

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

Filière : ÉLECTROMÉCANIQUE
Spécialité : ÉLECTROMÉCANIQUE

THÈME

ÉTUDE DE LA PROTECTION CATHODIQUE
DU GAZODUC ILLIZI/DJANET

Présenté par : M.KHELIFI Mohammed

Promoteur: Dr. SETTET Ahmed Tidjani

Co- promoteur: M. HAMDUCHE Walid

Promotion 2019- 2020

Résumé

Le présent de travail de ce mémoire s'inscrit dans le cadre des projets industriels dans lesquels se spécialise la société national des grands travaux pétroliers qui comprend la protection des structures industrielles de la corrosion, par l'utilisation de la protection cathodique, dont le but est d'étudier et d'appliquer le système de protection cathodique du pipeline gazoduc qui transporter le gaz naturel de la zone industrielle **Illizi** vers **Djanet** a un distance **379 Km** .

La technique de protection cathodique la plus répandue dans ce domaine est la méthode de protection cathodique par courant électrique imposé (soutirage de courant électrique).l'estimation et l'appréciation mondiale de ce mode est due à son succès dans la réduction de la rouille ce qui constitue une grande menace pour les canalisations des hydrocarbures.

Dans ce travail, nous présentons une étude théorique et pratique sur la protection cathodique par courant électrique imposé, dont le but est d'assurer les performances de cette technologie durant les pendant une période de **30** ans passé.

Mots clés : anode, cathode, pipeline, courant, potentiel.

Abstract

The recent work of this dissertation is a part of the industrial projects which are National Company for major Petroleum Works specific which include a protection of the industrial infrastructures from erosion by using cathode protection. The purpose of this study is to investigate and apply the cathode protection system to the natural gas tubes from the industrial zone in **Ilizi** to Janet city along **379km**.

The major cathode protection method in this field is the use of electric current. The reason behind the world recognition to this method as being the major one is its success in reducing rust which presents a real risk to Hydrocarbon tubes.

In this work, we gave a theoretical and a practical study about the cathode protection with the use of imposed electric current. The reason behind using electric current is to guarantee the work of this technique for **30** years.

Keyword: anode, cathode, pipeline, current, potential.

خلاصة

العمل الحالي لهذه المذكرة هو جزء من المشاريع الصناعية التي تختص بهم الشركة الوطنية للأشغال البترولية الكبرى والتي تتضمن حماية الهياكل الصناعية من التآكل عن طريق استعمال الحماية الكاثودية، الهدف منه هو دراسة وتطبيق نظام الحماية الكاثودية لأنابيب نقل الغاز الطبيعي من المنطقة الصناعية اليزي نحو مدينة جانت علي طول 379 كم.

اسلوب الحماية الكاثودية الاكثر شيوعا في هذا المجال يتمثل في استعمال التيار الكهربائي المفروض، يرجع هذا الاعتراف العالمي بهذا النوع من الأسلوب إلى مدى نجاحه في التقليل من الصدأ الذي يشكل خطرا كبيرا في أنابيب نقل المحروقات .

في هذا العمل قدمنا دراسة نظرية وتطبيقية حول الحماية الكاثودية ، الغرض منه ضمان أداء هذه التقنية لمدة زمنية تقدر بـ 30 سنة.

الكلمات المفتاحية

الأنود ، الكاثود ، خط الأنابيب ، التيار ، الطاقة.

Remerciement

Nous remercions avant tout Dieu

Nous adressons nos vifs remerciements à notre promoteur consultant **Dr.SETTET** pour nous avoir diligentés tout au long de ce travail, pour sa compréhension, sa patience, sa compétence et ses remarques qui nous ont été précieuses.

Nous voudrions également remercier **Co- promoteur:**
M.HAMDOUCHE.W ainsi que l'ensemble de l'équipe d'ENGTP, qui nous a beaucoup aidés à faire notre travail dans de bonnes conditions.

J'exprime également exprimer mes vifs remerciements aux membres de jury pour avoir accepté d'examiner ce travail et d'évaluer le contenu de ce mémoire de thèse master.

Nos remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département GÉNIE MÉCANIQUE de la faculté des sciences des ingénieurs M'hamed Bouguerra Boumerdes et nos responsables de la promo 2019-2020.

Nombreuse, sont les personnes qui nous ont apporté leurs aides et leurs soutiens, nous tenons à remercier nos chères camarades qui nous ont beaucoup aide sans citer leur nom.

Mohammed



Dédicace



Je remercie tout d'abord le Bon Dieu de m'avoir donné le courage

Et la patience pour accomplir ce travail.

Je dédie ce modeste mémoire :

À ma très chère mère

Et mon très cher père qui m'a toujours soutenu.

À mes frères, À mes sœurs

À toute la famille KHELIFI

À tous mes amis surtout : ALILOU ; HASSANE

Et toute la promo MEM/18 surtout mes meilleures amis

MOHAMMED



Liste des figures

Liste des figures

Liste des figures

Figure I. 1	Schéma de l'organigramme de l'ENGTP	3
Figure I. 2	Domaines d'activités d'ENGTP.	4
Figure II. 1	Pipeline.....	6
Figure II. 2	Equilibre de deux métaux différents dans une solution	8
Figure II. 3	Equilibre d'un métal dans une solution	9
Figure II. 4	Mesure du potentiel d'un métal dans une solution avec une électrode de référence..	9
Figure II. 5	Electrode de référence.....	10
Figure II. 6	Potentiels respectifs des différentes électrodes.	10
Figure II. 7	Phénomène de corrosion dans une cellule de corrosion.....	11
Figure II. 8	Equilibre du métal dans la solution.....	12
Figure II. 9	Exemples de destruction de l'équilibre.....	13
Figure II. 10	Identification du courant.	13
Figure II. 11	Métaux en équilibre dans la solution.	14
Figure II. 12	Destruction de l'équilibre par couplage galvanique.	14
Figure II. 13	Identification du courant.	14
Figure II. 14	Courbe d'équilibre E-pH de Fer-eau à 25°C	16
Figure II. 15	Principe de fonctionnement de la méthode de Wenner.	19
Figure II. 16	Différentes piles galvanique.....	20

Liste des figures

Figure II. 17	Corrosion par piqûres	21
Figure II. 18	Echelle galvanique des métaux	21
Figure II. 19	Différents types de corrosion.	22
Figure II. 20	Corrosion par courant vagabond	23
Figure III. 1	Revêtement d'un tube.....	24
Figure III. 2	Protection cathodique appliquée à une structure	26
Figure III. 3	Polarisation d'une structure	27
Figure III. 4	Protection cathodique à anode galvanique	28
Figure III. 5	Soudage des câbles de raccordement.....	29
Figure III. 6	Protection cathodique à courant imposé	30
Figure III. 7	Déversoir anodique posé verticalement.....	32
Figure III. 8	Déversoir anodique posé horizontalement.	32
Figure III. 9	Joint isolant monobloc.....	34
Figure III. 10	Choix du système de protection cathodique.	36
Figure IV. 1	Variation du potentiel de protection le long d'une conduite	43
Figure IV. 2	Schéma de l'organigramme des équations de système de protection cathodique. .	50
Figure IV. 3	La suite de figure IV.2.	51
Figure IV. 4	La suite de figure IV.2.	52
Figure IV. 5	Évolution de résistivité moyenne du tronçon en fonction des postes de soutirage de courant électrique.....	60

Liste des figures

Figure IV. 6 Évolution de résistivité au puits d'anodes des postes de soutirage de courant électrique.	60
Figure IV. 7 Profondeur de puits d'anodes.	61
Figure IV. 8 Évolution (résistance de déversoir et résistance de circuit) en fonction des postes de soutirage de courant électrique.	64
Figure IV. 9 Évolution (tension et intensité) en fonction des postes de soutirage de courant électrique.	64
Figure IV. 10 Évolution puissance en fonction des postes de soutirage de courant électrique...65	
Figure IV. 11 Évolution bras de protection en fonction des postes de soutirage de courant électrique.	65
Figure IV. 12 Pourcentage de distribution des bras de protection en fonction des postes de soutirage de courant électrique.	66
Figure IV. 13 Évolution nombre d'anodes en fonction des postes de soutirage de courant électrique.	66
Figure IV. 14 Évolution courant au point de soutirage et tension de sortie du poste de soutirage en fonction des postes de soutirage de courant électrique.	67
Figure IV. 16 Évolution résistance anode-backfill en fonction des postes de soutirage de courant électrique.	68
Figure IV. 17 Évolution nombre minimal d'anodes en fonction des postes de soutirage de courant électrique.	68

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau II. 1	Corrosivité du sol selon la résistivité	18
Tableau III. 1	Formes et dimensions des anodes.	31
Tableau III. 2	Propriétés et milieu d'utilisation des déversoirs.	31
Tableau III. 3	Electrodes de référence.	33
Tableau III. 4	Comparaison des éléments de systèmes P.C.....	35
Tableau III. 5	Comparatif entre la protection cathodique par anode galvanique.	37
Tableau IV. 1	Principales caractéristiques de l'ouvrage.	40
Tableau IV. 2	Données du projet.	53
Tableau IV. 3	Deffrent valeur de résistivité.....	54
Tableau IV. 4	La suite de tableau IV. 3.	55
Tableau IV. 5	La suite de tableau IV. 3.	56
Tableau IV. 6	La suite de tableau IV. 3.	57
Tableau IV. 7	La suite de tableau IV. 3.	58
Tableau IV. 8	Valeurs de résistivité.	59
Tableau IV. 9	Résultats des calculs commun pour toutes les postes de soutirage.....	61
Tableau IV. 10	Résultats des calculs.....	62
Tableau IV. 11	La suite de tableau IV.10	63

