rho = 2 \pi R d \quad (\text{III.1})$$

ρ = résistivité du sol en ($\Omega \cdot m$)

a = distance entre les piquets en (m)

R = résistance, valeur lue sur le mesureur de terre (Ω)

Accorder les quatre piquets au mesureur de terre, en respectant l'ordre de raccordement du plus près au plus éloigné S'assurer que les quatre entrées du mesureur de terre sont dés-shuntées Lire sur l'afficheur du mesureur de terre la valeur de la résistance Quelques exemples chiffrés cités dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.4 : exemples chiffrés de résistivités.

Electrolyte	Résistivité approximative (Ω)
Eau de mer	0.20 à 0.33
Eaux minéralisées	5 à 15
Eaux potables douces faiblement minéralisées	50 à 100
Marais	3 à 8
Argiles et marnes	5 à 20
Tourbières	50 à 200
Alluvions anciennes	10 à 20
Limons des plateaux	30 à 50
Terre sablonneuse	50 à 150
Sables sec/graves	2000

III. 6 PH de sol :

Les sols peuvent avoir une réaction acide ou alcaline ; d'autres peuvent être neutres. On mesure la réaction chimique du sol d'après la valeur de son pH. Des valeurs inférieures à 7 indiquent que le sol est acide ; des valeurs supérieures à 7 indiquent que le sol est alcalin. Plus le pH s'éloigne de la neutralité, plus fortes sont l'acidité ou l'alcalinité.

Mesure de PH :

La méthode la plus exacte pour mesurer le pH du sol consiste à utiliser un pH mètre électrique qui donne directement la valeur du pH quand on plonge des électrodes en verre dans une solution obtenue en mélangeant une part d'échantillon de sol avec deux parts d'eau distillée.

Pour obtenir une idée générale du pH du sol, on peut utiliser sur le terrain du papier de tournesol et des révélateurs de couleur. Le papier de tournesol, qui vire au rouge dans une solution acide et au bleu dans une solution alcaline.

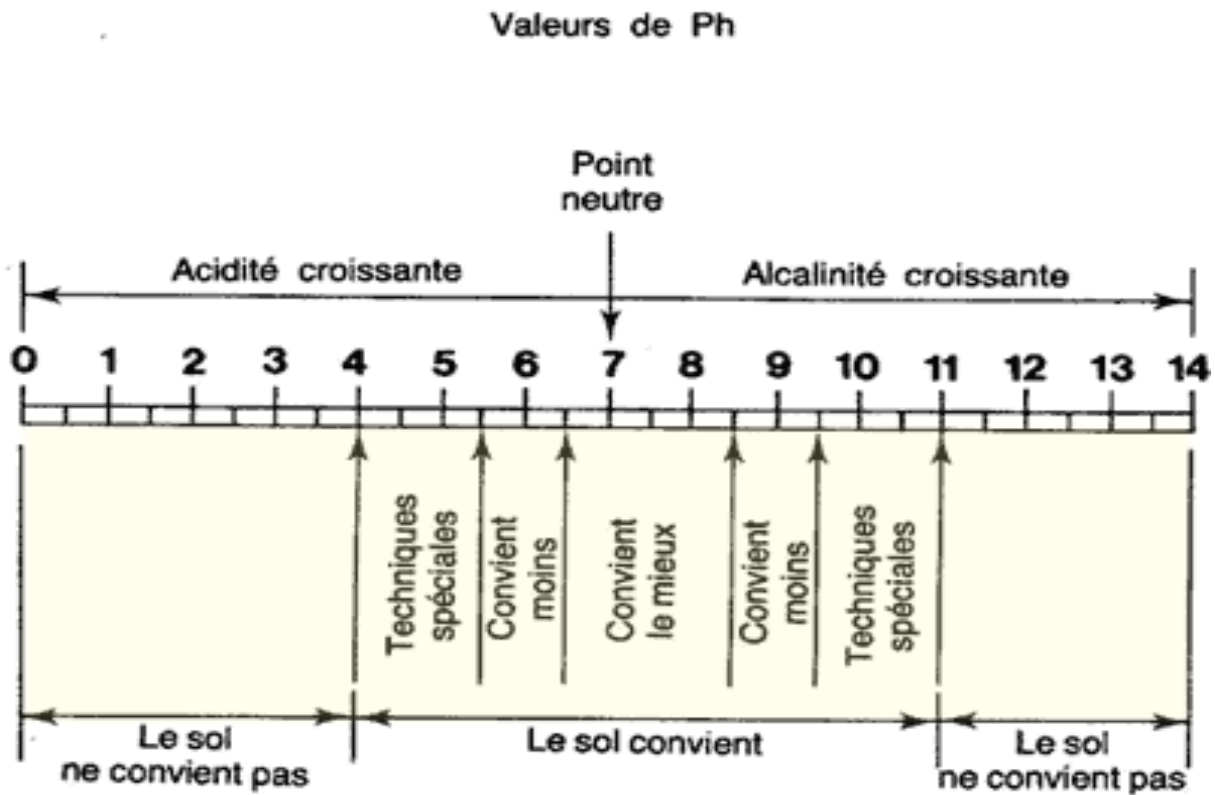


Figure III.3 : Matériels pour la mesure du pH

III. 7 L'humidité du sol :

L'humidité du sol peut être déterminée de plusieurs façons soit par méthode directe (mesures gravimétriques), soit par des méthodes indirectes [47].

Parmi ces dernières on peut citer :

Tableau III.5 : Méthodes de mesures indirectes de l’humidité.

<p>Sonde à neutrons :</p>	<p>-méthode reposant sur les propriétés de réflexion que possèdent les molécules d'eau à l'égard d'un flux de neutrons.</p>
<p>Technique TDR : (Time Domain Reflectométrie)</p>	<p>-méthode déterminant le constant diélectrique du sol, fonction de son état d'humidité.</p>

III. 8 Validité des mesures de la résistivité du sol :

Avant de procéder aux mesures de résistivité du sol, des mesures préliminaires doivent être effectuées sur le terrain à l’aide d’un matériel qui permet de détecter la présence de câbles, des conduites adjacentes enterrées ou tout autre conducteur pouvant influencer l’exactitude de la mesure [51]. Alors, il est important de ne pas effectuer la mesure de la résistivité directement au-dessus de la conduite mais plutôt à côté de celle-ci.

III. 9 Facteurs affectant la résistivité du sol :

La résistivité du sol gère l'efficacité du courant de corrosion ionique parcouru dans le sol. Néanmoins, le comportement résistif de ce dernier peut être affecté par de nombreux facteurs environnementaux tels que la qualité du sol (facteur géologique), la température (facteur métrologique) et les éléments chimiques dissous. Parmi les éléments chimiques les plus réagissant dans le processus d’activité de corrosion des structures métalliques souterraines, on cite les ions de chlorures, les sulfates, les phosphates et les bicarbonates de chlorure. La présence de ces anions dans le sol peut affecter considérablement l’exactitude des mesures obtenues, et par conséquent la validité de la méthode de mesure [51].

a) Effet de la qualité du sol :

Les sols entourant les conduites métalliques enterrées sont généralement caractérisés par leur conductivité électrique. Ils permettent aux charges ioniques et aux courants de corrosion développés de se mouvoir entre les surfaces anodiques et cathodiques. Par ailleurs, la vitesse de corrosion produite par les cellules de corrosion est relative au taux de résistivité du sol. Par exemple, si un sol présente une faible résistivité, la vitesse de corrosion sera grande et la structure sera rapidement endommagée [52].

b) Effet de l'humidité :

La présence de l'humidité dans le sol joue un rôle essentiel sur le processus des réactions physico-chimiques. Elle gère le phénomène de durcissement et de retrait, la perméabilité, l'immobilité des ions en plus de participer au développement des cellules de corrosion sur les conduites d'aqueduc. La croissance du taux d'humidité diminue la résistivité du sol et augmente son caractère agressif.

c) Effet de sel :

En période hivernale, l'utilisation du sel sur les chemins de passage des piétons et sur les routes en particulier a pour but de fournir la sécurité aux publics et facilite la circulation des transports. En fondant sous l'effet de l'humidité, le sel fait diminuer la température à laquelle l'eau gèle en prévenant la formation de verglas. Mais, les ions chlorures impliqués dans la composition du sel sont infiltrés dans le sol pour former des concentrations élevées en ions chlorures. Ainsi, l'accroissance du taux des ions chlorures dans le sol réduit la résistivité du sol et fait accroître la vitesse de corrosion sur les surfaces des conduites enterrées [52].

d) Effet de la température :

La variation de la température du sol intervient directement dans le processus de corrosion des structures métalliques enfouies. En fait, elle se manifeste sur le potentiel de corrosion, la résistivité du sol, le taux de corrosion et le transport des particules [53]. La diminution de la température dans le sol est inversement proportionnelle à sa résistivité.

III .10.Conclusion :

Les causes de corrosion sont multiples et complexes et résultent de réactions chimiques ou physiques entre le matériau et son environnement. La corrosion n'est pas encore complètement comprise, et cela s'explique par des tests établis qui ne nous permettent pas de prédire avec certitude le comportement d'un métal ou d'un alliage particulier lorsqu'il est exposé à la corrosion. D'une manière générale, nous devons être parfaitement préparés et prendre en compte les dommages causés par la corrosion, car cela nous coûte des pertes économiques importantes. Elle est réduite par une protection passive, une protection active.

CHAPITRE IV :
ETUDE ET CALCUL DE PROTECTION CATHODIQUE

Généralités :

Quel que soit le système utilisé pour fournir le courant de protection, l'efficacité de la protection dépend du potentiel atteint sur la surface du métal que l'on veut protéger. C'est la valeur du potentiel ainsi obtenu qui sert de critère pour estimer l'efficacité de la protection. Une installation de protection cathodique doit être suivie et contrôlée régulièrement pour s'assurer du respect de ce critère. Dans les milieux électrolytiques naturels comme les sols ou les eaux, une protection cathodique est efficace si le potentiel réel de l'acier au carbone (hors chute ohmique dans l'électrolyte entre la position de l'électrode de référence et la surface du métal) est plus négatif que **-850 mV** par rapport à une électrode au cuivre/sulfate de cuivre saturé, ce qui équivaut à **-780 mV** (généralement arrondi à **-800 mV**) par rapport à une électrode Ag/AgCl/eau de mer.

Dans certains cas, par exemple dans des milieux anaérobies (fort développement de bactéries sulfato-réductrices – BSR-), le potentiel doit être abaissé à **-950 mV** par rapport à une électrode au cuivre/sulfate de cuivre saturé, ce qui équivaut à **-880 mV** (arrondi à **-900 mV**) par rapport à une électrode Ag/AgCl/eau de mer.

Au contraire, dans les sols sableux très peu conducteurs, il est possible de se contenter de valeurs de potentiel moins négatives. La norme NF EN 12954 accepte **-750 mV** si la résistivité de l'électrolyte se situe entre 100 et 1000 Ω .m et même **-650 mV** au-dessus de 1000 Ω .m.

D'autres critères sont parfois retenus. Le plus répandu est celui qui admet que la protection est considérée comme suffisamment efficace si le potentiel de la structure protégée est plus négatif de plus de **100 mV** que le potentiel de corrosion. Il est généralement mesuré en "dépolariation" : le potentiel de l'acier est mesuré aussi rapidement que possible après coupure du courant de protection cathodique (on s'affranchit ainsi de la chute ohmique), puis quelques heures après. La remontée du potentiel doit être de plus de **100 mV**. Ce critère est un de ceux recommandés par les normes ou standards ISO 15589-1 ou NACE SP01-69.

Pour l'acier des armatures des parties en béton armé soumis à protection cathodique, en application de la norme NF EN ISO 12696, le respect d'un des critères suivants est considéré comme démontrant l'absence de corrosion significative : Un potentiel « OFF » instantané plus négatif que **-720 mV** mesuré avec une électrode de référence Ag/AgCl/0,5 M KCl (équivalent à **-785 mV** par rapport à une électrode au cuivre/sulfate de cuivre saturé)

; une dépolarisation de plus de **100 mV** à partir du potentiel « OFF » instantané sur une durée maximale de 24 h ; une dépolarisation de plus de 150 mV à partir du potentiel « OFF » instantané sur une durée supérieure à 24 h.

Le potentiel d'un acier sous protection cathodique ne doit pas être trop abaissé (ou, ce qui est équivalent, la densité de courant cathodique ne doit pas être trop élevée). En effet, dans ce cas, de l'hydrogène peut se former (risque de fragilisation de certains aciers) et le pH devenir très alcalin (endommagement du revêtement). Des critères liés aux risques de surpolarisation figurent dans les normes et recommandations techniques.

La valeur de **-1,20 V** par rapport à une électrode au cuivre/sulfate de cuivre saturé (hors chute ohmique dans l'électrolyte) peut, de manière conservative, être retenue comme une valeur à ne pas dépasser pour éviter le risque de fragilisation par l'hydrogène des aciers au carbone courants et celui de décollement cathodique des systèmes performants de revêtements utilisés.

Les principaux composants de la protection cathodique :

Poste de soutirage (Transfo-redresseur) :

Le poste de soutirage est un générateur de courant continu. Habituellement il est constitué par un transformateur-redresseur alimenté à partir du réseau électrique basse tension 220V.

Les postes transformateurs redresseurs sont de type 60 volts – 30 ampères en sortie continue, alimenté en courant alternatif 230 volts monophasé 50 Hz.

Les postes sont à fixation murale. Les dimensions des coffrets sont : 800 x 600 x 300 mm.

Détermination du nombre de postes de soutirage :

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

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 : $Z = \frac{\sqrt{R_c \cdot R_r(t)}}{2}$ 4.1

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).

A). Le potentiel naturel: c'est le potentiel stationnaire du métal dans le sol ; on le notera E_{nat} . L'expérience montre que pour l'acier cette valeur est dans l'intervalle de -0.045 à -0.617 volts, en revanche, si elle n'est pas connue on peut supposer que $E_{nat} = -0.55$ V.

B). Les potentiels de protection E_{max} et E_{min} : ils constituent un intervalle à l'intérieur duquel le métal ne s'oxyde point, ils sont choisis d'après le diagramme de Pourbaix. Pour l'acier la plus petite valeur en valeur absolue est de -850 mV. Quant à E_{max} ; il est choisie en fonction du type de revêtement, c'est-à-dire que pour une valeur donnée, le gain de potentiel correspondant ; E_{pmax} ne doit pas excéder -1200 mV pour un revêtement en PE tri-couche.

C). Gain de potentiel : c'est la différence de potentiel que prend le métal par rapport au potentiel naturel lorsqu'il est relié au poste de soutirage. On distingue un gain de potentiel de protection maximum et minimum, notés respectivement E_{pmax} et E_{pmin} .

$$E_{pmax} = E_{max} - E_{nat} \quad 4.2$$

$$E_{pmin} = E_{min} - E_{nat} \quad 4.3$$

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.