Nomenclature

Nomenclature

symbole	signification	unité
P	Pression	Bar
T	Température	C°
V	Potentiel	V
I	Courant	A
U	Tension	V
R	Résistance	Ω
L	Longueur	m
d	Distance	m
ø	Diamètre de conduit	pouce
ρ	Résistivité de sol	$\Omega.m$
Rl	Résistance longitudinale de la canalisation	$\Omega.m$
ρ_a	Résistivité de l'acier	$\Omega.m$
Dext	Diamètre extérieur de la canalisation	mm
Rt	Résistance transitoire	$\Omega.m^2$
Rti	Résistance transitoire initiale pour un revêtement neuf	$\Omega.m^2$
B	Coefficient tenant compte du vieillissement du revêtement	1/an
t	Durée d'exploitation	ans
Rrm	Résistance d'isolement	$\Omega.m$
Zm	Résistance d'entrée de la canalisation	Ω
R_sol	Résistance de sol	Ω
E_max	Gain de potentiel au point de soutirage,	-1.7
E_naturelle	Potentiel naturel de la canalisation dans le sol	-0.550
E_min	Gain de potentiel en bout de bras de protection	0.850
Is	Intensité du courant au point de soutirage	A
A	Densité du courant	$\mu A/m^2$
R_puit	Résistance d'un puits d'anodes	Ω
Rp	Résistance de polarisation	Ω
Sa	Section transversale du matériau de l'anode	mm ²
R_ma	Résistance du matériau des anodes	Ω
Rd	Résistance du déversoir	Ω
Sa	Section du câble	m ²
Rbackfill_sol	Résistance backfill-sol	Ω
Na_min	Nombre minimal d'anodes	
P	Puissance moyenne du poste de soutirage	W
Umax	Tension de protection requise	V

Abréviation

Abréviation

Abréviation

ENGTP : Entreprise National Des
Grand Travaux Pétrolière.

PC : Protection Cathodique.

EN : Engineering.

atm : atmosphérique.

PH : Potentiel D'hydrogène.

TBT : Très Basse Tension.

BER : Boite Électrode Référence.

EC: Alternative Courant.

DC : Direct Courant (courant continu).

ER: Électrode Référence.

CER: Coffre Électrode Référence.

T/R: Transformateur/ Redresseur.

MMO : Mixed Métal Oxyde (Oxyde
Métal mixte).

Ti : Titane.

PS : Poste Sectionnement.

SHE: Electrode Standard.

CSE: Electrode Cuivre Sulfate.

EPC: Potentiel Polarisé Cathodique.

EPA: Potentiel Polarisé Anodique.

ICORR: Courant Corrosion.

HSCI : Fonte Haut Teneur Silicium.

CSPE : Polyéthylène Chlore-Sulfate.

EPR : Ethylène Propylène.

SCR: Redresseurs Contrôlés Silicium.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I

Présentation de l'entreprise

I.1. Introduction.....	2
I.2. Présentation de l'entreprise nationale des grands travaux pétrolière.....	2
I.3. L'organigramme de l'ENGTP	3
I.4. Domaine d'activité.....	4
I.5. Projet de la protection cathodique de la ligne gazoduc (Illizi-Janet).....	5

Chapitre II

Corrosion des canalisations d'hydrocarbures

II.1. Introduction.....	6
II.2. Définition des pipelines	6
II.3. Phénomènes de corrosion	7
II.3.1. Métaux et électrolyte	7
II.3.2. Électrode métallique	7
II.4. Processus électrochimiques développés sur une électrode métallique	8
II.4.1. Potentiel du métal dans la solution	8
II.4.2. Électrode de référence	9
II.5. Processus de corrosion.....	11

Sommaire

II.5.1.	Destruction de l'équilibre par réaction du milieu.....	12
II.5.2.	Destruction de l'équilibre par couplage d'électrodes métalliques.....	14
II.5.3.	Etablissement des diagrammes de Pourbaix (pH – tension).....	15
II.6.	Facteurs agissant sur la corrosion des ouvrages métalliques enterrés	17
II.6.1.	Le sol comme électrolyte.....	17
II.6.2.	Agressivité du sol	17
II.6.2.1.	Paramètres déterminant l'agressivité du sol.....	18
II.6.2.2.	Méthode de mesure de la résistivité du sol	18
II.6.2.3.	Principe de mesure de la résistivité du sol	18
II.6.3.	Piles dues à l'électrolyte.....	19
II.7.	Différents types de corrosion	20
II.7. 1.	Corrosion uniforme.....	20
II.7. 2.	Corrosion galvanique	21
II.7. 3.	Fissuration par corrosion sous contrainte (fcc).....	21
II.7. 4.	Corrosion-érosion	22
II.7. 5.	Corrosion par crevasses	22
II.7. 6.	Corrosion par les courants vagabonds	23
II.8.	Conclusion	23

Chapitre III

Type de protection cathodique du pipeline

III.1.	Introduction.....	24
III.2.	Moyens techniques appliqués contre la corrosion	24

Sommaire

III.2.1.	Protection par revêtement (passive).....	24
III.2.1.1.	Premier principe	24
III.2.1.2.	Deuxième principe	24
III.2.1.3.	Choix de revêtement.....	25
III.2.1.4.	Types de revêtement.....	25
III.2.1.5.	Perte d'adhérence des revêtements	25
III.2.2.	Protection par inhibiteur de corrosion.....	25
III.2.3.	Protection cathodique (Protection active).....	26
III.2.3.1.	Historique	26
III.2.3.2.	Conception de la protection cathodique	26
III.2.3.3.	Polarisation d'une structure	26
III.2.3.4.	Critère de la protection cathodique	27
III.2.3.5.	Champ d'application de la protection cathodique.....	27
III.2.3.5.1.	Ouvrages au contact du sol.....	27
III.2.3.5.2.	Ouvrage submergé.....	28
III.3.	Type de la protection cathodique	28
III.3.1.	Protection par anode galvanique	28
III.3.1.1.	Câblage de système anode galvanique	29
III.3.1.2.	Applications des systèmes d'anodes galvaniques.....	29
III.3.2.	Protection cathodique par courant électrique imposé	29
III.3.2.1.	Principe de la protection cathodique (par courant électrique imposé).....	30
III.3.2.2.	Applications de la protection cathodique par courant imposé	30
III.3.2.3.	Installation d'un poste de protection cathodique à courant imposé	31

Sommaire

III.3.2.3.1. Générateur de courant continu et ces caractéristiques	31
III.3.2.3.2. Déversoir anodique et leurs implantations	31
III.3.2.4. Électrodes de référence	33
III.3.2.5. Câbles de liaison.....	33
III.3.2.6. Avantages et inconvénients des systèmes protection cathodique	35
III.3.2.7. Choix du système de protection cathodique.....	36
III.4. Facteurs affectant la protection cathodique	38
III.4.1. Insuffisance de continuité électrique	38
III.4.2. Influence des courants vagabonds	38
III.4.3. Influence des structures adjacentes.....	39
III.5. Conclusion	39

Chapitre IV

Dimensionnement de protection cathodique par courant imposé

IV. 1. Introduction	40
IV. 2. Calcul de dimensionnement du système de protection cathodique.....	40
IV.2. 1. Protection cathodique par courant imposé.....	40
IV. 3. Note de calcul de la conception du système de protection cathodique	41
IV.3.1. Résistivité du sol	41
IV.3.2. Résistance longitudinale de la conduite par unité de longueur.....	41
IV.3.3. Résistance conduite-sol.....	42
IV.3.4. Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la conduite	42
IV.3.5. Constante de distribution du potentiel le long de la conduite:.....	42

Sommaire

IV. 4.	Détermination du nombre de postes de soutirage et du nombre d'anodes.....	43
IV.4.1.	Résistance d'entrée d'une conduite revêtue.....	43
IV.4.2.	Valeurs des potentiels	43
IV.4.3.	Coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins	44
IV.4.4.	Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage	45
IV.4.5.	Calcul du nombre de postes de protection cathodique.....	45
IV.4.6.	Détermination de l'intensité du courant au point de soutirage	45
IV.4.7.	Détermination de l'intensité du courant requise	46
IV.4.8.	Détermination de la densité du courant	46
IV.4.9.	Calcul du nombre d'anodes minimal nécessaire à la protection.....	46
IV. 5.	Calcul de la résistance de terre du déversoir	46
IV.5.1.	Calcul de la résistance d'un puits d'anodes	47
IV.5.2.	Résistance anode/bak- fille	47
IV.5.3.	Résistance bak fille-sol	47
IV.5.4.	Calcul de la résistance de polarisation	48
IV.5.5.	Calcul de la résistance du matériau de l'anode	48
IV.5.6.	Détermination de la section transversale du matériau de l'anode.....	48
IV.5.7.	Calcul de la résistance des câbles	48
IV.5.8.	Détermination de la section du câble	49
IV.5.9.	Détermination de la résistance totale du circuit.....	49
IV.5.10.	Détermination de la tension aux bornes de sortie du poste de soutirage	49
IV.5.11.	Détermination de la tension de protection requise.....	49
IV.5.12.	Détermination de la puissance moyenne du poste de soutirage.....	49

Sommaire

IV. 6.	L'organigramme des équations de dimensionnement de protection cathodique	50
IV. 7.	Résultats et discussion.....	53
IV.7.1.	Données du projet	53
IV.7.2.	Résultats du calcul des différentes valeurs résistivité.....	54
IV.7.3.	Résultats des calculs communs.....	61
IV.7.4.	Résultats du calcul des différentes valeurs électriques	62
IV. 8.	Conclusion.....	69
	Conclusion générale.....	70
	Références bibliographiques.....	71
	Annexe	73

Introduction générale

Introduction générale

L'histoire a connu un grand développement dans le domaine de l'industrie, surtout dans les dernières années. Ce développement a été lié à la fabrication et l'utilisation des matériaux constructifs, dont les matériaux les plus importants sont des métaux et leur alliage.

A cause du milieu agressif, la plupart des métaux est instable thermodynamiquement, car ils ont toujours une certaine tendance à retourner à l'état primitif (oxydes, sulfures) qui est le seul état stable ce qui résulte par conséquent leur détérioration par corrosion.

On appelle corrosion l'action destructive d'un métal sous l'effet de réaction chimique ou électrochimique avec le milieu ambiant. Il existe de nombreux exemples connus de ce fait quotidien : le percement à la rouille de telle ou telle construction mécanique (pipelines des hydrocarbures). La rouille détruit à peu près 1/5^{ème} de production mondiale des aciers ordinaires chaque année. C'est pour quoi, la protection des métaux contre la corrosion a fait l'objet d'un grand nombre de recherches.

La protection cathodique des matériaux métalliques consiste à éviter ou réduire leur corrosion en milieux électrolytiques en provoquant abaissement de leur potentiel cet abaissement du potentiel est assuré par couplage de l'ouvrage à protéger avec des anodes galvaniques à base de zinc, d'aluminium ou de magnésium (protection l'ordre de 1 à 20 mA/m² d'acier à protéger, entre l'acier (cathode) et un matériau inerte placé en surface du béton d'enrobage (protection cathodique par courant électrique imposé).

Ce travail est basé sur les méthodes de la protection cathodique concernant la protection cathodique des pipelines hors sol des transports hydrocarbures avec la dimensionnement de l'installation destinée pour la canalisation gazoduc qui reliera le champ d'Assekaffaf (Illizi) à Djanet de **379 km** de la société **ENGTP**. Avec la méthode de protection cathodique par soutirage de courant électrique pour protéger les matériaux métalliques surtout les pipelines.

Ce mémoire est réparti en quatre chapitres :

- Chapitre I : Présentation de l'entreprise.
- Chapitre II : Corrosion des canalisations d'hydrocarbures, explication de corrosion avec les différents types de problèmes concernant les matériaux métalliques.
- Chapitre III : Présente et expliquer les modes de la protection cathodique du pipeline par anode galvanique et courant électrique imposé.
- Chapitre IV : Concerne la partie pratique, dont nous avons procédé au dimensionnement de la protection des pipelines de canalisation gazoduc à grille par courant imposé.

Nous finirons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Présentation de l'entreprise

I.1. Introduction

Afin d'assurer la cohérence et la séquence logique de notre étude, nous avons présenté la société ENGTP, où nous avons fait notre formation pratique, et également présenté le projet de protection cathodique pour le pipeline Illizi / Djanet, sur lequel fond notre étude.

I.2. Présentation de l'entreprise nationale des grands travaux pétrolière

L'entreprise nationale des grands travaux pétroliers est l'une des entreprises nationales les plus puissantes dans le domaine du grand projet, à l'intérieur et à l'extérieur du pays.

L'histoire de cette l'entreprise commence avec le départ du colonialisme français et la reprise des activités pétrolières en Algérie depuis sa création le 15 novembre 1967 et la formation d'un complexe à Sonatrach Jusqu'en 1980, elle est devenue une filiale sous le nom d'ENGTP.

Sa position économique nationale réside dans le développement du trésor public avec un capital de 17,43 millions de dollars et une réduction du chômage total de 12 000 travailleurs en 2018.

Son siège est situé dans la zone industrielle Reghaia d'Alger, divisée en branches régionales:

- Administration régionale Hassi Messaoud.
- Administration régionale Skikda.
- Administration régionale d'Arziw.
- Administration régionale de Hassi Remel.

I.3. L'organigramme de l'ENGTP

L'administration de la société s'organiser de façon suivante :

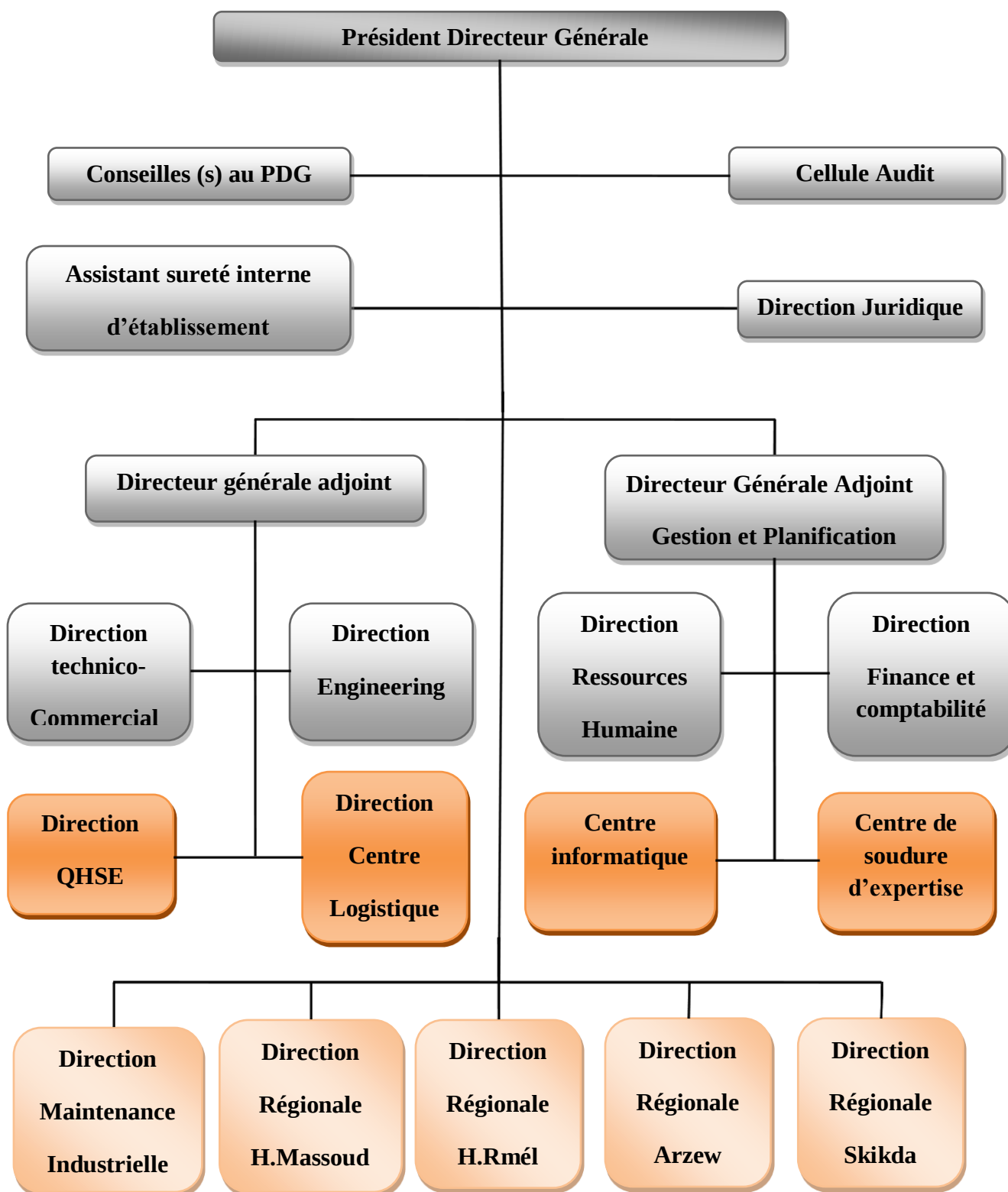


Figure I. 1 Schéma de l'organigramme de l'ENGTP [11].

I.4. Domaine d'activité

Les domaines d'activité de l'entreprise sont:

- Construction des centrales électriques et leur relation avec le gaz.
- Génie civil des bâtiments métalliques.
- Génie mécanique (équipements, réservoirs, tuyaux).
- Génie électrique (électrique et instrumentation).
- Le domaine de la peinture et de l'isolation.
- Développer des réseaux des collectes et de maintenance des hydrocarbures liquides et gazeux des installations des surfaces et des installations connexes.



Figure I. 2 Domaines d'activités d'ENGTP.

I.5. Projet de la protection cathodique de la ligne gazoduc (Illizi-Janet)

Sonatrach a récemment étendu ses projets dans la production et la distribution d'hydrocarbures, parmi ces projets le pipeline de 379 km reliant Illizi/Djanet.

L'importance de ces projets réside dans la distribution de gaz à:

- La centrale électrique de Djanet en gaz naturel.
- Les agglomérations de Djanet, Bordj el Haoues, Ihrir
- Les agglomérations de Djanet, Bordj el Haoues, Ihrir.
- Les clients industriels.

Chapitre II

Corrosion des canalisations d'hydrocarbures

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter le problème de la corrosion qui affecte les installations de production et distribution de (pétrole et gaz), en particulier la corrosion du pipeline, leurs causes, leurs types.