Les expressions de variation du potentiel et du courant à un point « x » quelconque de la conduite sont :

$$E(x) = E_{max} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot z}{2 \cdot \pi \cdot z + \rho m s} e^{-\alpha \cdot x} + \frac{\rho m s \cdot y}{2 \cdot \pi \cdot y \cdot z \sqrt{y^2 + x^2}} +$$

$$I(x) = \frac{E_{max}}{a \cdot Rr + \frac{E_{max}}{\pi \cdot y}} \cdot \left[e^{-\alpha \cdot x} + \frac{\rho m s}{\pi \cdot Rr} \cdot \operatorname{Arsh} \frac{x}{y} \right]$$

Où y (m) désigne la distance entre le lit d'anode et la conduite.

X est la distance entre le poste de soutirage et le point de mesure

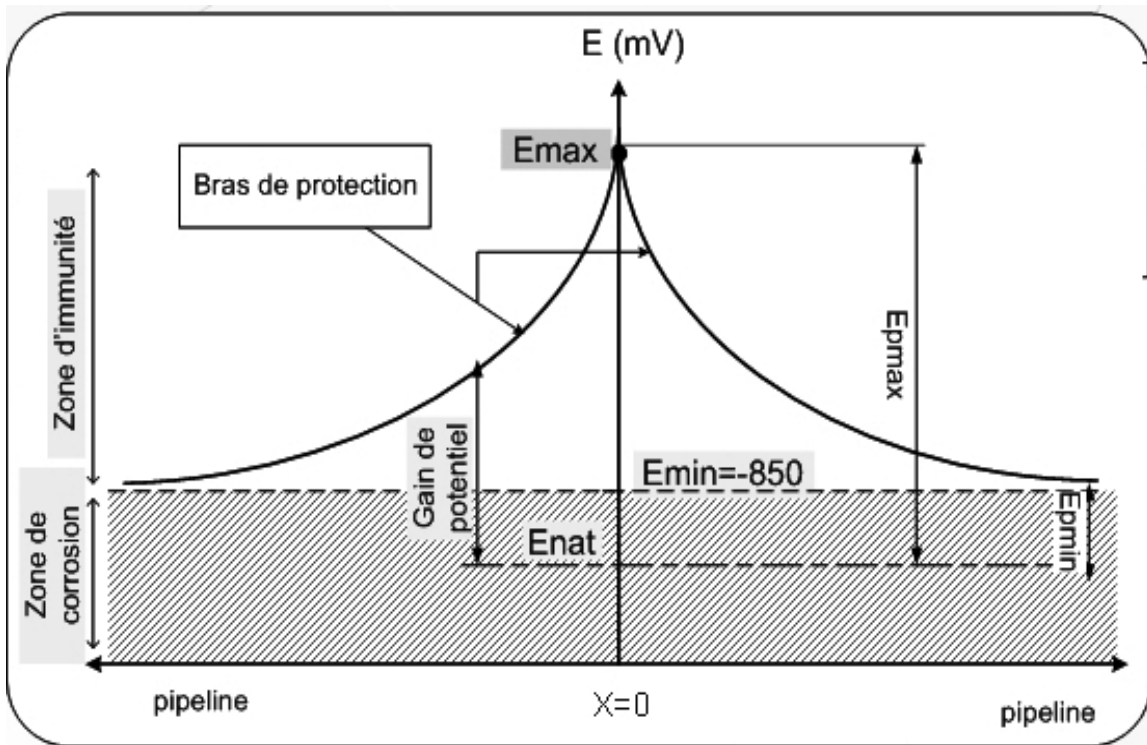


Figure IV.1: Variation du potentiel de protection le long d'une conduite

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:

$$k = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{E_{pmin}}{E_{nat}}\right)^2 \frac{2 * \pi * y * z + \rho sm}{2 * \pi * y * z}}} \tag{4.4}$$

Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage:Lp

On appelle longueur de protection L_p [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.

L_p s'exprime en mètre (m) et est déterminé suivant la relation :

$$L_p = \left(\frac{Z}{a}\right) \cdot \ln * \frac{2 * \pi * y * z}{k * \left(\frac{E_{pmin}}{E_{pmin}}\right) * (2 * \pi * y * z + \rho sm)} + \quad 4.5$$

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.

$$N_{ppc} = L / (L_p + 1) \quad 4.6$$

IV.2.1.5 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 :

$$I_{dr} = \frac{|E_{pmax}|}{Z \cdot [1 + 2 \cdot \text{Exp}(-a \cdot L_p)] + \frac{\rho sm}{2 \cdot \pi \cdot y}} \quad 4.7$$

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 :

$$I_{dr} = \frac{|E_{pmax}|}{Z \cdot [1 + 2 \cdot \text{Exp}(-a \cdot L_p)] + \frac{\rho sm}{2 \cdot \pi \cdot y}}$$

L'anode réactive et sacrificielle :

anode réactive :

Anodes branchées à un générateur électrique assurant la protection par courant imposé. Généralement ces anodes sont livrées dans un sac de jute contenant le régulateur (backfill) qui est composé d'un mélange de bentonite, de gypse et d'eau, avec une longueur de câble suffisante pour le raccordement. Ce régulateur permet une consommation régulière de l'anode et réduit la résistance de contact anode / sol.

Pour une anode de 20 Kg il faut :

- 50 Kg de bentonite,
- 12,5 Kg de gypse (sulfate de calcium),

- une grande quantité d'eau

Avant de remblayer la fouille, l'ensemble anode-régulateur doit être imbibé d'eau pour que le milieu contenant l'anode devienne une boue épaisse.

Les câbles de mesure ou de liaison (section 10 mm^2) seront brasés sur une plaque en acier de même nuance que celle du tube. Cette plaque sera soudée sur la conduite.

Les soudures et les brasures seront parfaitement isolées par un bon revêtement.

Installation des anodes avec prise de potentiel :

Les anodes doivent être posées comme suit :

- au milieu de l'ouvrage à protéger,
- à une distance supérieure à 3 mètres de la conduite à protéger et de tout autre ouvrage métallique enterré,
- dans des terrains les plus humides possible,
- la partie supérieure de l'anode doit être sous le niveau de la génératrice inférieure de la conduite.

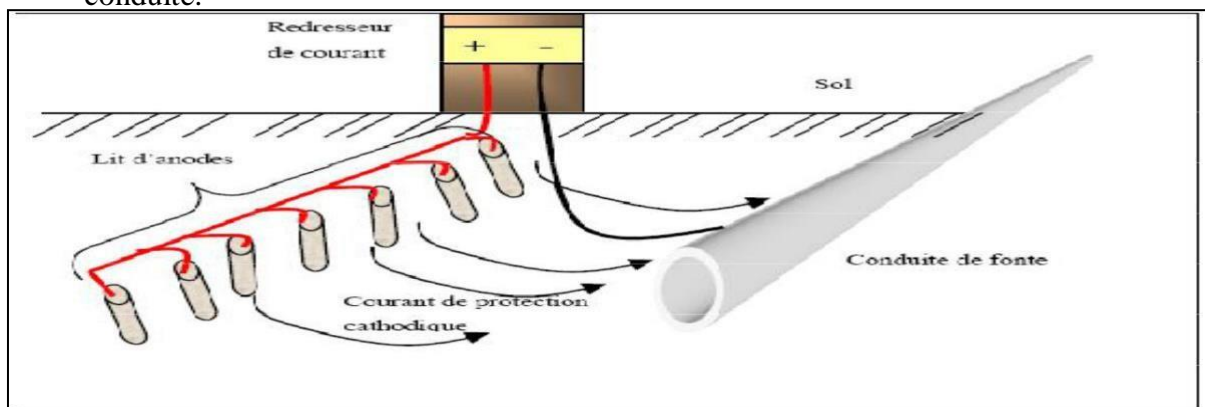


Figure IV.2 : Principes de la protection par anodes réactive.

Avantages et inconvénients des anodes à courant imposé :

- Le courant est ajusté à la valeur voulue,
- Système léger (peu d'anodes)
- Énergie électrique peu coûteuse.
- Difficulté d'installation,
- Coût élevé d'installation (isolation, écrans diélectriques),
- Système fragile et vulnérable.

IV.2.2.2. anode sacrificielle :

.1 Principe:

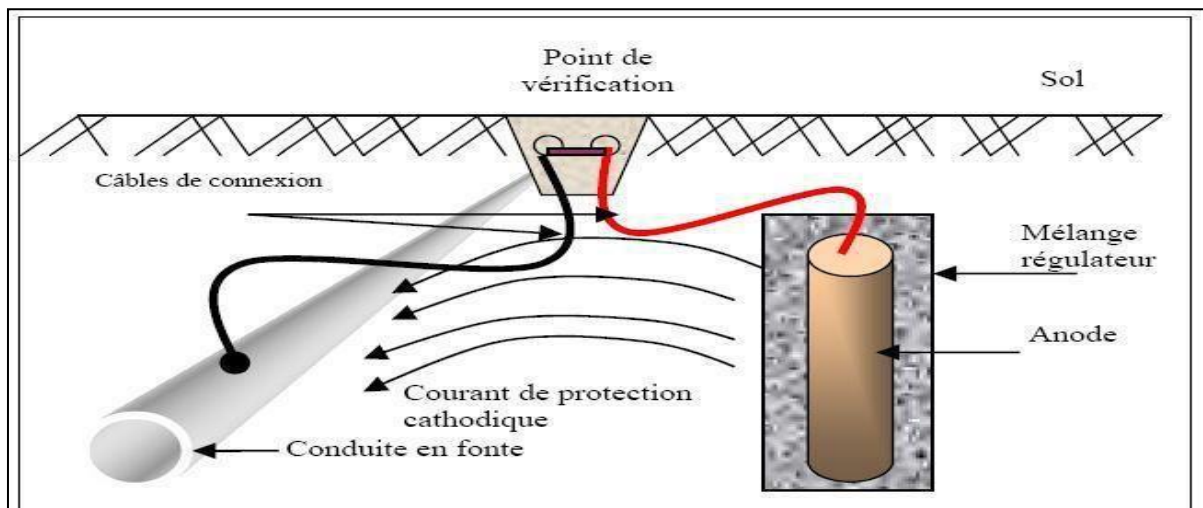
Le principe de protection par anodes sacrificielles est basé sur la connexion d'une anode ou une série d'anodes sacrificielles avec la structure à protéger en présence d'un milieu

électrolytique conducteur (sol ou eau) comme le montre la Figure(2.2).

La structure se polarise négativement jusqu'à ce qu'elle atteigne un niveau de potentiel suffisant et uniforme qui assure sacrifielles du système de protection est la source du processus de polarisation de la structure métallique.

Au fil des années, l'anode se consomme graduellement selon un principe électrochimique défini par la loi de Faraday qui stipule que la masse consommée d'une matière impliquée dans la réaction d'oxydo-réduction est directement proportionnelle à la quantité du courant délivré.

Ainsi, le taux de consommation de l'anode (g/A.ans) dépend de la quantité du courant émis par l'anode, de la taille de l'anode et sa composition chimique ainsi que de la structure à protéger et de l'environnement (C.S.R.P.P.G., 1986). La loi de Faraday (1.1) [1].



FigureIV.3:Principes de la protection par anodes sacrificielle

.2Durée de vie:

La protection par anodes sacrificielles n'a pas une durée indéfinie. Elle s'arrête avec la disparition du matériau sacrificiel .L'évaluation de sa durée de vie est estimée par calcul du dimensionnement des anodes, les anodes sacrificielles doivent satisfaire aux conditions suivantes :

- Avoir un potentiel d'électrode suffisamment négatif pour pouvoir polariser rapidement le matériau à une valeur suffisante;
- Elles ne doivent pas se polariser lors du passage du courant. En particulier, les produits de corrosion ne doivent pas former de film adhérent susceptible de modifier la valeur du potentiel.
- Elles doivent se corroder de manière uniforme dans le milieu considéré, et ne pas être fortement attaquées en l'absence de courant.

- Elles doivent avoir une bonne conductibilité, une bonne résistance mécanique, et pouvoir être obtenues facilement dans des formes et des dimensions variées.
- Elles doivent enfin avoir un coût économiquement supportable.

.3 Avantages d'application des anodes sacrificielles:

- Peu de surveillance.
- Installation facile.
- Pas d'isolement.

.4 Inconvénients d'application des anodes sacrificielles :

- Source de courant onéreuse.
- Débit dépendant du bon contact avec le métal à protéger.
- Système lourd et encombrant.

Choix du déversoir ou masse anodique :

C'est une masse de matériau conducteur d'électricité dont le rôle est d'injecter le courant dans le milieu où se trouve la structure à protéger. Sa résistance de contact avec le sol doit être le plus faible et sa masse est déterminée pour avoir sa longévité.

Le choix de type d'anode à installer dépend des conditions suivantes :

- Le milieu, la consommation (la durée de vie)
- La densité de courant admissible
- Le prix (fourniture de mise en œuvre)

Différents types d'anodes :

a) Anodes à base 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.

- consommation massique pratique : environ 11,9 kg/A. an
- potentiel dans le sol : - 1 100 mV (électrode Cu/Cu SO₄)
- écart de potentiel par rapport au critère de protection : 250 mV.

Les anodes en zinc 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.

Cependant, avec la faible tension de travail qu'elles proposent, on ne les emploie que dans les électrolytes très peu résistants et pour de faibles débits de courant.

Tableau IV.1: 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%

b) Anodes en magnésium :

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

- consommation massique pratique : environ 7 kg/ A.an
- potentiel dans le sol : - 1600 mV (électrode Cu/Cu SO4)
- écart de potentiel par rapport au critère de protection : 750 mV.

Les produits de corrosion qui se forment autour de l'anode modèrent leur efficacité après quelques années de service : pour diminuer cet inconvénient, l'anode est toujours posée dans une boue, mélange de gypse et d'argile colloïdale benthonique, 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.

Tableau IV.2: 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%

c) Anodes en 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.

La consommation massique pratique est d'environ 3,2 à 3,5 kg/A.an. pour un rendement électrochimique de 95 %.

Le potentiel en eau de mer (Ag/AgCl) est de - 1050 mV (sans activateur, ce potentiel serait de - 775 mV et donc insuffisant pour assurer une protection cathodique).

Tableau IV.3: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%

Consommation massique d'anode

La masse de métal consommé est donnée par la loi de Faraday :

$$m_a = \frac{1}{96500} \frac{A}{n} I_s * t \quad 4.8$$

m_a: masse d'anode (kg).

A: masse atomique du métal.

n: valence.

I_s: intensité de soutirage (A).

t: temps (s).

Calcul du nombre minimal d'anode :

Le nombre d'anodes minimal est donné par la formule : ***n***

$$n_a = \frac{D_v * I * m}{M * u}$$

u: le facteur d'utilisation de l'anode (généralement = 0,9)

m: la consommation pratique de l'anode en kg/A.an

D: la durée de vie souhaitée en an

Ma: la masse nette d'une anode en kg

Exercice :

Comme nous avons une ligne de diamètre nominale **500 mm** sur une longueur de **55 000 m**, la surface à protéger est de **86394 m²**.

a) Trouvez le nombre minimal d'anodes ?