II.2. Définition des pipelines

Pipelines sont des canalisations particulières qui contribuent aux enjeux économiques d'un pays. Ils jouent un rôle extrêmement important dans le monde entier comme moyen de transport de gaz et de liquide à longue distance. Le premier pipeline a été construit en **1869** par **Benson** pour éviter le monopole du transport de pétrole par chemin de fer. Ces derniers permettent l'échange de produits entre raffineries, dépôts pétroliers et installations portuaires selon la nature du fluide transporté.

Un pipeline est une canalisation par un ensemble de tubes en acier soudé bout à bout, son diamètre courant est compris entre 15 cm à 1 mètre, son épaisseur varie de 4 à 13 mm la profondeur d'enfouissement dans le sol varie de 0,6 à 1,5 mètre selon son ancienneté et ses lieux de passages. Elle résiste à une pression de 100 bar.

Ces tubes sont souvent revêtus extérieurement et voir même intérieurement, et presque toujours enterrés sauf dans certaines régions. La réalisation d'un pipeline met en jeu des investissements considérables.



Figure II. 1 Pipeline.

II.3. Phénomènes de corrosion

II.3.1. Métaux et électrolyte

La corrosion est le résultat de la présence simultanée de deux acteurs, le métal et le milieu corrosif. L'environnement est un milieu corrosif, à partir du moment où il contient de l'eau, ce milieu, c'est, bien entendu, l'eau elle-même, milieu complexe contenant quantité d'espèces chimiques dissoutes ou en suspension, mais aussi les sols qui contiennent tous plus ou moins d'humidité, et encore les gaz amenant des condensations d'eau. Cet environnement c'est aussi la plupart des milieux industriels liquides.

La corrosion humide est le résultat d'une réaction électrochimique, (une réaction est un échange - gain ou perte - de particules) dont les particules proviennent d'une électrode métallique et d'un électrolyte qui réagissent au contact l'un de l'autre. Ces réactions, à l'interface d'une phase métallique et d'une phase aqueuse, mettent en jeu à la fois les électrons du métal et certains éléments chimiques, neutres ou ionisés, contenus dans la solution [1].

II.3.2. Électrode métallique

Un métal M est constitué par un édifice cristallin d'ions positifs M^{n+} dans lequel circulent des électrons libres. On sait que ce nuage électronique est responsable de la conductibilité des métaux. La particularité d'un conducteur métallique est de laisser passer le courant électrique sans subir de modification chimique.

En résumé, la distinction entre métal et électrolyte, en ce qui concerne la conduction du courant, s'établit comme suit :

- ❖ Le métal conduit le courant par ses électrons.
- ❖ Le métal est un conducteur électronique.
- ❖ La tension appliquée aux bornes du métal est proportionnelle au courant qui le traverse, c'est un conducteur ohmique auquel s'applique la loi d'Ohm [1].

$$U = R \cdot I \quad (II.1)$$

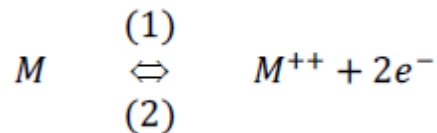
L'électrolyte conduit le courant par ses particules ionisées, il s'agit d'une conduction ionique.

L'application d'une tension minimale d'électrolyse est nécessaire ici pour assurer la circulation d'un courant dans l'électrolyte. Il y a existence d'une force contre-électromotrice, dépendant de l'électrolyte mais aussi des conditions d'expérience, qui retarde l'apparition du courant. L'électrolyte est un conducteur ionique auquel s'applique la loi d'Ohm généralisée.

$$U = E + R \cdot I \quad (II.2)$$

II.4. Processus électrochimiques développés sur une électrode métallique

Plongeons un métal dans un électrolyte ionisant inerte. Les ions du réseau métallique tendent à passer en solution et laissent le métal chargé négativement par ses électrons (voir les figures (II.2), (II.3), (II.4)). Ce passage s'effectue jusqu'à ce que la charge des électrons s'oppose à celles des ions positifs. Il s'établit alors un équilibre réversible entre le métal, ses ions et ses électrons. Les réactions (II.1) et (II.2) ont lieu simultanément.



Ce phénomène se traduit par la création à l'interface métal/solution d'une double couche. Électrochimique responsable de l'existence d'un potentiel du métal dans l'électrolyte.

II.4.1. Potentiel du métal dans la solution

Dans le cas où le métal est plongé dans une solution normale d'un de ses ions, on peut, en utilisant les lois de la thermodynamique, calculer ce potentiel.

Ce potentiel a une valeur déterminée pour un métal donné et permet le classement des métaux suivant leur aptitude à s'ioniser. L'échelle de Nernst figure (II.6) permet ainsi le classement des métaux du point de vue de leur noblesse.

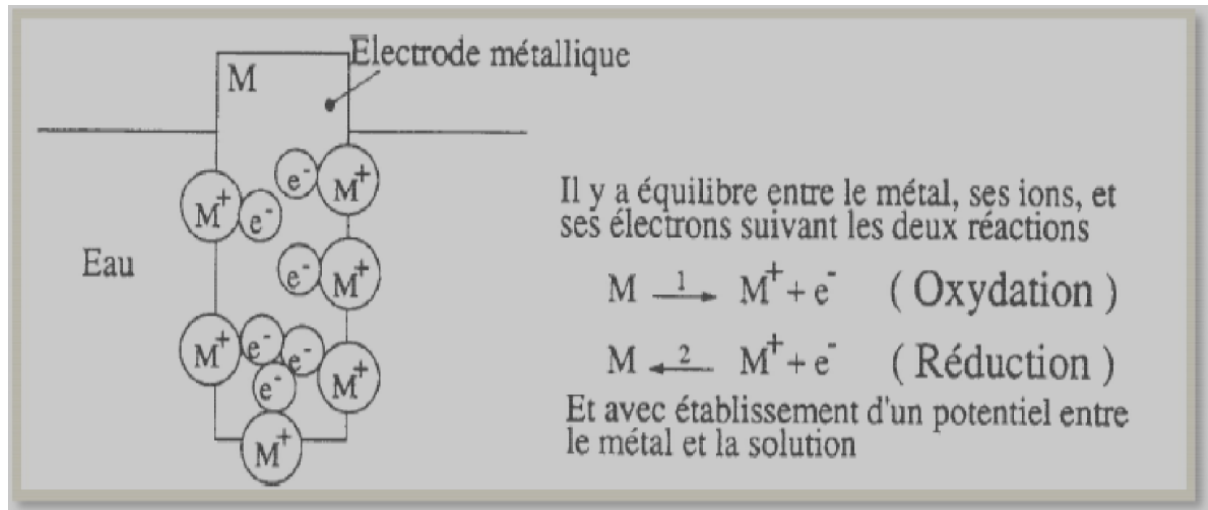


Figure II. 2 Equilibre de deux métaux différents dans une solution [1].

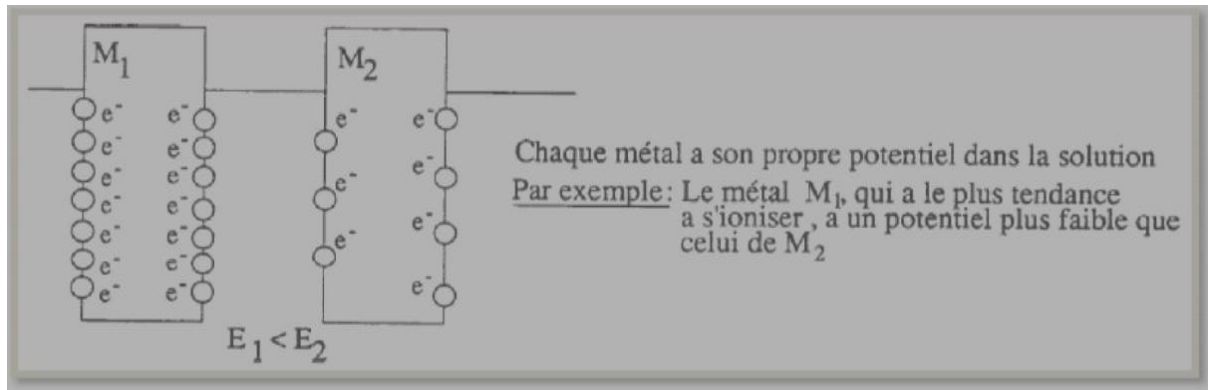


Figure II. 3 Equilibre d'un métal dans une solution [1].

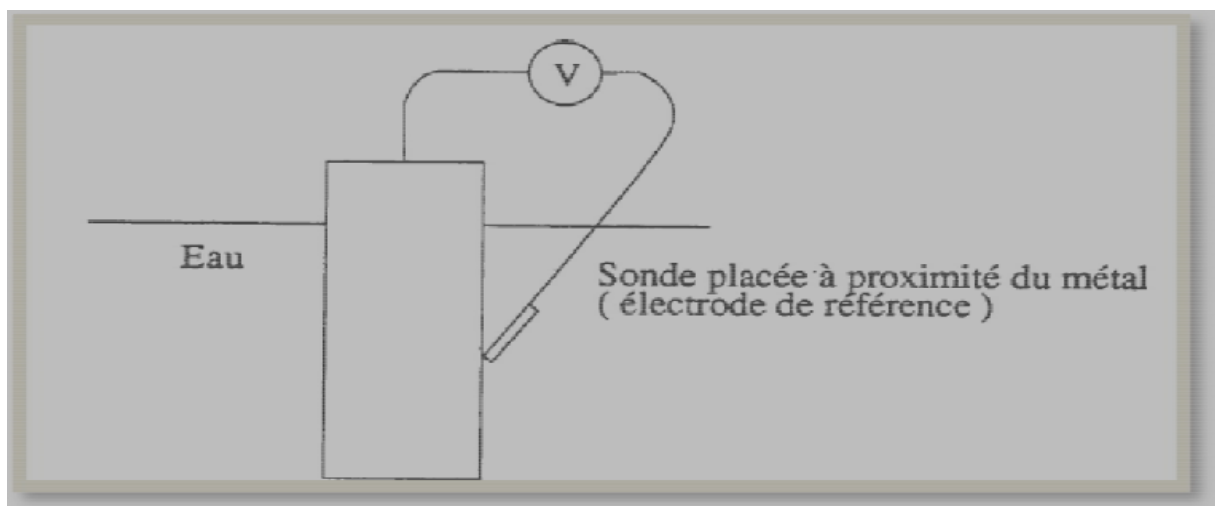


Figure II. 4 Mesure du potentiel d'un métal dans une solution avec une électrode de référence [1].

II.4.2. Électrode de référence

Une électrode métallique plongée dans un électrolyte est assimilable à une demi-pile. Son potentiel ne peut se mesurer physiquement. En effet on ne peut mesurer que la différence de potentiel d'une pile. Dans notre cas, cette pile sera constituée par la chaîne électrochimique constituée de l'électrode métallique à étudier, plongée dans l'électrolyte, et d'une électrode de référence également au contact de l'électrolyte.

L'électrode de référence est constituée elle aussi par une demi-pile soumise à un processus réversible d'oxydoréduction c'est à dire métal/solution normale d'un sel du métal. Elle possède son propre potentiel normal.

L'électrode standard à hydrogène a été choisie arbitrairement comme zéro de l'échelle des potentiels, mais dans la pratique on utilise des électrodes de référence plus simples, telles l'électrode Cu/CuSO_4 , Ag/AgCl , au calomel ($\text{Hg} - \text{Hg}_2\text{Cl}_2 - \text{KCl}$), dont on connaît les potentiels respectifs Figure (II.5) et (II.6).

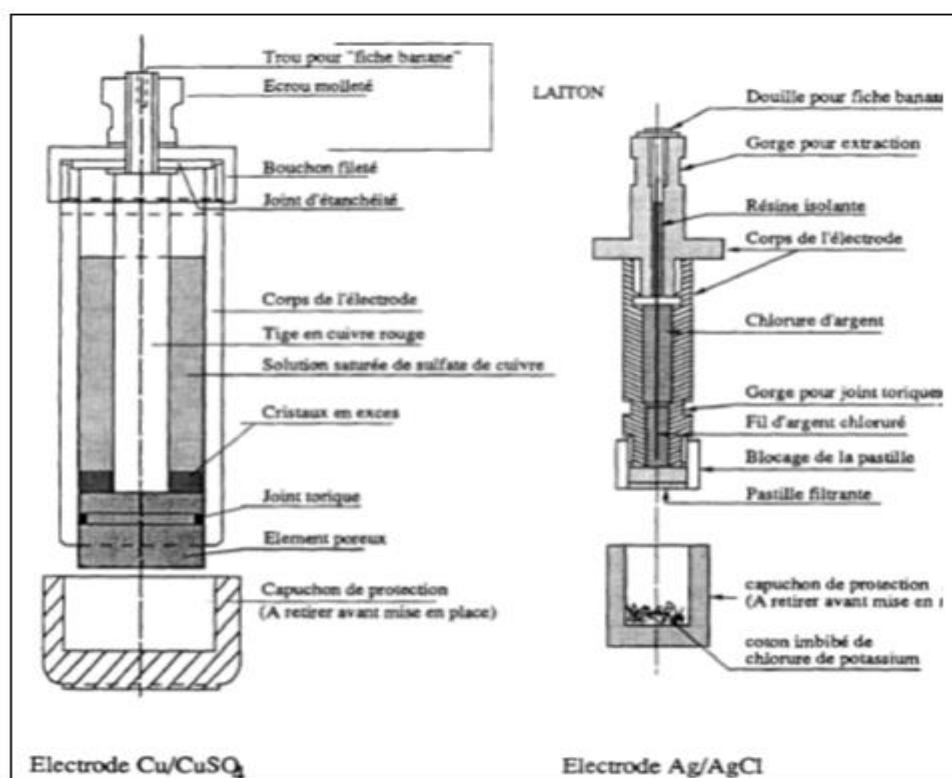


Figure II. 5 Electrode de référence.

Zinc en eau de mer	Hydrogène	Calomel saturé	Chlorure d'argent	Electrode Cu/Cu SO ₄
+ 1100	+ 316	+75	+ 30	0
		-0	-0	
	-0			
+ 250	- 534	- 775	- 820	- 850
				Seuil de protection de l'acier
0				- 1100
			- U + 30	- U
		- U + 45		
- U + 1070				

Figure II. 6 Potentiels respectifs des différentes électrodes.

II.5. Processus de corrosion

La corrosion du métal est un processus de destruction qui s'effectue généralement par action chimique ou électrochimique. La surface métallique est attaquée par son milieu et se transforme en composé d'oxyde, en sel ou en autre composé.

Il s'agit d'une circulation de courant électrique produite sous l'échange d'électrons à l'interface de métal/ électrolyte par l'intermédiaire des réactions chimiques. Les réactions d'oxydation (corrosion) se produisent sur les surfaces anodiques du métal alors que les réactions de réduction se produisent sur les surfaces cathodiques permettant ainsi de créer des piles galvaniques Figure (II.7)[2].

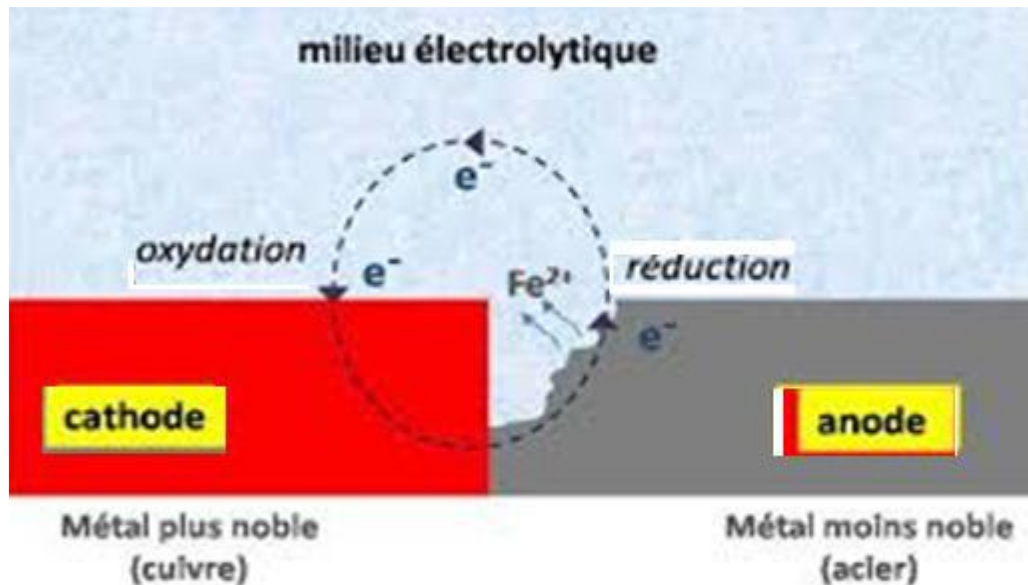
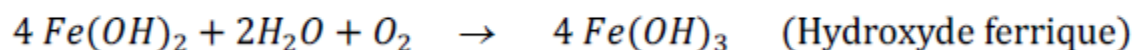
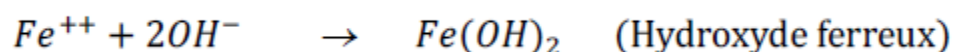


Figure II. 7 Phénomène de corrosion dans une cellule de corrosion [2].

Par ailleurs, le phénomène de dissolution ne se produit que lorsque les quatre éléments ci-après sont présents.

Zone anodique

Elle est le siège de la réaction d'oxydation. À cet endroit, le métal s'oxyde et libère des ions dans l'électrolyte laissant derrière lui une perte d'électrons ce qui entraîne la corrosion de la structure métallique aux endroits appelés zones anodiques. Le mécanisme réactionnel de cette réaction chimique est décrit par les réactions suivantes [2].

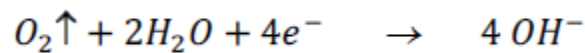


Zone cathodique

Il s'agit du siège de la réaction de réduction où les ions présents dans l'électrolyte sont réduits sur la surface de la cathode. La réaction de réduction des ions d'hydrogène présents dans l'eau est celle qui se produit le plus souvent en formant le gaz d'hydrogène selon le processus chimique suivant :



En présence de sols aérés, une autre possibilité de réaction chimique peut avoir lieu à la cathode. C'est la réduction des atomes d'oxygène dissous dans l'électrolyte qui se produit selon la réaction suivante [4].

**II.5.1. Destruction de l'équilibre par réaction du milieu**

Tout système chimique, contenu dans l'électrolyte, capable de fixer au contact de l'électrode métallique les électrons du métal (ce qui est le cas des oxydants de la solution) provoquera une oxydation du métal. Les oxydants de la solution sont réduits (gain d'électrons). Le métal, qui est dit réducteur, est lui oxydé (perte d'électrons).