Solution :

1) *Calcul de la Courant de protection :*

$$I_s = S * DDC \qquad 4.9$$

$$I_s = 86394 * 0,3 = 25918 \text{ mA}$$

$$I_s = 26 \text{ A}$$

DDC : densité de courant, en mA/m²

Selon la norme EN 12954, la densité de courant (DDC) retenue pour le dimensionnement est **0,3 mA/m²**. Cette densité correspond à de surfaces revêtues.

2) *Calcul la Consommation massique d'anode :*

La masse de métal consommé est donnée par la loi de Faraday :

$$m_a = \frac{1}{96500} * \frac{A}{n} * I_s * t$$

$$m_a = \frac{1}{96500} * \frac{24,305}{2} * 26 * 25 * 365 * 24 * 60 * 60$$

$$m_a = 2581,4 \text{ Kg}$$

$$m_a \approx 2,6 \text{ t.}$$

3) *Calculer le nombre minimal d'anode*

Comme nous avons vu que pour une longueur de 55 km, la consommation massique

d'anode est de **2581,4 kg** $n_a = \frac{D_v * I * m}{M * u}$

$$n_a = \frac{2581,4}{10} \approx 259 \text{ anodes}$$

Alors, on peut répartir ces 259 anodes le long du tuyau de 55 km sur une distance de 212 m chacun.

Calcul de la résistance anodique :

Le tableau suivant donne les formules le plus souvent utilisées :

Tableau IV.4 : Formule de la résistance anodique

Géométrie	Formule	Auteurs
Anode cylindrique : Verticale (près de la surface) Ou off-shore Horizontale ou verticale Profondément enfouie Enterré à faible profondeur	$Ra = \frac{\rho e}{2. \pi La} (Ln \frac{4La}{r} - 1)$	Dwight
	$Ra = \frac{\rho e}{2. \pi La} (Ln \frac{2La}{r} - 1)$	Dwight
	$Ra = \frac{\rho e}{2. \pi La} (Ln \frac{4La}{Da})$	Peter
Anode massive de surface S (cm2) utilisée en off-shore	$Ra = \frac{0,315 \rho e}{\sqrt{s}}$	Mac Coy
	$Ra = 1,33 \rho e s^{-0,727}$	Peterson

R_a: résistance de l’anode en Ω.

L_a : longueur de l’anode en m.

D: diamètre de l’anode en m.

ρ_e: résistivité du sol en Ω.m.

r: rayon de l’anode en m.

S : surface en cm².

Le dimensionnement des systèmes de protection doit tenir compte de la résistance électrique des éléments qui les composent. Pour cela, la résistance opposée au courant par l’électrolyte doit être évaluée. Les lignes de courant sont généralement très concentrées autour des anodes, on parle de « résistance d’anode ».

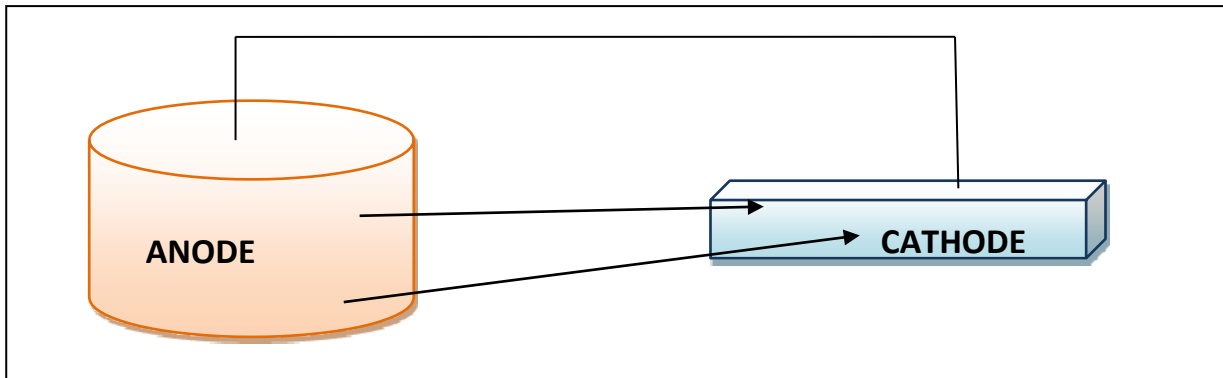
On le calcule à partir de la résistivité de l’électrolyte environnant et de la géométrie de l’anode.

REMARQUES :

La sévérité des corrosions est fonction des surfaces anodiques et cathodiques en présence.

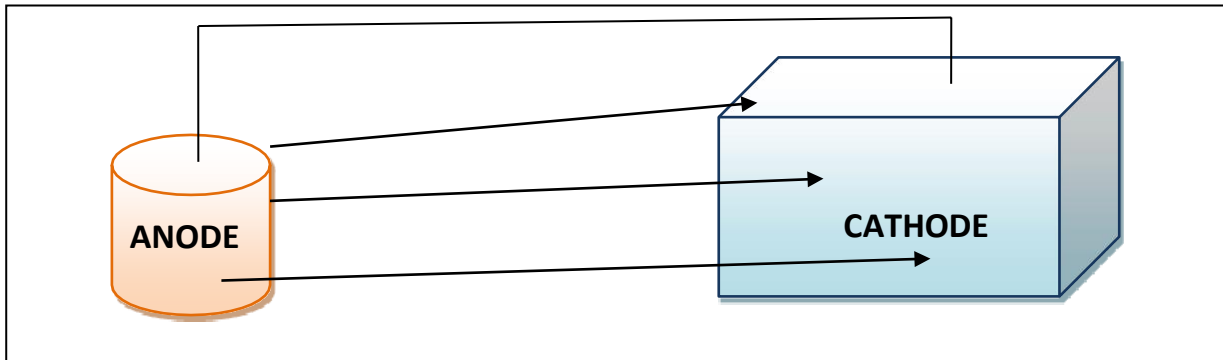
Grande surface anodique et petite surface cathodique :

DANGER A LONG TERME



Petite surface anodique et grande surface cathodique :

DANGER IMMEDIAT



Les câbles de connexion entre (déversoir anodique - générateur et générateur- structure à protéger) :

La conductibilité électrique est l'aptitude d'un matériau à faire circuler librement des charges électriques libres dont le courant électrique.

Elle dépend de plusieurs facteurs : nombre d'électron de valence du matériau, la concentration du matériau, la température, ...etc.

Les liaisons électriques doivent répondre à 2 critères :

- Faible résistance électrique
- Très bon isolement par rapport au milieu (en particulier la liaison déversoir)

Tableau IV.5: les sections de câble normalisées à utiliser en fonction de l'intensité

Intensité(A)	5	10	15	20	35	45	60
Section du câble(mm ²)	10	16	25	35	50	70	95
Résistance pour 100m(mΩ)	174	112	71	51	36	26	19

On n'utilise pas de câble de faible section pour des raisons de résistance mécanique.

Les soudures de câbles sur la structure à protéger doivent être faites par un procédé agréé par l'ingénieur soudeur en raison des risques de fissuration de l'acier.

Les raccordements câble à câble doivent être re Clampés et isolés par des kits de raccordements (boîte de jonction à résine époxy sous moule plastique).

Les liaisons des câbles sur les rails sont obtenues par soudure aluminothermique, par plaques soudées sur le rail ou par cosse à sertir.

Méthodes de soudage des fils sur le tube :

Procédé aluminothermique :

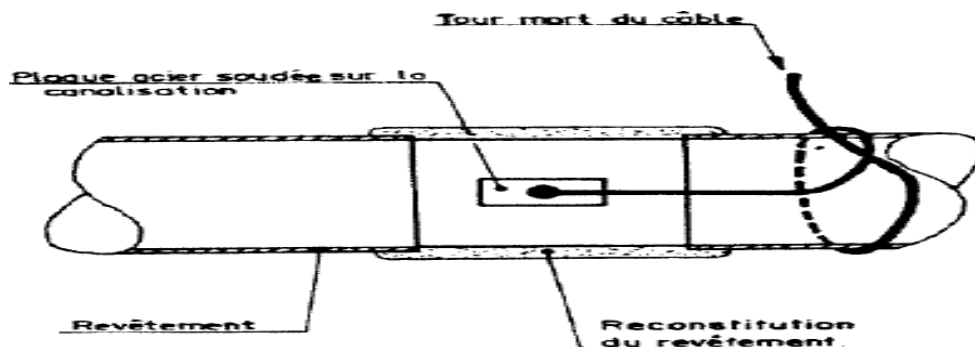
Cette soudure permet la réalisation d'assemblage correct sans outillage compliqué, avec un personnel non spécialisé.



Figure IV.4: Le principe de la soudure aluminothermique.

Le principe de la soudure aluminothermique est basé sur la production de hautes températures par réaction provoquée par la réduction de l'oxyde de cuivre sur l'aluminium en poudre. Cette réaction très rapide a un grand rendement thermique, elle produit un bain de cuivre, qui s'écoule dans le moule directement sur le conducteur formant ainsi une masse compacte et homogène.

Soudobrasage du câble sur une plaque acier soudée sur tube : La connexion du câble sur conduite est effectuée en brasant ce dernier sur une plaque en acier; la plaque est soudée à son tour sur la conduite.



Cosse à sertir :

Ce procédé met en œuvre un raccord Bimétal acier cuivre, il est constitué d'une partie ronde (ou carrée) en acier et une autre partie d'un tube en cuivre. Ces deux parties sont préalablement brasées et se présente comme une seule pièce .

La mise en œuvre de ce raccord sur chantier se fait comme suit :

- dénuder le câble électrique à connecter sur la canalisation à une longueur équivalente à la profondeur du tube cuivre du raccord, et braser,
- souder à l'arc la partie acier du raccord sur la canalisation.

Ces connexions se font sur les tubes bien préparés, dégagés de leur revêtement et bien décapés à la brosse métallique.

Après la réalisation des connexions les revêtements doivent être reconstitué.

La résistance d'un résisteur :

La résistance R d'un résisteur dépend de la résistivité ρ (l'inverse de la conductibilité) multiplié par la longueur du fil L et divisé par l'aire A de la section du résisteur :

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

Où **R**: La résistance du fil en ohm (Ω)

ρ : La résistivité du matériau ($\Omega \cdot m$)

A: L'aire de la section du fil (m^2)

L: La longueur du fil en mètre (m)

Tableau IV.6 : Résistivité de certains bons conducteurs .

Résistivité de certains bons conducteurs	
Matériau	Résistivité a 20°C ($\times 10^{-8} \Omega \times m$)
Argent	1,5
Cuivre	1,7
Or	2,4
Aluminium	2,8
Tungstène	5,6
Platine	11

Exercice :

Pour déterminer la résistivité d'un nouvel alliage, on vous donne un fil de 300 m de long et de 1,084 mm de diamètre. En appliquant une différence de potentiel de 2 volts entre les deux bouts du fil, vous mesurez un courant de 0,8 ampère.

- a) Trouvez la résistivité du nouvel alliage?
- b) Déterminez sa conductivité (l'inverse de sa résistivité)?

Solution :

Voici les informations géométriques de notre fil :

Longueur	Diamètre	Surface (disque)
$L = 300 \text{ m}$	$d = 1,084 \text{ mm}$ $= 1,084 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$A = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$ $= \frac{\pi d^2}{4}$ $= 9,22 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$

Évaluons la résistance du fil à partir de la loi d'Ohm :

$$\Delta v = RI \quad \Rightarrow \quad R = \frac{\Delta v}{I} \quad \Rightarrow \quad R = \frac{(2V)}{(0.8)} \quad \Rightarrow \quad R = 2.5 \Omega$$

Évaluons la résistance du fil à partir de la définition de la résistivité :

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \Rightarrow \quad \rho = \frac{AR}{L} \quad \Rightarrow \quad \rho = \frac{(9,22 \cdot 10^{-7} \cdot \text{m}^2)(2,5 \Omega)}{(300\text{m})} \quad \Rightarrow \quad \rho = 7,69 \cdot 10^{-9} \Omega \text{ m}$$

À partir de la résistivité, évaluons la conductivité :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad \Rightarrow \quad \sigma = \frac{1}{(7,69 \cdot 10^{-9} \cdot \Omega \text{ m})} \quad \Rightarrow \quad \sigma = 0,130 \cdot 10^9 (\Omega \text{ m})^{-1}$$

Entretien des installations de protection cathodique :

Des Contrôle :

1.1 Contrôle des prises de potentiel :

Vérifier la continuité électrique de chaque prise, son état général et son emplacement dans l'environnement.

IV.4. 1.2 Contrôle des raccords isolants :

Vérifier l'efficacité des raccords isolants en ligne non shunté en exploitation normale tels que raccords acier-acier, acier-fonte, acier-cuivre.(voir les raccords isolants sous branchement s'ils ne sont pas défectueux ou court-circuités)

IV.4. 1.3 Contrôle de la continuité électrique :

Vérifier la continuité électrique des différents shunts des accessoires en ligne et nettoyer les connexions.

IV.4. 1.4 Contrôle de l'isolement tube-fourreau et ouvrage d'art :

L'isolement entre tube-fourreau et tube-ouvrage métallique sont également vérifiés.

1.5 Contrôle des anodes réactives :

- Vérifier le serrage de la connexion et son parfait état de propreté,
- éliminer la couche d'oxyde éventuellement.

Contrôle des postes de soutirage (P.S):

- Vérifier le fonctionnement normal de l'équipement en procédant à des mesures de tension, et d'intensité; ce contrôle est systématique après chaque orage,
- relever la consommation électrique sur le compteur,
- contrôler le serrage des connexions,
- contrôler le bon état des fusibles.

Contrôle des postes de drainage (P.S):

Vérifier périodiquement l'état :

- du fusible provenant de la voie électrifiée, par une mesure du potentiel du câble
- correspondant par rapport au sol,
- du fusible de l'appareil de drainage,
- de l'éclateur de l'appareil de drainage,
- des lampes régulatrices du tableau,
- des diodes de silicium et (ou) au germanium en mesurant la résistance ohmique dans les deux sens.