Les sites anodiques et cathodiques se formant au hasard sur l'électrode, ce processus conduit à une corrosion de type généralisé. Avec le temps, l'électrode voit sa masse et son épaisseur diminuer régulièrement Figure (II.8) (II.9) (II.10).

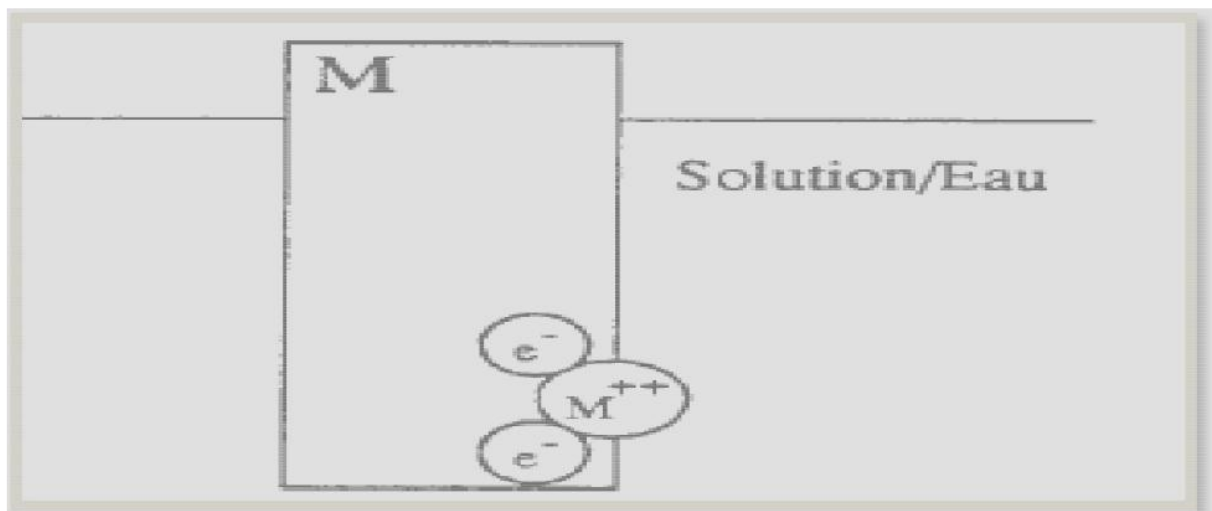


Figure II. 8 Equilibre du métal dans la solution.

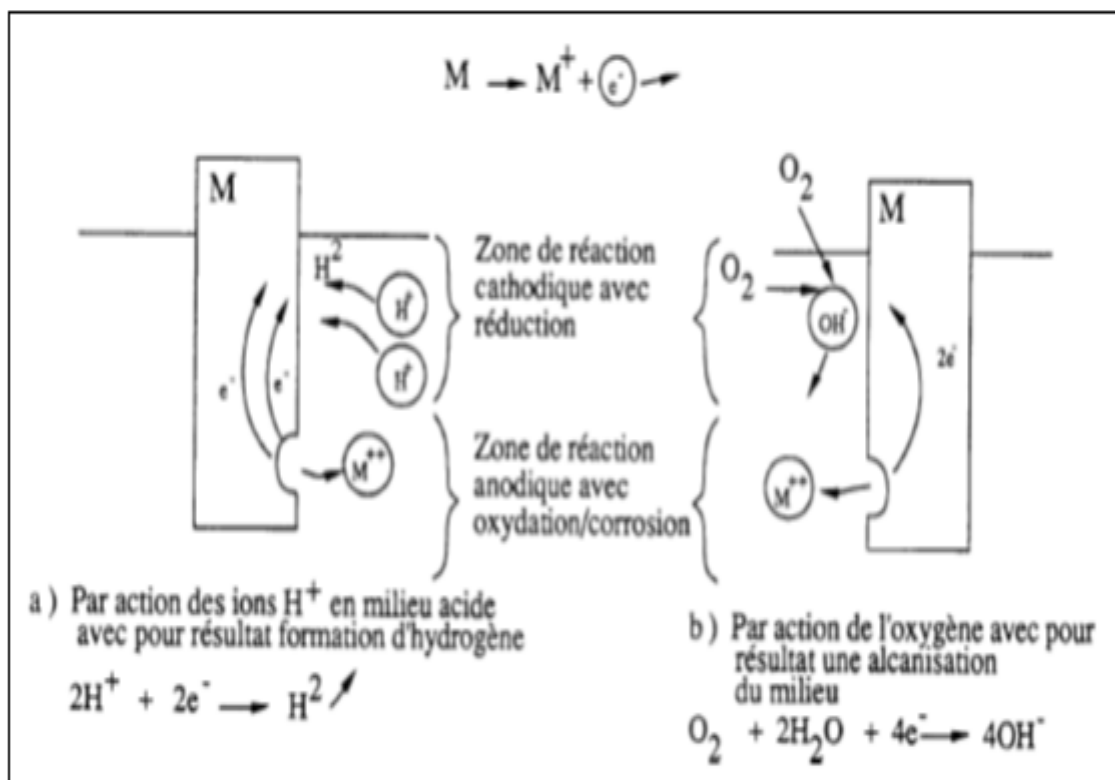


Figure II. 9 Exemples de destruction de l'équilibre.

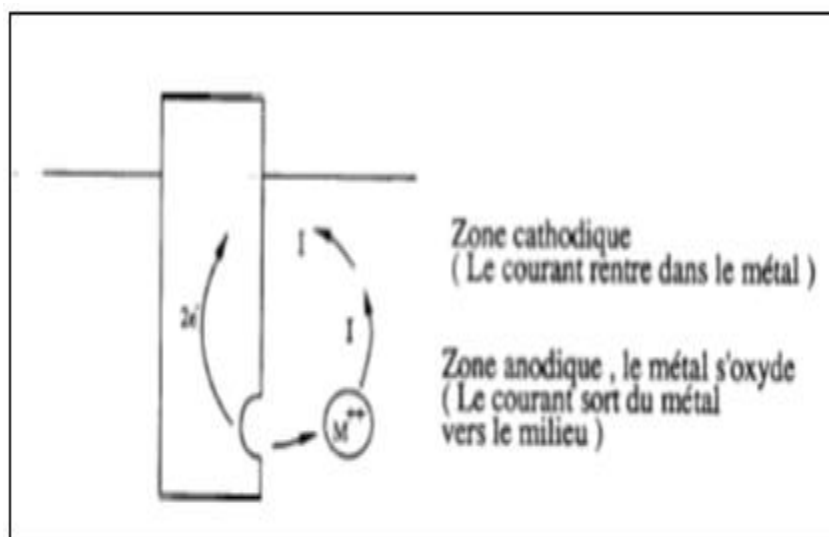


Figure II. 10 Identification du courant.

II.5.2. Destruction de l'équilibre par couplage d'électrodes métalliques

Soit deux électrodes métalliques M_1 et M_2 en équilibre dans un même électrolyte. Ces deux électrodes ont établi chacune leur couche double électrochimique et présentent des potentiels E_1 et E_2 dans la solution Figure (II.11) (II.12) (II.13).

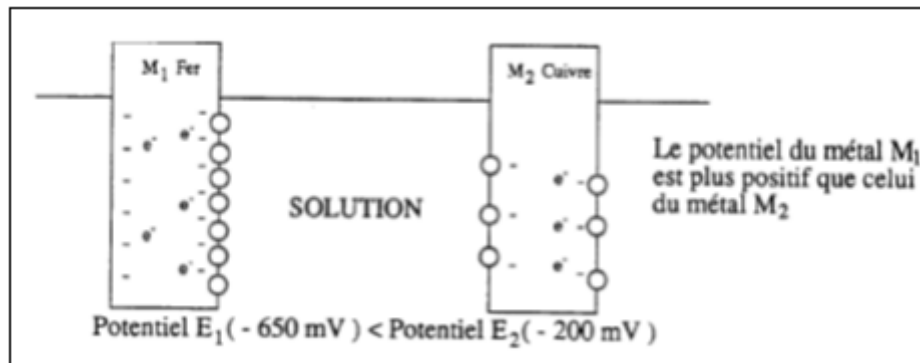


Figure II. 11 Métaux en équilibre dans la solution.

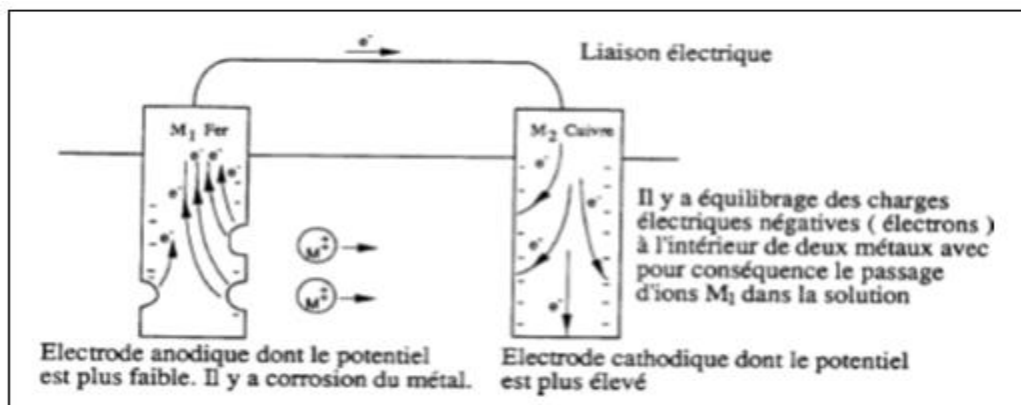


Figure II. 12 Destruction de l'équilibre par couplage galvanique.

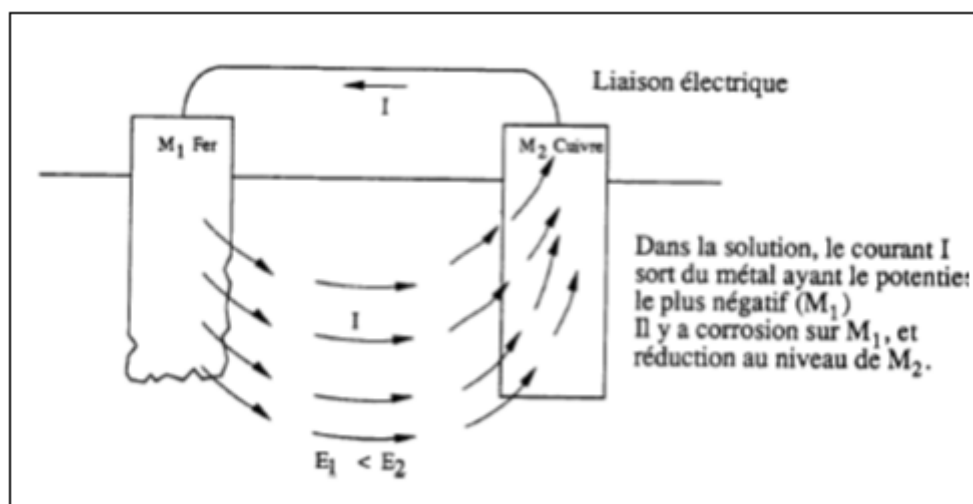


Figure II. 13 Identification du courant.

Les réactions d'oxydoréduction suivent les lois quantitatives de l'électrolyse. La masse de métal déposé sur une cathode, ou la masse de métal consommé à l'anode est proportionnelle à la quantité de courant traversant les électrodes et à la masse atomique M du métal, et inversement proportionnelle à sa valence n Loi de Faraday :

$$W = \frac{MtI}{nF} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

W = Perte de poids du métal corrodé (grammes).

M = Poids atomique du métal.

t = Temps pendant lequel le courant circule (secondes).

I = Flux de courant (A).

n = Nombre d'électrons transférés par atome de métal.

F = Constante de Faraday (96 500).

II.5.3. Etablissement des diagrammes de Pourbaix (pH - tension)

Les diagrammes de Pourbaix potentiel- pH (E-pH) sont utilisés principalement pour aider à prévoir les états les plus stables d'un métal, de ses produits de corrosion et de ses ions associés (forme complexe) dans une solution aqueuse sous différentes conditions de potentiel et de pH.

Le diagramme de Pourbaix localise également les frontières des produits de corrosion insolubles du métal dissous avec les limites en concentration d'ions métalliques libres. Sur le diagramme de potentiel E-pH du système Fe-H₂O à 25°C Figure (II.14), plusieurs points thermodynamiques critiques peuvent être soulevés.

- ❖ Il est possible de ramener le potentiel de Fer à la région d'immunité en appliquant un moyen de protection cathodique adéquat.
- ❖ Il n'existe aucun pH pour lequel le fer métallique et le fer bivalent (ions ferreux) sont stables en présence de l'oxygène.

Lorsque l'acier atteint des potentiels plus électropositifs en présence d'un milieu acide (pH faibles) ou intermédiaires, les ions Fe^{2+} et Fe^{3+} , ont tendance à se stabiliser sous l'effet de l'augmentation de la vitesse de corrosion et en présence des conditions thermodynamiques favorables.

- ❖ Lorsque l'acier atteint un potentiel électropositif dans un électrolyte alcalin, la formation d'un complexe solide tel que le Fe_2O_3 ou le Fe_3O_4 a lieu. Ces complexes peuvent être formés et déposés sur la surface du Fer en formant une couche protectrice [2].

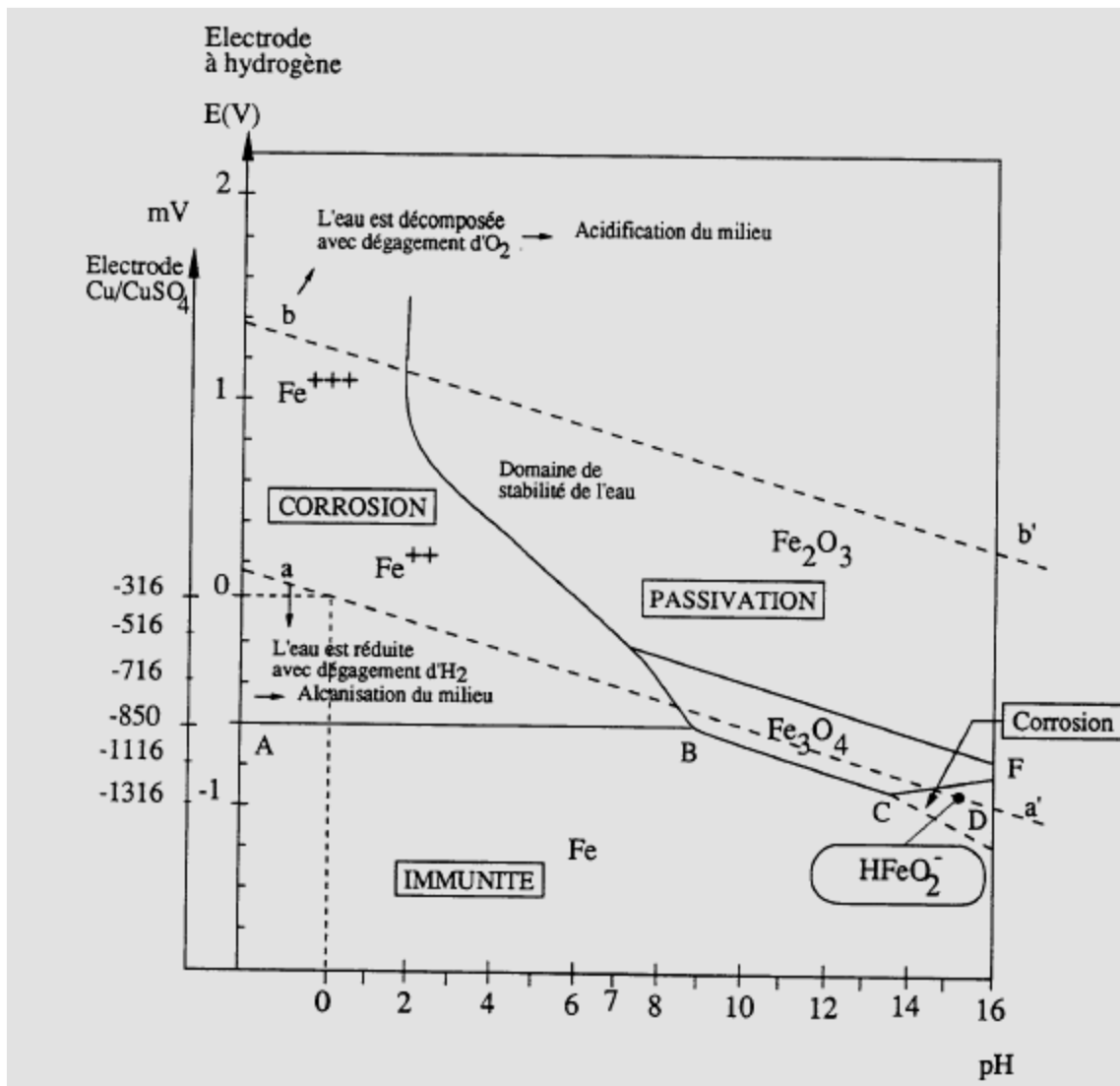
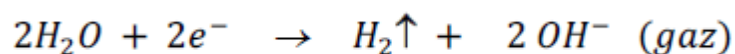
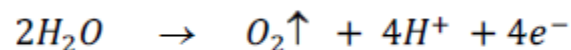


Figure II. 14 Courbe d'équilibre E-pH de Fer-eau à 25°C [2].

La ligne (a) présente la ligne d'évolution d'hydrogène qui est présentée par le mécanisme réactionnel suivant :



La ligne (b) présente la ligne d'évolution d'oxygène dont la réaction est représentée par :



Pour le cas du fer, le diagramme potentiel-pH du système Fer-H₂O à 25°C fait apparaître trois phases distinguées (Pourbaix, 1974), à savoir :

➤ **Phase d'immunité** : À cet état thermodynamique, la corrosion du métal ne peut pas se produire dans son milieu environnant parce qu'il atteint un état stable assuré par l'effet d'équilibre thermodynamique provoqué par le niveau énergétique emmagasiné dans le métal (polarisation).

➤ **Phase de corrosion** : Dans cet état de système, le métal se transforme d'un niveau stable à un niveau actif (corrosion). Cette transformation se traduit par la dissolution de métal en ions solubles dans l'électrolyte.

En solution neutre ou acide, le diagramme prévoit la dissolution du fer avec la formation d'ions ferreux Fe^{2+} et d'ions ferriques Fe^{3+} tandis qu'en solution alcaline, le fer est sous forme d'ions ferrate HFeO_2 .