Tableau IV.7 : Récapitulatif Des Différents Contrôles :

	CONTROLES A EFFECTUER	PERIODICITE
CONDUITES	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures des potentiels conduite/sol en Marche/Arrêt • Mesures des courants de protection. • Mesures des potentiels du fourreau/sol en Marche/Arrêt 	à minima 2 fois par an (hiver -été)
ANODES REACTIVES	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures des potentiels par rapport au sol : - de l'anode seule, - de la conduite seule, 	à minima 2 fois par an

	<ul style="list-style-type: none"> - de l'anode et de la conduite raccordés. • Mesures du débit de l'anode. 	
SOUTIRAGES DE COURANT	<ul style="list-style-type: none"> • Transformateur redresseur : <ul style="list-style-type: none"> - relevé de la tension, - relevé de l'intensité débitée, - relevé de la consommation d'énergie, - mesures de la tension de sortie, - mesures de l'intensité débitée, - vérification du bon fonctionnement, - vérification des câbles de connexion - contrôle de la valeur de la prise de terre des masses. 	<p>une fois par moi.</p> <p>à minima 2 fois par an (hiver - été).</p> <p>hebdomadaire et après chaque orage.</p> <p>hebdomadaire.</p> <p>tous les 3 ans.</p>
DRAINAGE	<ul style="list-style-type: none"> • relevé des indications de l'ampèremètre (mini-maxi pendant un intervalle de temps de 10 mn environ) : <ul style="list-style-type: none"> - enregistrement du potentiel conduite / sol. - enregistrement de l'intensité drainée. - enregistrement du potentiel rail / sol. • vérification du bon fonctionnement. • contrôle de la valeur de la prise de terre des masses. 	<p>tous les quinze jours</p> <p>à minima 2 fois par an trimestriel.</p> <p>hebdomadaire et après chaque orage.</p> <p>tous les 3 ans.</p>
FOURREAUX METALLIQUES	<ul style="list-style-type: none"> • mesure de potentiel conduite / sol, en Marche/Arrêt • mesure de potentiel fourreau / sol. en Marche/Arrêt 	<p>à minima 2 fois par an (hiver - été)</p>

Mesure :

Mesure Du Potentiel :

La mesure du potentiel d'une conduite enterrée consiste à mesurer la différence de potentiel entre le métal de la conduite et une électrode de référence, les deux étant plongés dans le même électrolyte (le sol).

La mesure du potentiel d'une canalisation se fait aux points accessibles du réseau. Ces points de mesure sont constitués par tous les accessoires de réseau isolés du sol (vannes, robinets de branchement d'abonné et parties aériennes) par les postes de détente et de comptage, par les prises de potentiel réalisées à l'aide d'un câble électrique soudé sur la conduite.

Mesure du potentiel des canalisations :

La canalisation étant soumise à différents régimes électrochimiques, plusieurs potentiels peuvent être mesurés.

- a) Peu après la pose du tube, après tassement des terres, mais avant l'installation de la protection cathodique, on mesure **le potentiel spontané ou initial de la canalisation** dans le sol. Cette mesure permet de mettre en évidence l'existence de piles géologiques ou d'influences électriques extérieures et de définir les zones anodiques de l'ouvrage, à plus haut risque de corrosion.
- b) La protection cathodique étant en service, on mesure le **potentiel dit à courant établi, ou potentiel "ON"**, qui est le potentiel du métal sous application du courant de protection cathodique.
- c) A la coupure du courant de protection, on mesure **le potentiel à courant coupé, ou potentiel "OFF"**. Si cette mesure pouvait se faire instantanément, quelques microsecondes après la coupure, ce potentiel pourrait représenter le potentiel réel du métal sous protection cathodique, sans prendre en compte les chutes de tension dues à la circulation des courants de protection dans le sol.
- d) Un certain temps après la coupure du courant de protection, on mesure **le potentiel de polarisation** du métal

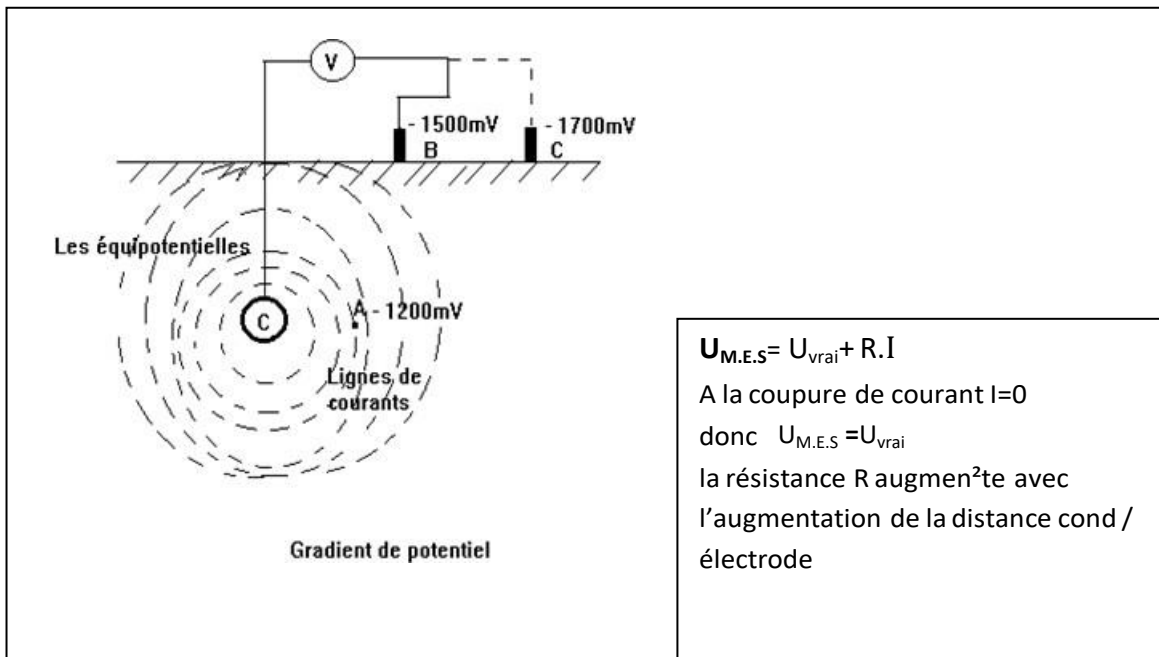


Figure IV.5 Principes de Mesure Du Potentiel ON/OFF .

IV.4.2. 3 Mesure du potentiel des Fourreaux Métalliques :

Comment contrôler l'isolement de la conduite par rapport à d'autres structures métalliques (Gaine métallique)

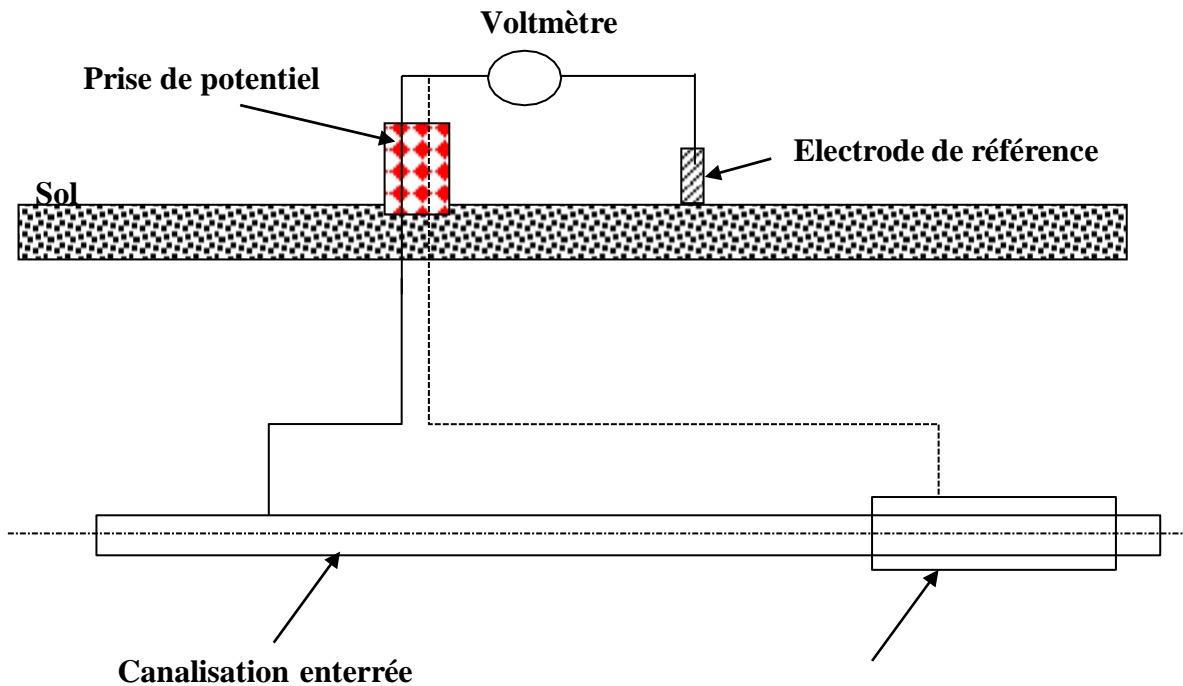


Figure IV.6 Méthode de Mesure du potentiel des Fourreaux Métalliques

IV.4.2. 4 Mesure du potentiel au point d'isolement:

Comment contrôler l'efficacité d'un raccord isolant.

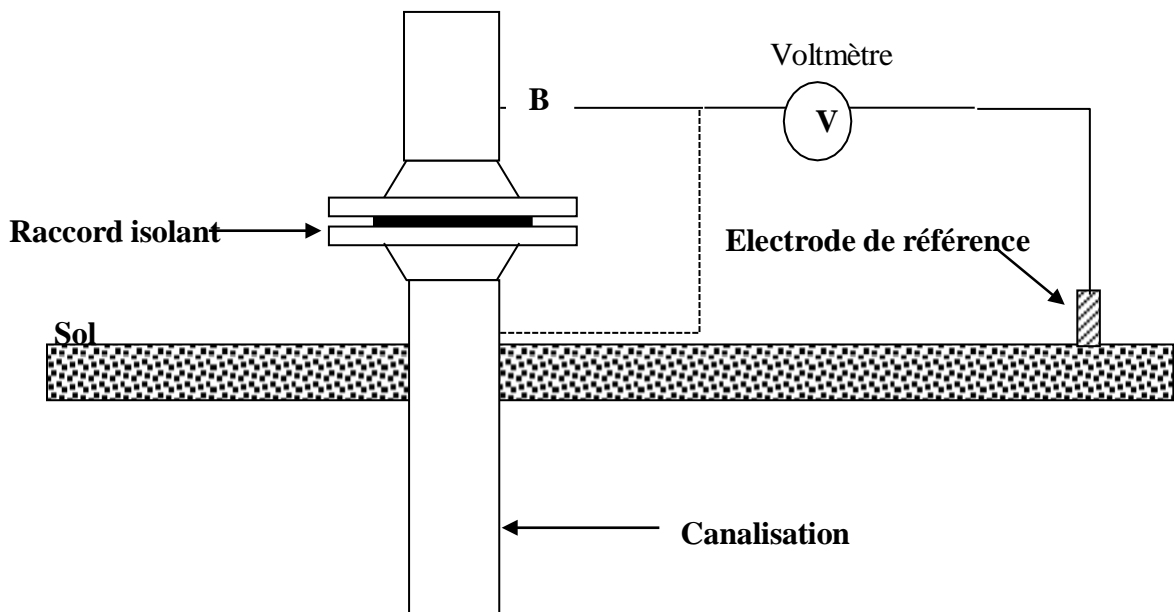


Figure IV.7 Méthode de Mesure du potentiel au point d'isolement

Mesure du potentiel de la anode réactive:

Comment contrôler l'efficacité d'une anode réactive .

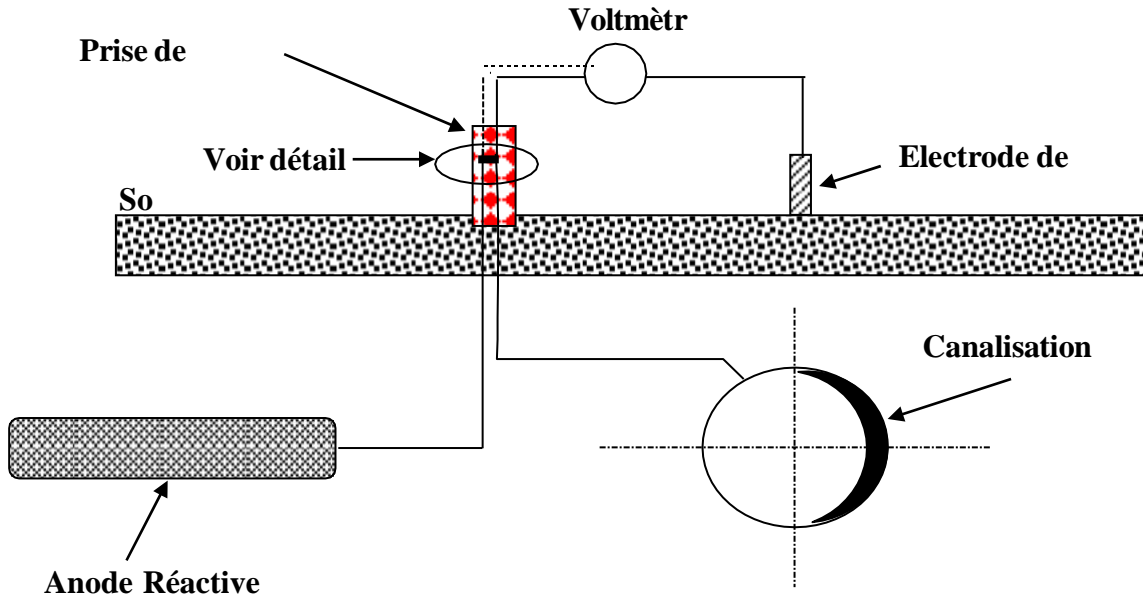


Figure IV.8 Méthode de Mesure du potentiel de la anode réactive.

Mesure la Tension De Sortie De Transfo-Redresseur :

Pour mesurer la tension d'un générateur de courant on se servira d'un voltmètre qui sera toujours branché en parallèle sur le circuit à mesurer.

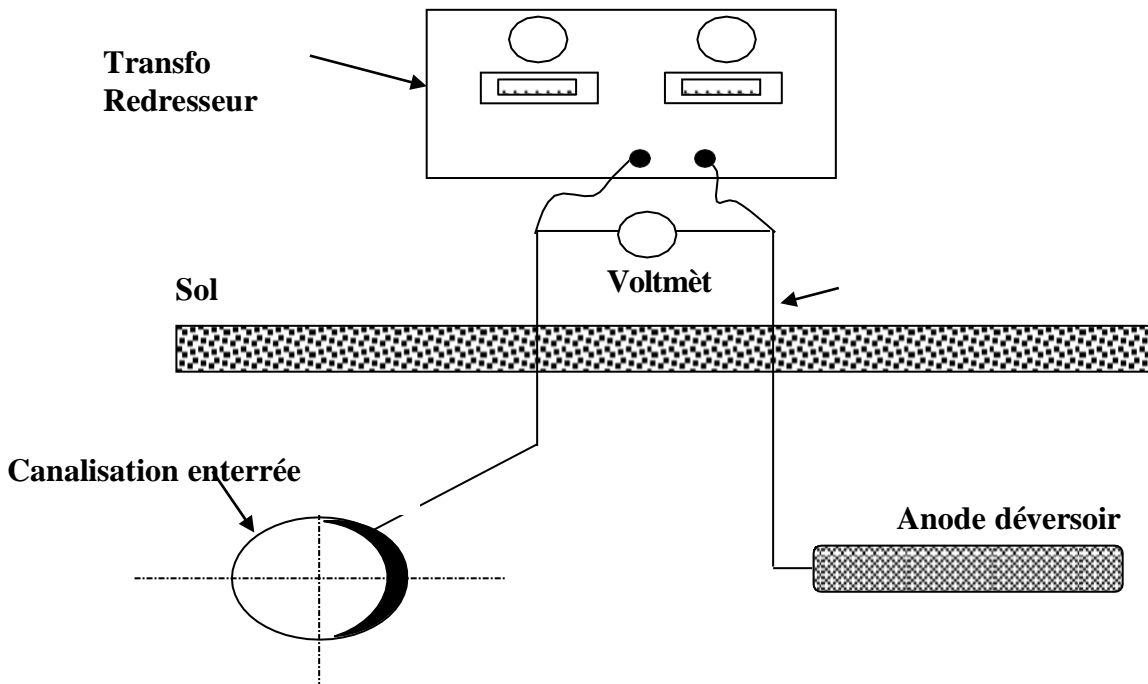


Figure IV.9 Méthode de Mesure la Tension De Sortie De Transfo-Redresseur

REMARQUES :

le voltmètre se branche en dérivation (en parallèle) avec le récepteur dont on veut contrôler la DDP.

La borne (+) du voltmètre est relié avec la borne (+) du transfo- redresseur.

la borne (-) du voltmètre est relié avec la borne (-) du transfo- redresseur.

2

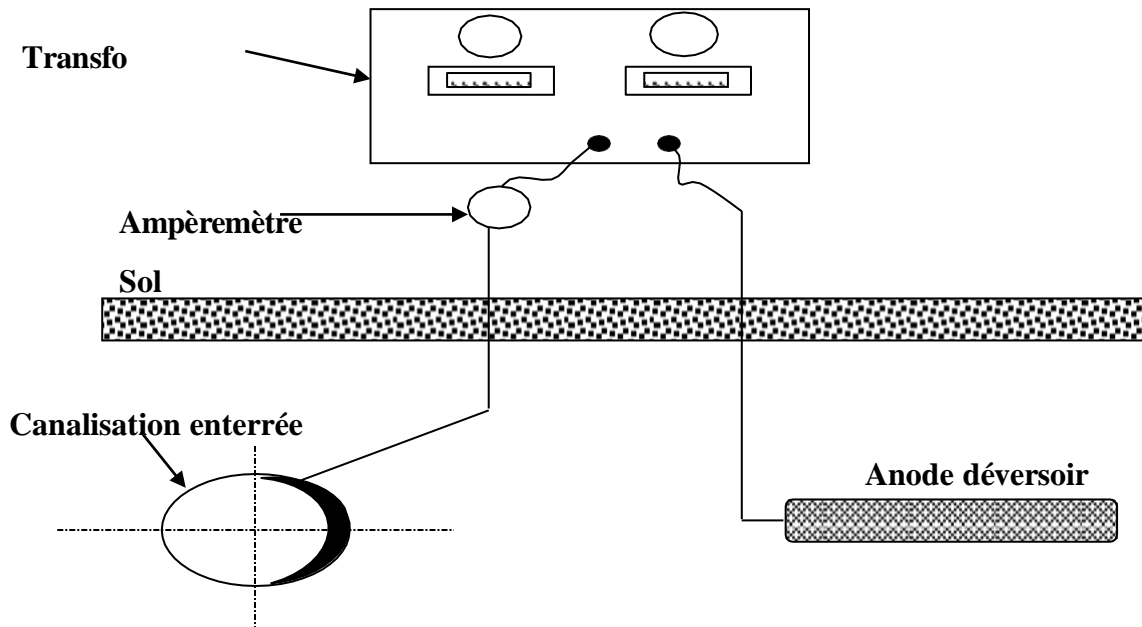


Figure IV.10 Méthode de Mesure de l'intensité

Cas du Poste de soutirage

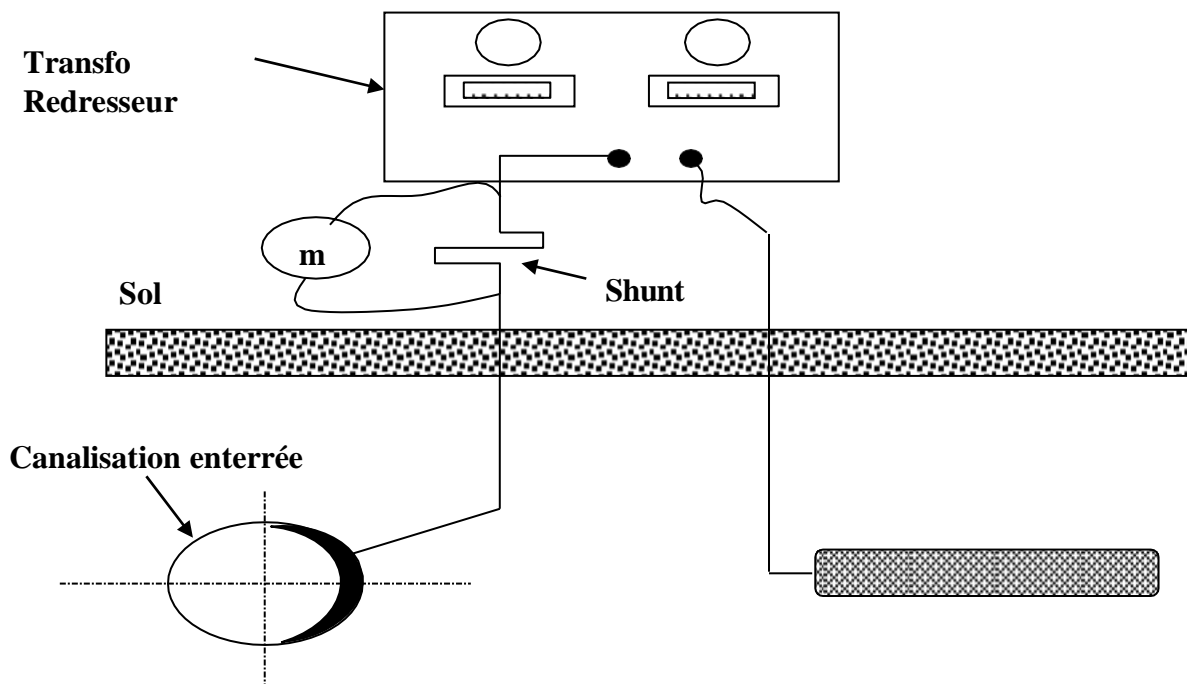


Figure IV.11 Méthode de Mesure de l'intensité (shunt)

Problème:

Comme nous avons une ligne de diamètre nominale **400 mm** sur une longueur de **120000 m** épaisseur de la conduite δ , la surface à protéger est de **153209,5m²**.

- a) **1.** Calculer du nombre de postes de protection cathodique (L_{ppc}) ?
- b) **2.** Trouvez le nombre minimal d'anodes pour la protection (N_a) ?
- c) **3.** Calcul de la résistance de terre du déversoir pour des anodes posées horizontalement et verticalement

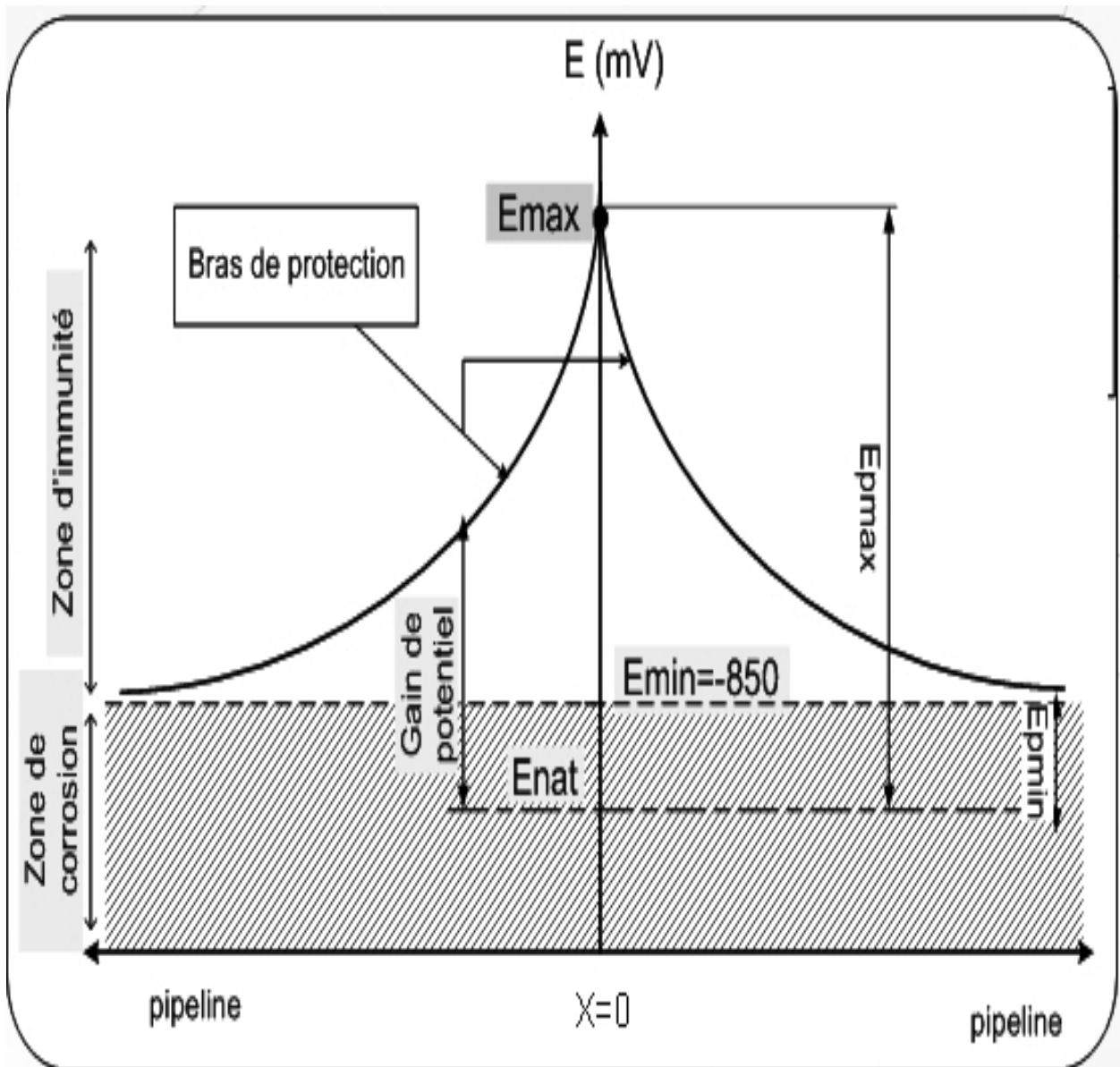


Tableau IV.8 : Caractéristique du gazoduc.

Longueur de la conduite	95 602 m
Diamètre	16 Pouce (406.4 mm)
Epaisseur moyenne δ	7.9 mm
Nuance acier	X52
Résistivité électrique du matériau ρ_c	0.18 U.mm ² /m
Type de revêtement	PE
Coefficient de vieillissement du revêtement β	0.124 an ⁻¹
Résistance d'isolement initial du revêtement R_{ti}	20000 Ω .m ²
Potentiel naturel du tube E_{nat}	550 (-) mV
Potentiel de protection Min	850 (-) mV
Potentiel de protection Max	1700 (-) mV

Tableau IV.9 :Caractéristiques anodes zinc (type 7Z nue).

CARACTERISTIQUES			COMPOSITION	
Zinc pur	99,996%	allié	Cu	0,01%
			Al	0,10 – 0,20 %
Forme	0,05	Cylindrique \varnothing m	Fe	0,00%
			Cd	0,04 – 0,06 %
Longueur	1,5	m	Cd	0,04 – 0,06 %
			Pb	0,01%
Connexion	16	par câble 16mm ² de 10 m	En sac de jute avec enrobage	
Poids net	7	kg	Revêtement par sac plastique pour manutention	
Poids unitaire approximatif	32	kg	CAPACITE :	789 AH / KILO

Solution

a) Calcul du nombre de postes de protection cathodique ?

$$N_{ppc} = L / (L_p + 1) \quad 4.6$$

a).01 Calcul (ρ_{sm}) (résistivité moyenne du sol) :

$$\rho_{sm} = \rho_{moy} = \frac{1}{n} \sum \rho_i = 400 \Omega \cdot m$$

ρ_{sm} : résistivité moyenne du sol en [U.m] ;

l_i, ρ_i : longueur du tronçon i correspondant à la résistivité ρ_i ;

n : nombre de tronçon.

a).02. Calcul (L_p) : (la longueur de protection d'un poste de soutirage) :

$$L_p = \left(\frac{2}{a}\right) \cdot \ln * \frac{E_{pmin}^{2 * \pi * y * z}}{k * \left(\frac{E_{pmin}}{E_{pmin}}\right) \cdot (2 * \pi * y * z + \rho_{sm})} + \quad 4.5$$

a).02.1 Calcul (α) : (Constante de distribution du potentiel le long de la conduite) :

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_c}{R_r(t)}}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{1,82 \cdot 10^{-5}}{4,83 \cdot 10^3}} = 6,141 \cdot 10^{-5} \text{ (1/m)}$$

a).02.1.1 Calcul (R_c) : (Résistance longitudinale de la conduite par unité de longueur) :

$$R_c = \frac{\rho_c}{\pi \cdot (\phi_{ext} - \delta) \cdot \delta}$$

$$R_c = \frac{0,18}{3,14 \cdot (406,4 - 7,9) \cdot 7,9} = 1,82 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot m$$

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

ρ_c de l'acier peut être accepté pour $0,245 \Omega \cdot mm^2/m$;

ϕ_{ext} : diamètre extérieur de la structure [mm] ;

δ : épaisseur moyen de la conduite [mm].

a).02.1.2 Calcul (R_r) : (Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la conduite) :

$$R_r(t) = \frac{R_{tm}}{\pi \cdot (\phi_{ext})}$$

$$R_r(t) = \frac{6160,97}{(3,14 \cdot 406,4)} = 4,83 \cdot 10^3 \Omega \cdot m$$

R_{tm} (Résistance transitoire « conduite-sol » (valeur moyenne))

ϕ_{ext} : diamètre extérieur de la structure [mm] ;

$$R_{tm} = \frac{R_{ti}}{(\beta.t)} [1 - e^{(-\beta.t)}$$

$$R_{tm} = \frac{20000}{(0,124.25)} [1 - e^{(-0,124.25)}] = 6160,97 \Omega . m^2$$

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

$\beta_{acierpeutetre}$ égal à 0.124 (1/an)

t : durée d'exploitation du système de protection [ans]

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

a).02. 1.3 Calcul (Z) (Résistance d'entrée d'une conduite revêtue) :

$$Z = \frac{\sqrt{R_c.R_r(t)}}{2} \quad 4.1$$

$$z = \frac{\sqrt{1,82. 10^{-5}. 4,83. 10^3}}{2} = 0,534 \Omega$$

a).02. 1.4 Calcul (K) :(Coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins) :

$$k = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \frac{E_{pmin}}{E_{pmin}} \frac{2*\pi*y*z + \rho sm}{2*\pi*y*z}}} \quad 4.4$$

$$k = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{-300}{-1150}\right)^2 \frac{2.3,14.170.0,148 + 400}{2.3,14.170.0,148}}} = 0,534$$

a).02. 1.5 Calcul (E_{pmax}) : (Les potentiels de protection) :

$$E_{pmax} = E_{max} - E_{nat} \quad 4.2 \quad E_{pmax} = -1700 - (-(550)) = -1150 V$$

a).02. 1.6 Calcul (E_{pmin}) :(Les potentiels de protection) :

$$E_{pmin} = E_{min} - E_{nat} \quad 4.3 \quad E_{pmax} = -850 - (-(550)) = -300 V$$

a).02.1.7 Calcul (L_p) (la longueur de protection d'un poste de soutirage) :

$$L_p = \left(\frac{2}{a}\right) . \ln * \frac{E_{pmin}}{k*\left(\frac{E_{pmin}}{E_{pmin}}\right).(2*\pi*y*z + \rho sm)} + \quad 4.5$$

$$L_p = \left(\frac{2}{6,141. 10^{-5}}\right) . \ln \left[\frac{2,3,14.170.0,148}{0,534. \left(\frac{-300}{-1150}\right) . (2,3,14.170.0,148 + 400)} \right] = 23,125 Km$$

a).02. 2. Calcul (N_{ppc}) nombre de postes de protection cathodique :

$$N_{ppc} = L/(L_p + 1) \quad 4.6$$

$$N_{ppc} = \frac{120000}{(23125 + 1)} = 4,97 \approx 5 \text{ postes}$$

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

b).03. Calcul (Na) (nombre d'anodes minimal pour la protection) :

$$Na = 10. \frac{I_{dr} . t . m}{\mu . Ma}$$

b).03.1 Calcul (I_{dr}) (de l'intensité du courant nécessaire au début et à la fin de l'exploit) :

$$I_{dr} = \frac{|E_{pmax}|}{Z.[1+2.Exp(-a.Lp)] + \frac{\rho sm}{2.\pi.y}} \quad 4.7$$

$$I_{dr} = \frac{1150}{0,148. [1 + 2 Exp(-6,141. 10^{-5}. 23124,80)] + \frac{400}{2,3,14.170}} = 1,935 \text{ [A]}$$

$$I_{dr}(0) = \frac{|E_{pmax}|}{Z(0). [1 + 2. Exp(-a. Lp)] + \frac{\rho sm}{2. \pi. y}}$$

$$I_{dr}(0) = \frac{1150}{0. [1 + 2 Exp(-6,141. 10^{-5}. 23124,80)] + \frac{400}{2,3,14.170}} = 1,49 \text{ [A]}$$

b).03.2.1 Calcul (ma) Consommation massique d'anode (zinc)

$$Ma = \frac{1}{96500} * \frac{A}{n} * I_s * t \quad 4.8$$

$$Ma_{Zinc} = \frac{1}{96500} * \frac{26,38}{2} * 46 * 25 = 0,39 \text{ Kg}$$

b).03.2.2 Calcul (ma) Consommation massique d'anode (Mag)

$$Ma_{Mag} = \frac{1}{96500} * \frac{24,305}{2} * 46 * 25 = 0,14 \text{ Kg}$$

b).03.2.3 Calcul (ma) Consommation massique d'anode (Alu)

$$Ma_{Alu} = \frac{1}{96500} * \frac{26,982}{3} * 46 * 25 = 0,11 \text{ Kg}$$

b).03.2.4 Calcul (Is) (Courant de protection) :

$$I_s = S * DDC \quad 4.9 \quad I_s = 153209 * 0,3 = 46 \text{ [A]}$$

DDC : densité de courant, en mA/m² Selon la norme EN 12954, la densité de courant (DDC) retenue pour le dimensionnement est 0,3 mA/m². Cette densité correspond à de surfaces revêtues.

b).03.3 Calcul (Na) (nombre d'anodes minimal pour la protection)

Nous choisissons l'un de ces types :

$$Na = 10. \frac{Idr . t . m}{\mu . Ma}$$

$$\text{Soit Ceci : } Na (\text{zinc}) = 10. \frac{1,935 . 25 . 10}{0,3 . 0,39} = 38 \text{ Anodes}$$

$$\text{Ou : } Na (\text{Mag}) = 10. \frac{1,935 . 25 . 10}{0,3 . 0,14} = 14 \text{ Anodes}$$

$$\text{Ou: } Na (\text{Alu}) = 10. \frac{1,935 . 25 . 10}{0,3 . 0,11} = 11 \text{ Anodes}$$

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

t : durée de l'exploitation [ans]

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

Ma : la masse d'une anode [Kg]

μ : coefficient d'utilisation de l'anode

C).4 Calcul de la résistance de terre du déversoir pour des anodes posées horizontalement et verticalement :

C).4.1 Calcul de la résistance de polarisation

$$R_{pol} = \frac{U_a}{I_{da}}$$

$$R_{pol} = \frac{2}{1,7125} = 1,17 \Omega$$

U_a : composante de polarisation de la chute de tension des anodes

I_{da} : moyenne arithmétique entre $I_{dr(0)}$ et I_{dr}

C).4.2 Calcul de la résistance du matériau des anodes (zinc ,magn , alum):

$$R_{ma} = \rho \frac{la}{Sa}$$

$$R_{ma \text{ zin}} = 5,9. x10^{-8} \frac{1,5}{1,5 . 3,14 . 0,05} = 3,76 \cdot 10^{-8} \Omega$$

$$R_{ma \text{ Mag}} = 0,23. x10^{-6} \frac{1,5}{1,5 . 3,14 . 0,05} = 1,46 \cdot 10^{-6} \Omega$$

$$R_{ma \text{ Alu}} = 2,82. x10^{-8} \frac{1,5}{1,5 . 3,14 . 0,05} = 1,8 \cdot 10^{-7} \Omega$$

C).4.3 Calcul de la résistance totale des anodes (Nous choisissons le zinc) :

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

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

$$RH = \left(\frac{0,00159 \cdot \rho_{sm}}{la} \right) \cdot \ln \frac{4 \cdot la^2 + 4 \cdot la \sqrt{S^2 + la^2}}{da \cdot S} + \frac{S}{la} - \frac{\sqrt{S^2 + la^2}}{la} - 1 +$$

$$RaH = \left(\frac{0,00159 \cdot \rho_{sm}}{1,5} \right) \cdot \ln \frac{4 \cdot 1,5^2 + 4 \cdot 1,5 \sqrt{1,5^2 + 1,5^2}}{0,05 \cdot 1,5} + \frac{1,5}{1,5} - \frac{\sqrt{1,5^2 + 1,5^2}}{1,5} - 1 = 180,40 \Omega$$

ρ_{sm} : résistance du backfill en [$\Omega \cdot m$]

l_a : longueur de l'anode en [m]

d_a : diamètre de l'anode en [m]

S : la profondeur de l'anode en [m]

N_a : nombre d'anodes composant le lit d'anodes

E_a : espace en deux anodes consécutives [m]

Le facteur F, est donné par

$$F = 1 + \frac{\rho_{sm}}{\pi \cdot (E_a + l_a) \cdot RH} \ln(0,66 \cdot N_a)$$

$$F = 1 + \frac{400}{3,1416 \cdot (6 + 1,5) \cdot 180,4} \ln(0,66 \cdot 37) = 1,30$$

On déduit donc la résistance du lit d'anode par

$$R_t = \frac{RH}{N_a} \cdot F$$

$$R_t = \frac{180,40}{37} \cdot 1,30 = 6,24 \Omega$$

Pour des anodes placées horizontalement, la résistance du déversoir est d'après l'équation

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

$$R_{aH} = 3,76 \cdot 10^{-7} + 6,24 + 1,17 = 7,408 \Omega$$

Cas d'un lit d'anodes composé d'anodes posées verticalement Contrairement au premier cas,

R_t est plus facile à déterminer ici ; elle s'obtient par l'application de la formule

$$R_{tV} = \left(\frac{0,00159 \cdot \rho_{sm}}{N_a \cdot l_a} \right) \cdot \ln \frac{8 \cdot la^2}{da} - 1 + \frac{2l}{a} \ln(0,656 \cdot N_a) +$$

$$R_{tV} = \left(\frac{0,00159 \cdot 40000}{38 \cdot 1,5} \right) \cdot \ln \frac{8 \cdot 1,5^2}{0,05} - 1 + \frac{2 \cdot 1,5}{6} \ln(0,656 \cdot 38) + = 7,31 \Omega$$

La résistance du déversoir correspondant est donc :

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

$$R_{aV} = 3,76 \cdot 10^{-7} + 7,31 + 1,17 = 8,475 \Omega$$

C).4.4 Calcul de la tension aux bornes du poste de soutirage

$$U = \frac{R_{tot} \cdot I_{dr}}{n}$$

$R_c = R_{c1} + R_{c2}$: 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]

résistance due à la protection passive = z [Ω]

$$R_{ps} = Z * I_{dr}$$

$$R_{ps} = 0,148 * 1,93 = 0,287 \Omega$$

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

$$R_c = \rho_c \frac{Lc = y}{Sc}$$

$$R_{cable} = 1,75 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{170}{1,6 \cdot 10^{-5}} = 0,186 \Omega$$

Où ρ : la résistivité des matériaux du câble ;

L : la longueur du câble ;

R_{max} : la résistance.

Pour des anodes posées horizontalement :

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

$$R_{totH} = 7,408 + 0,186 + 0,287 = 7,88 \Omega$$

Pour des anodes posées verticalement :

$$R_{totV} = 8,475 + 0,186 + 0,287 = 8,948 \Omega$$

la tension aux bornes du poste de soutirage :

$$U = \frac{R_{tot} \cdot I_{dr}}{n}$$

$$U_H = \frac{7,88 \cdot 1,93}{0,90} = 16,944 \text{ V}$$

$$U_V = \frac{8,948 \cdot 1,93}{0,90} = 19,24 \text{ V}$$

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 η .

C).4.5 Calcul de la puissance requise par le poste

$$P = U \cdot I_{dr}$$

$$P_H = 16,944 \cdot 1,93 = 32,789 \text{ W}$$

$$P_H = 16,944 \cdot 1,93 = 32,789 \text{ W}$$

Tableau IV.10 : Influence de « y » sur le système de protection (Anodes ZINC) (« y » variable « $\rho_{sm} : 400 \Omega \cdot m$ » constante)

Y (m)	Nppc	Idr (A)	Na ZINC	Rtot (Ω)		P (W)	
				RtotH	RtotV	P _H	P _V
40	-5,13	0,375	7,30	29,629	34,188	4,634	5,347
60	-17,22	0,679	13,22	17,760	20,467	9,109	10,497
80	43,92	0,950	18,49	13,450	15,463	13,491	15,509
100	12,49	1,199	23,33	11,179	12,817	17,845	20,459
130	7,02	1,537	29,92	9,262	10,574	24,315	27,759
170	4,97	1,935	37,66	7,880	8,948	32,789	37,231
200	4,27	2,200	42,82	7,252	8,203	39,008	44,128
230	3,83	2,441	47,51	6,811	7,678	45,102	50,843
260	3,53	2,661	51,80	6,489	7,291	51,063	57,378
300	3,25	2,926	56,96	6,180	6,916	58,804	65,815
330	3,09	3,107	60,47	6,009	6,707	64,455	71,943

Tableau IV.11: Influence de « ρ_{sm} » sur le système de protection (Anodes ZINC) (« y = 170 » constante « $\rho_{sm}(\Omega \cdot m)$ » variable)

$\rho_{sm}(\Omega m)$	Nppc	Idr (A)	Na ZINC	Rtot (Ω)		P (W)	
				Rtot H	Rtot V	P _H	P _V
100	2,38	4,492	87,423	2,734	2,859	61,287	64,093
150	2,697	3,720	72,407	3,181	3,404	48,919	52,342
200	3,046	3,164	61,582	3,800	4,143	42,267	46,087
250	3,434	2,744	53,407	4,581	5,069	38,327	42,409
300	3,874	2,416	47,015	5,521	6,178	35,799	40,056
350	4,381	2,152	41,879	6,621	7,470	34,061	38,432
400	4,974	1,935	37,663	7,880	8,948	32,789	37,231
500	6,550	1,600	31,148	10,892	12,473	30,997	35,498
600	9,052	1,354	26,347	14,587	16,790	29,702	34,189
700	13,725	1,164	22,661	19,006	21,946	28,627	33,056
800	25,805	1,014	19,738	24,201	27,999	27,655	31,996

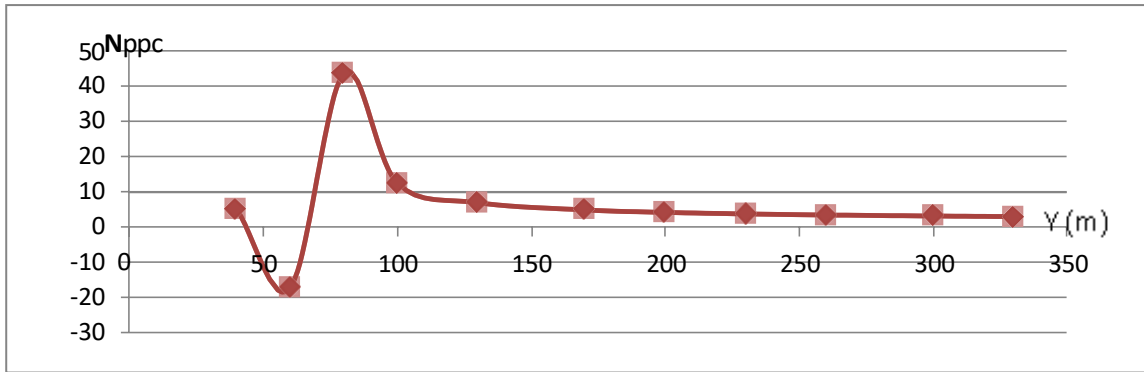


Figure IV.12: Courbe de variation du nombre de postes en fonction de "y"

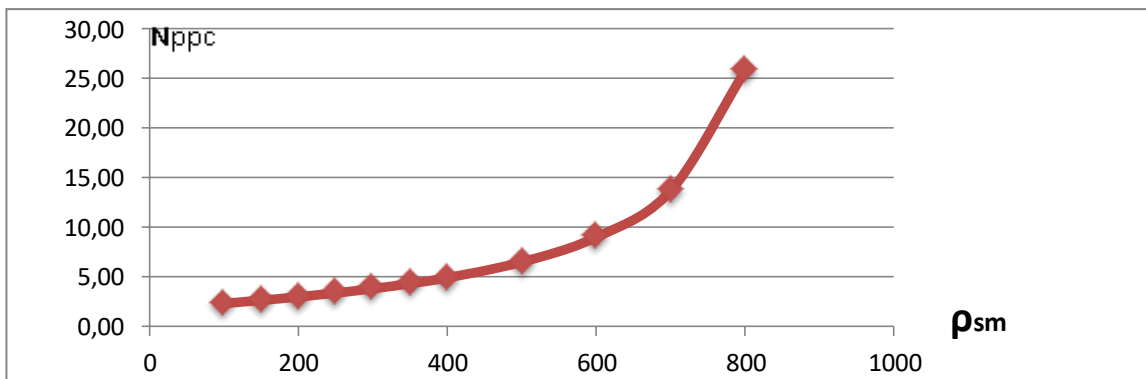


Figure IV.13 courbe de variation du nombre de postes en fonction de la résistivité du sol

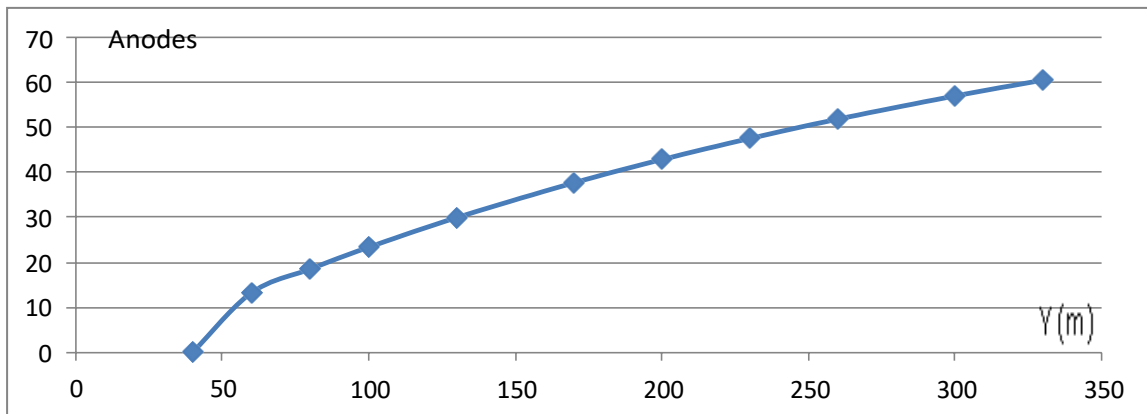


Figure IV.14 Courbe de variation du nombre d'Anodes en fonction de "y"

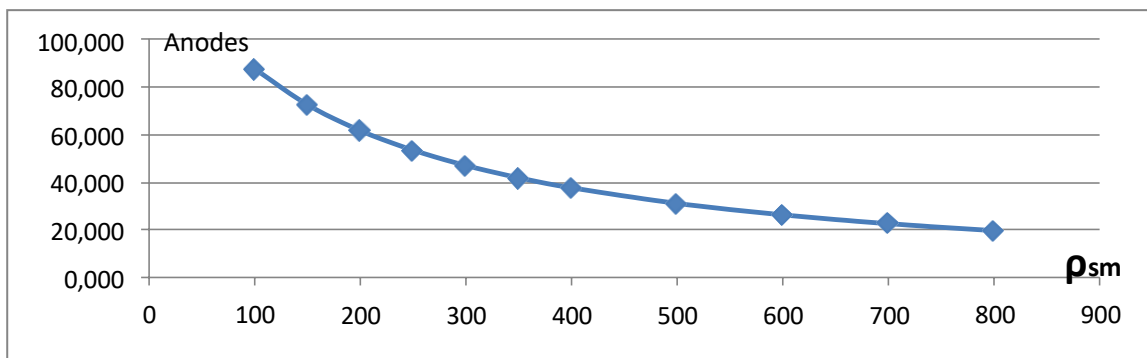


Figure IV.15 Courbe de variation du nombre d'anodes pour la résistivité du sol

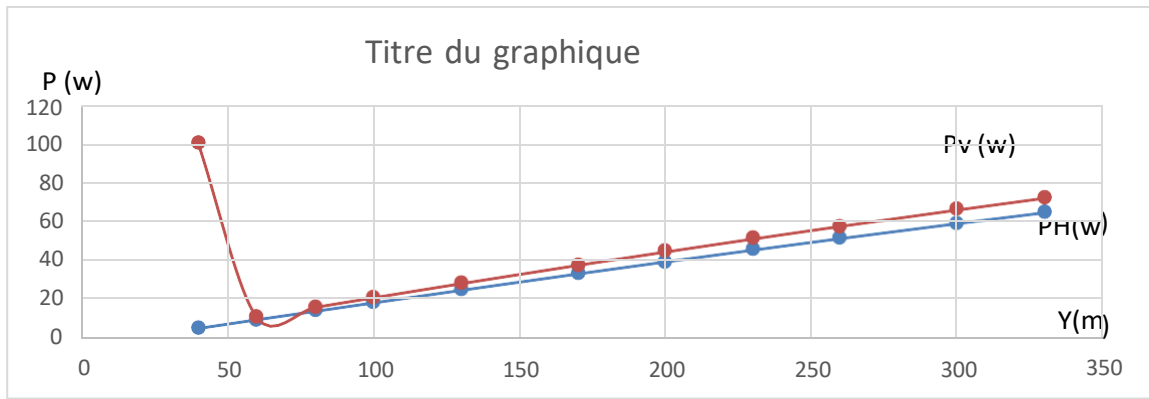


Figure IV.16 Courbe de variation de la puissance des postes en fonction de "y" sur (PH.P

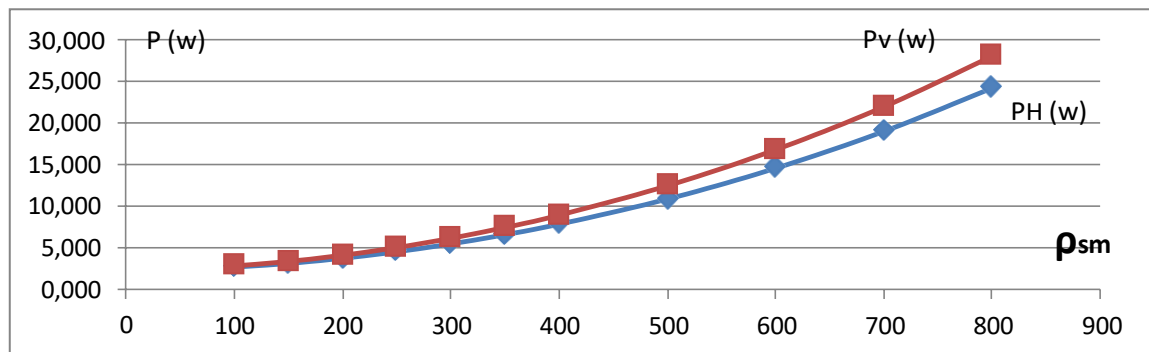


Figure IV.17 Courbe de la Influence de la résistivité du sol sur valeur de (PH.P v)

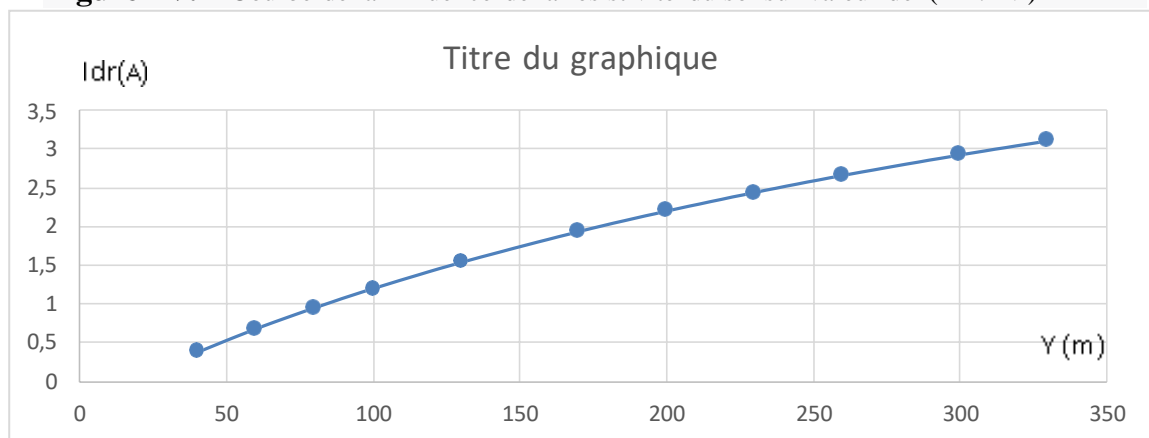


Figure IV.18 Courbe de la Influence de la "y" sur (Idr) .

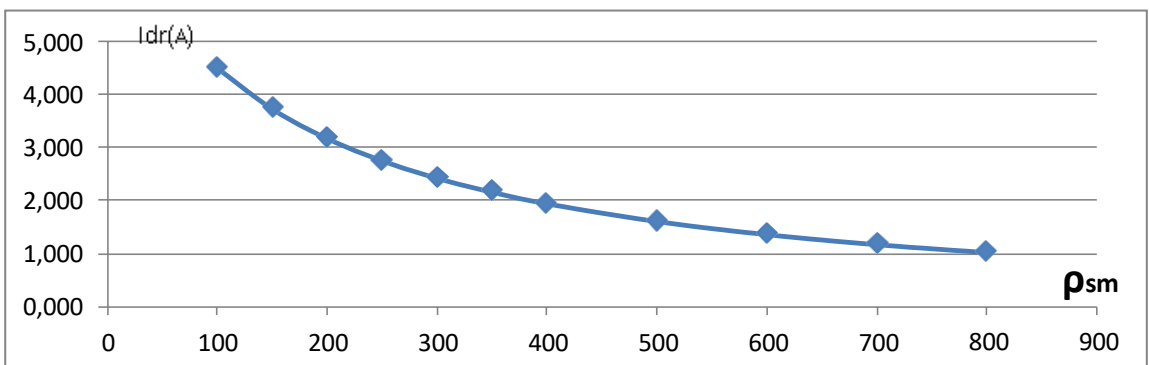


Figure IV.19 Courbe de la Influence de la résistivité du sol sur valeur de (Idr)

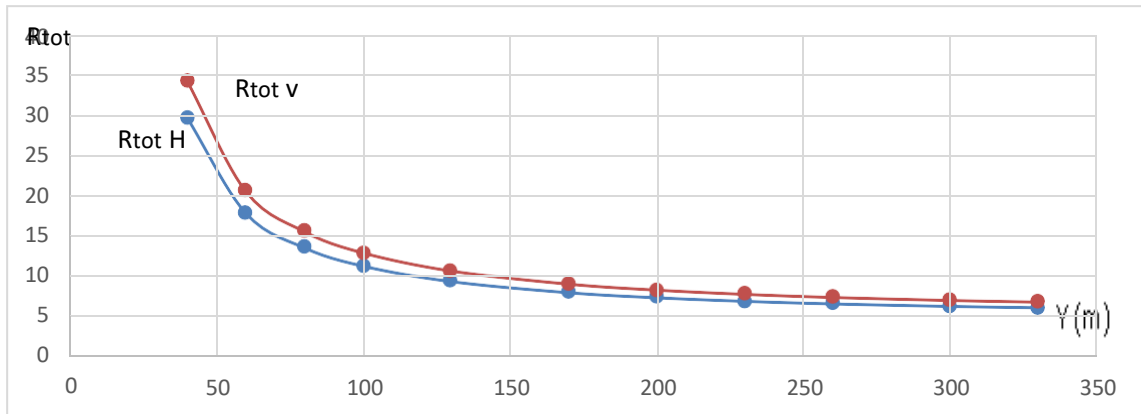


Figure IV.20 Courbe de la Influence de la "y" sur résistance totale des anodes sur (Rtot H , RtotV)

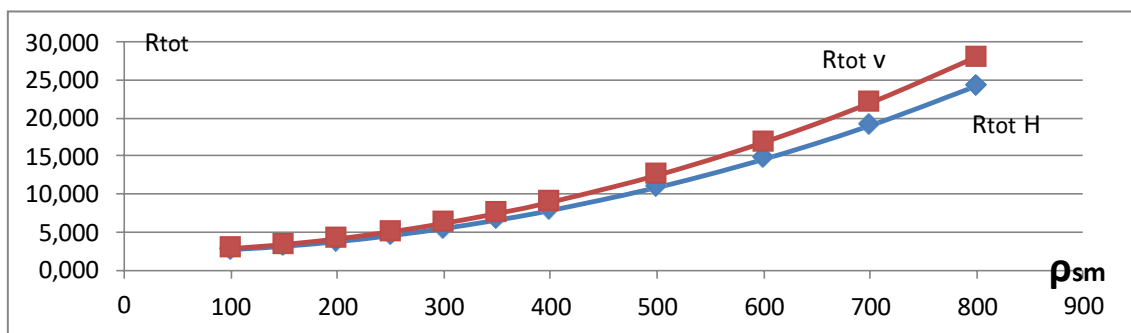


Figure IV.21 Courbe de la Influence de larésistivité du sol survaleur (Rtot H , RtotV)

Tableau : Influence de « y » sur le système de protection (Anodes Magn)

Y (m)	Nppc	Idr (A)	Na Magn	Rtot (Ω)		P (W)	
				Rtot H	Rtot v	P H	P v
40	-5,130	0,375	2,715	71,369	82,092	11,163	12,840
60	-17,22	0,679	4,92	42,098	48,529	21,592	24,891
80	43,924	0,950	6,874	31,375	36,180	31,469	36,288
100	12,49	1,199	8,67	25,674	29,596	40,982	47,242
130	7,020	1,537	11,121	20,803	23,956	54,611	62,888
170	4,974	1,935	14,001	17,223	19,797	71,661	82,370
200	4,273	2,200	15,920	15,554	17,852	83,670	96,030
230	3,83	2,441	17,66	14,356	16,452	95,071	108,949
260	3,531	2,661	19,255	13,458	15,400	105,912	121,190
300	3,25	2,926	21,17	12,566	14,350	119,573	136,553
330	3,091	3,107	22,480	12,052	13,744	129,277	147,425

Tableau : Influence de « y » sur le système de protection (Anodes Alum)

Y (m)	N _{ppc}	I _{dr} (A)	Na Alu	R _{tot} (Ω)		P (W)	
				R _{tot H}	R _{tot v}	P _H	P _v
40	-5,130	0,375	2,009	93,444	107,299	14,616	16,783
60	-17,22	0,679	3,64	55,008	63,349	28,214	32,492
80	43,92	0,950	5,088	40,898	47,141	41,020	47,282
100	12,49	1,199	6,42	33,382	38,483	53,286	61,429
130	7,020	1,537	8,231	26,948	31,053	70,741	81,519
170	4,97	1,935	10,362	22,201	25,556	92,375	106,33 4
200	4,273	2,200	11,782	19,981	22,977	107,482	123,60 2
230	3,83	2,441	13,07	18,381	21,115	121,72 3	139,83 1
260	3,53	2,661	14,251	17,177	19,711	135,17 6	155,11 7
300	3,25	2,926	15,67	15,974	18,304	152,00 8	174,17 9
330	3,091	3,107	16,637	15,279	17,488	163,883	187,58 5

❖ **Analyses et interprétations :**

D’après les résultats consignés dans le tableau, certaines valeurs de « y » sont à rejeter immédiatement car il serait absurde d’avoir par exemple du nombre de postes de protection négatif et encore 17 postes pour un gazoduc de 16 pouce et 120.000 Km de long.

Graphe $P = F(y)$

La puissance requis au poste croit avec la distance entre le lit d’anodes et la conduite.

Cela dit, il serait plus économiques d’opter pour des valeurs de « y » assez faible ; mais une de valeur de « y » assez faible nécessite un nombre de postes important.

Graphe $N_p = F(y)$

Il nous permet savoir que même si plus la valeur de y est assez grande plus la porter du poste est grand et moins est le nombre de poste à prévoir, cependant le graphe met en évidence une asymptote car de 200 à 330 m nous avons toujours le même nombre de poste.

Cette analyse nous permet de borner « y » entre les valeurs 170m à 220 m car c'est dans cette intervalle que on remarque une variation du nombre de postes. Egalement il faut ajouter que les valeurs de « y » choisies en pratique la plus part du temps se trouve dans cette intervalle.

Conclusion :

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

- 1). Combien de poste de protection seraient nécessaire pour une protection certaine de la structure.
- 2). Quelle est l'intensité du courant maximal à délivrer par chaque poste en fin d'exploitation.
- 3). Quelle est le nombre minimal d'anodes par station de protection faut-il pour assurer la protection.
4. Existe-t-il des conditions spéciales, à certain endroits qui exigent des modifications dans le plan général de protection établis.

A ce stade du travail, sur la base d'une résistivité moyenne de 400 U.m et pour un lit d'anode posé à 170 m du pipeline, la protection contre la corrosion du gazoduc , par la méthode de soutirage du courant nécessite 5 postes de soutirage.

Chaque poste de protection, ayant une portée de **24** Km, débitant un courant en fin d'exploitation (25 ans) de 1,93 A et d'un lit de 38 anodes en (Zinc) ou 14(magn) ou 11 (alum) Sous une puissance selon le type de matériau d'anode.

Conclusion générale

Notre travail consiste à étudier la protection cathodique d'une ligne de distribution de gazoduc. la protection cathodique est une technologie de protection active contre la corrosion d'un matériau métallique lorsqu'il entre en contact avec un électrolyte (milieu ionique aqueux tel que l'eau et le sol). Il s'agit d'un système d'affichage électrochimique basé sur la réduction du potentiel de corrosion à un niveau où le taux de corrosion du métal est fortement réduit.

Toutes les structures en acier enterrées ou immergées peuvent bénéficier d'une protection efficace contre la corrosion. En raison de son efficacité, les coûts d'établissement et de surveillance de la protection cathodique sont faibles par rapport aux coûts d'investissement et d'exploitation. La protection cathodique peut réduire le taux de corrosion du conduit et augmenter considérablement sa durée de vie.

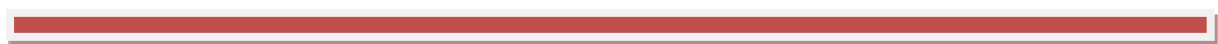
Pour cette raison, nous avons choisi dans cette note les causes conduisant à des problèmes de corrosion parmi ces causes sont le sol. Alors que le degré d'agressivité du sol est déterminé en mesurant sa résistance, pour un sol très corrosif (faible résistance) le taux de corrosion est très élevée, contrairement à un sol peu corrosif (haute résistance) le taux de corrosion est très faible. Pour déterminer les valeurs de résistivité du sol, il faut utiliser la méthode de Wenner qui permet de déterminer le degré d'agressivité du milieu.

La réactivité chimique du sol est mesurée par la valeur du pH. La résistivité du sol peut également être affectée par un certain nombre de facteurs environnementaux tels que le pH. à cette fin, il a été démontré que les sols dont le pH est inférieur à 7 présentent une résistivité inférieure d'environ 35 % à celle des sols dont le pH est supérieur à 7. En plus de l'effet du pH, les ions chlorure semblent également rester un facteur de contrôle important pour le sol. résistivité. En effet, lorsque la concentration de ce dernier dépasse le seuil de 100 ppm, la résistivité du sol diminue ce qui augmente le taux d'érosion.

Afin de maintenir la conduite dans sa plage d'immunité, il est nécessaire de surveiller régulièrement les facteurs d'influence tels que : le potentiel, les paramètres du sol sur lequel est posé la conduite (résistance, pH).

Les conduites qui servent à la distribution du gaz naturel sont en acier, et sont protégées par des couches externes (protection passive). Le revêtement organique est relié à un système actif de protection cathodique à courant forcé dont le potentiel est maintenu à $-850 \text{ mV/Cu/CuSO}_4$. La protection cathodique nécessite des connaissances en électrochimie, corrosion, électricité, maintenance, mesure et réglementation. Avec la certification de protection cathodique, les intervenants et ingénieurs de terrain ont une excellente connaissance des techniques de mesure, ce qui est essentiel pour assurer un meilleur contrôle de la corrosion des canalisations enterrées.

Les calculs de dimensionnement de la protection cathodique du pipeline nous ont permis de connaître le nombre d'anodes nécessaires et les caractéristiques du rail pour protéger entièrement la surface extérieure du tube.



Références bibliographique

- [1] Guide Technique de la Distribution du Gaz par canalisations (CODE : 41PL4) M.A.J : **04/10/2011**
- [2] HS.Khatak,B.Raj, Corrosion of austenitic stainless steels: mechanism, Woodhead Publishing Limited. India**(2002)**.
- [3] Saadounesouhila, Synthèse et caractérisation d'inhibiteurs bi- fonctionnels : application à la corrosion des aciers de construction, Université Ferhat Abbas-Sétif Faculté des Sciences de l'Ingénieur département de génie des procédés,**(2010)**
- [4] M.Kutez, Handbook of environmental degradation of materials, William Andrew, 2nd edition. USA, **(2012)**
- [5] J. Barralis, G. Maeder, Précis métallurgie, France
- [6] Y. Bréchet, J. Charles, La corrosion des matériaux, Dunod, Paris, **(2014)**.
- [7] A. Fossati, F. Borgioli, E. Galvanetto, T. Bacci, Corrosion Science 48, 2006
- [8] Y. Chauvin, Corrosion et dégradation des matériaux métalliques, Technip, Paris, **(2009)**.
- [9] Chambre Syndicale de la Recherche et de la Production du Pétrole et de gaz Naturel, Circuit Eau de Mer: Traitements et matériaux, Technip, Paris, **(1993)**.
- [10] M, MALOU. **(2002/2003)**. Etude de la corrosion et maintenance des installations pétrolières de Shellesénégale : cas du dépôt de jetée de nord. Thèse de doctorat. Université Cheikh Anta Diop de Dakar.
- [11] G. Pinard Legry et A. Pourbaix, Corrosion Localisée, Les Editions de Physique, **(1994)**.
- [12] PA. Schweitzer, Corrosion engineering handbook, Taylor & Francis INC, New York, 2nd edition, vol 3, **(1996)**.
- [13] C. Vargel, Corrosion of aluminium, Elsevier, New-York, 1st edition, **(2014)**.
- [14] Chambre Syndicale de la Recherche et de la Production du Pétrole et de gaz Naturel, Corrosion et inhibition des puits et collectes, Technip, Paris, **(1981)**.
- [15] B. Sathianandhan, K. Ralahrishnan, N. Subramyan, Br. Corros. J., 5, 270 **(1970)**.
- [16] A. Lgamri, Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences de Rabat, N° d'ordre: 1877 **(2000)**.
- [17] J.C. Scully, O. Clavier, G. German, Corrosion protection : Principes fondamentaux, Masson, Paris, **(1995)**.
- [18] PR. Robertge, Handbook of corrosion engineering, McGraw-Hill, New-York, **(2000)**.
- [19] LL. Shrier, RA. Jarman, GT. Burstein, Corrosion /environment reaction, Butterworth- Heinemann, Great Britain, **(1994)**.
- [20] PK. Sen, K. Malmedal, JP. Nelson, Steel grounding design guide and application notes. IEEE Rural Electric Power, Conference May 5-7, **(2002)**.
- [21] P. BOUMERSBACH, C. DOUMONT, J. PMILLET, << electrochemical characterization of a corrosion inhibitor : influence of temperature on the inhibition mechanism. >> 207th meeting of the electrochemical society, 15-20 mai **2005**, Quebec city (Canada).
- [22] D.D. KANE, S. SRINIVASAN, Experience survey on corrosion monitoring on oil and gas pipelines, Corrosion USA, paper n° 83, NACE, Houston, **1998, P83**
- [23] P. OLAV GARTLAND, Choosing the right positions for corrosion monitoring on oil and gas pipelines, Corrosion USA paper n° 83, NACE, Houston, **1998, P83**
- [24] N. BOUDIEB, << Evaluation des performances des peintures par des techniques Electrochimique >>, mémoire de magister, **2008**.
- [25] E. Schaschl, NACE Corrosion Inhibitors, USA, National Association of Corrosion Engineers, **(1973) 28**.
- [23] H. Uhlig, Corrosion et Protection, DUNOD, Paris **(France 1970)**.
- [24] E. W. Skerray, I. L. Shreir, Corrosion, newnesbutterworth, London, **1976**.
- [25] A. Campa, Protection des surfaces Métalliques Contre la Corrosion, Technologie Professionnelle pour les mécaniciens, Tome 2, Paris, les Editions Foucher, **1971**.
- [29] J. Catonné, L. Lacourcelle, les Revêtements Protecteurs dans l'Industrie, Principe - Applications - Choix, CAST LYON, **1977**
- [30] J.C. Scully, Corrosion Protection, principes fondamentaux, **1995**.
- [31] L.L. Shreir, C. Chem, R.A. Jarman, G.T. Burstein, Corrosion Volume 2, Corrosion Control, Plenta Tree, 10:20 **(1995)**.

- [32] G. TrabANELLI, V. Carassiti ; Corrosion Science and Technology, New York 1970.
- [33] R.W. Revie, Corrosion and corrosion control, John Wiley & Sons, Canada, 4th edition, (2008).
- [34] D. BOUZIDI Corrosion et protection cathodique des conduites souterraines, mémoire d'ingénieurs, École de technologie supérieure université du Québec 2011.
- [35] Séminaire de la protection cathodique, service protection cathodique /RTO, (2011).
- [36] Document technique sonelgaz " Procédures relatives au revêtement appliqué sur les tubes transport de gaz : généralités sur les fonctions des revêtements et leurs applications" PR : N° 004.GRTG - R 1 (2008).
- [37] Mme H. ZENDAOUI, IAP Boumerdes, partie 1 corrosion et protection des canalisations, SH, IAP.CU, UFR : GasRefining&Petrochemistry 2011.
- [38] CP 2–Cathodic Protection Technician Certification Application, NACE International, 2000, April 2005
- [39] La protection cathodique guide pratique par : commission, exploitation, chambre syndical de la recherche et de la protection du pétrole et du gaz naturel technique (1986).
- [40] M. Ghellai Etude sur le système de protection Cathodique PC et Maintenance de la Canalisation Multi produit ASR/ NAFTAL mémoire master, université de Tlemcen 2013.
- [41] Documents établi par le département de protection cathodique / District gaz
- [42] Rim-rukeh, A. and J. Kehinde A. 2006. Investigation of Soil Corrosivity in The Corrosion of Low Carbon Steel Pipe in Soil .Coll. « Rapport technique de Journal of Applied Science Research», 466-469.College of Education: Agbor (Delta State): Department of Integrated Science & Département of Chemistry, 4 p.
- [43] 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.
- [44] Agostinis, N. 2008. «Corrosion Control of Ductile Iron Pipe with Polyethylene Encasement».In Protecting Our Water–60 years of Service: 60th Annual WCWWA Conference and Trade Show (Delta Regina Hotel, 23 – 26 septembre 2008). p. 1-7. Ductile Iron Pipe Research Association
- [45] Silverman, David C.and Ari L. Silverman. 2007. « Potential-pH (Pourbaix) Diagrams as Aids for Screening Corrosion Inhibitors and Sequestering Agents ». In Corrosion 2007, March 11, 2007 - March 15, 2007. p. 076161-0761619. Coll. « NACE - International Corrosion Conference Series ».Nashville, TN, United states: National Assoc. of Corrosion Engineers International. p.1-12
- [46] ANSI/AWW C105/A21.5-99. 1999. American National Standard for Polyethylene Encasement for Ductile-Iron Pipe Systems. Denver, (CO): American Water Works Association, p. 11-15.
- [47] S. Ben soltane, Etude électrochimique de la corrosion des aciers API –5L X-60 pour gazoduc en milieu environnant de sol et protection par inhibiteurs à base de Poly phosphates, mémoire de magister, université USTO Oran, Avril 2009.
- [48] Scott P. and O'connor, P. 2003. « Corrosion Control of Large Diameter Piping Cathodic Protection a Proven Method ».En ligne<http://www.corrtech-inc.com/technical_articles/waterpipe.pdf>.Consulter le 22 décembre 2010.
- [49] Laver J. A., H. Griffiths. 2001. « The Variability of Soils in Earthing Measurements and Earthing System Performance». En ligne. <<http://www.cder.dz/download/upec-7.pdf>>. Consulté le 26 octobre 2010.
- [50] ASTM G57-95a. 1997. Annual Book of ASTM Standards. 03.02. West Conshohoken, (PA) American National Standard. p.211-215.
- [51] Nigel J. and Booth, P. 2006. «Earthing Manual Section E3: Soil Resistivity- Measurements». En ligne<<http://www.eon-uk.com/distribution/CiCdocs/01%20Technical%20Documents/CN%20Combined/Earthing%20Manual/E3%20Earthing%20Manual%20Soil%20Resistivity.pdf>>.Consulté le 27 octobre 2010.
- [52] Wakelln, Robert G.et Gummow Robert A. 1994. Résumé des conclusions d'études récentes sur la corrosion des conduites d'eau principales en Ontario. Coll. « Rapport technique de CNRC & IRC », TD491 W149f. Ottawa, (ON) Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, 21 p.
- [53] Pruckner, F. 2001. «Corrosion and Protection of Reinforcement in Concret Measurment and Interpretation ».Vienna, University of Vienna, 224 p.