➤ **Phase de passivité** : C'est la plage où se trouvent les différentes phases condensées sous forme d'oxydes et d'hydroxydes qui recouvrent la surface du métal et le protègent contre les attaques de corrosion. Le métal a donc été oxydé en surface mais le protège d'une agression en profondeur. La couche passive recouvrant la surface métallique est généralement très stable, compacte et fortement liée au métal.

II.6. Facteurs agissant sur la corrosion des ouvrages métalliques enterrés

II.6.1. Le sol comme électrolyte

Le sol est un à mal gamme complexe de solides, liquides et gaz, qui font qu'il est parfois agressif, ce qui conduit à des corrosions extrêmement rapides, mais qu'il est, dans certains cas, parfaitement inerte et n'a qu'une action tout à fait négligeable. L'agressivité absolue du sol pour un métal découle de ses propriétés physiques et chimiques.

II.6.2. Agressivité du sol

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

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.

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 [2].

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 (II.1) où cinq classes de sol sont ainsi définies en fonction de leur résistivité et de la corrosivité associée à chacune d'elles.

Tableau II. 1 Corrosivité du sol selon la résistivité [5].

Plage de résistivité du sol ($\Omega \cdot \text{cm}$)	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.

II.6.2.1. Paramètres déterminant l'agressivité du sol

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

- ❖ **Résistivité du sol** : 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.

II.6.2.2. Méthode de mesure de la résistivité du sol

La méthode la plus utilisée pour déterminer la résistivité des sols est la méthode des quatre électrodes de Wenner. Cette technique présente de nombreux avantages dont entre autres sa caractéristique non destructive, capacité de fournir de hautes résolutions, relevé de mesure rapide et données facilement interprétables [2].

II.6.2.3. Principe de mesure de la résistivité du sol

Tel qu'illustré sur la Figure (II.15), 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. 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'Ohmmètre. Toutefois, la connaissance de la distance entre chaque piquet de terre est nécessaire dans chaque mesure [5].

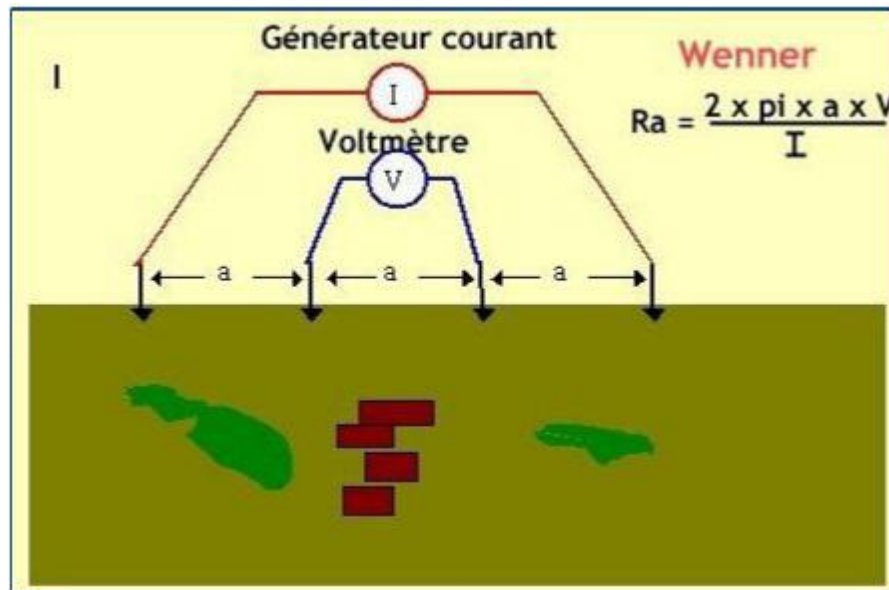


Figure II. 15 Principe de fonctionnement de la méthode de Wenner. [5]

II.6.3. Piles dues à l'électrolyte

Ce sont les piles créées par les hétérogénéités du sol qui engendrent sur un ouvrage métallique pourtant parfaitement homogène, des différences de potentiel locales, donnant naissance à un courant qui conduit à l'oxydation de la partie la plus négative du métal Figure (II.16).

C'est ainsi que s'expliquent les corrosions des pieux métalliques sous la ligne d'eau, le creusement jusqu'au percement, de cavités mal aérées, ou bien la corrosion d'un ouvrage recouvert de façon discontinue par des oxydes, de la calamine, ou d'autres dépôts. Ce phénomène est responsable des corrosions situées sur la génératrice inférieure des tubes en fond de fouille, là où l'oxygène de l'air diffuse le moins, ainsi que des corrosions qui apparaissent au niveau des sols dont l'aération n'est pas la même en tous points (sable ou cailloux et argile par exemple).

Les piles géologiques sont caractéristiques des actions qui peuvent se développer sur une conduite, ouvrage de grande longueur, traversant des sols de compositions très différentes, lui conférant des potentiels locaux différents.

En général, les sols argileux, marécageux et les terrains humides constituent des zones anodiques vis à vis des autres terrains.

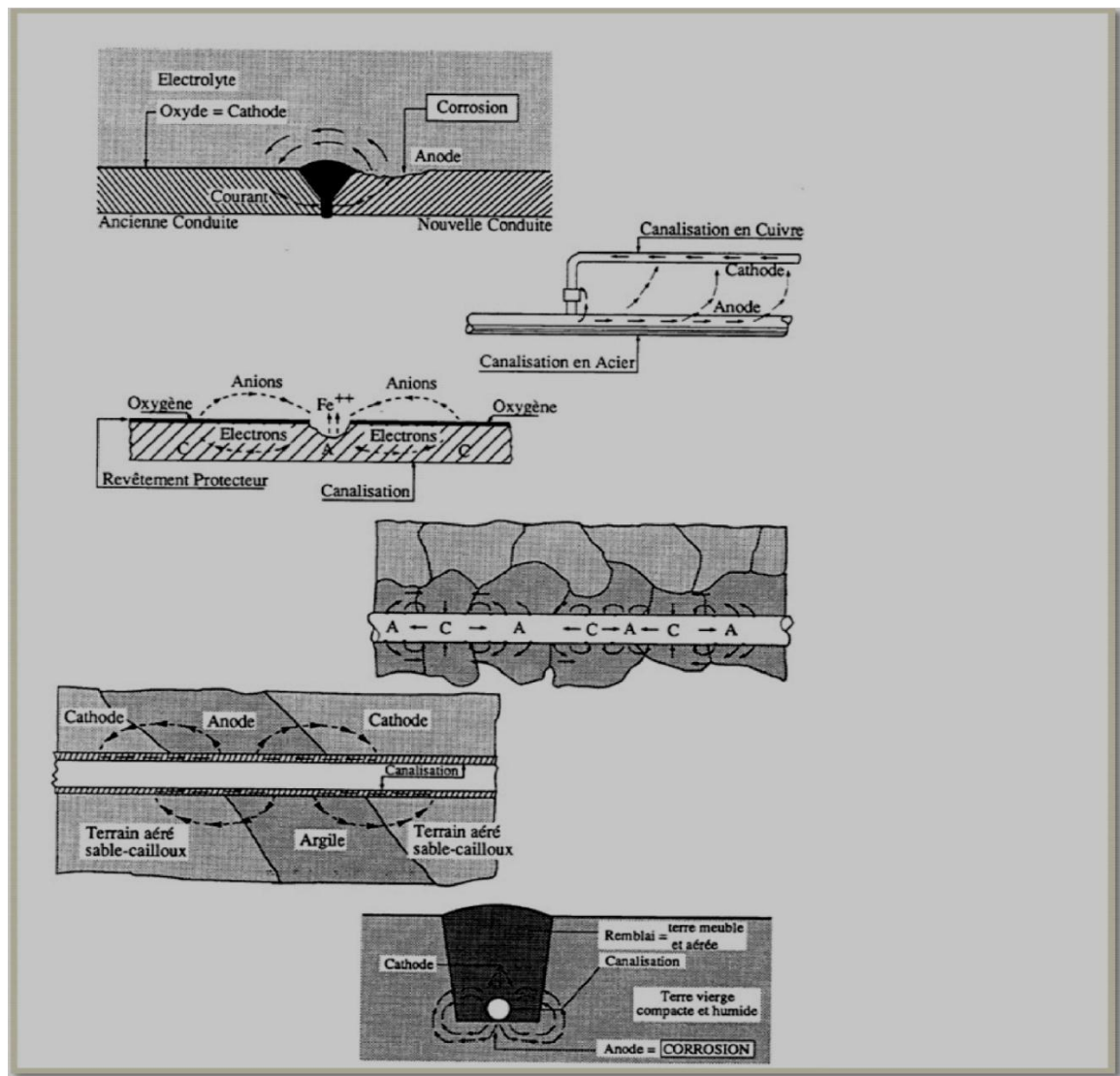


Figure II. 16 Différentes piles galvanique.

II.7. Différents types de corrosion

La corrosion peut être regroupée sous les formes générales suivantes:

II.7. 1. Corrosion uniforme

La corrosion uniforme est caractérisée par un taux de corrosion relativement uniforme sur l'ensemble d'une surface exposée.

Ce type de corrosion est habituellement prévu pour les pièces faisant partie d'éléments structuraux qui peuvent être sacrifiés au fil du temps, mais elle affecte tous les métaux communs. Dans le cas des aciers au carbone, le fer réagit avec l'oxygène pour former de la magnétite minérale, qui est de l'oxyde de fer dont la formule chimique est Fe_3O_4 . [5]

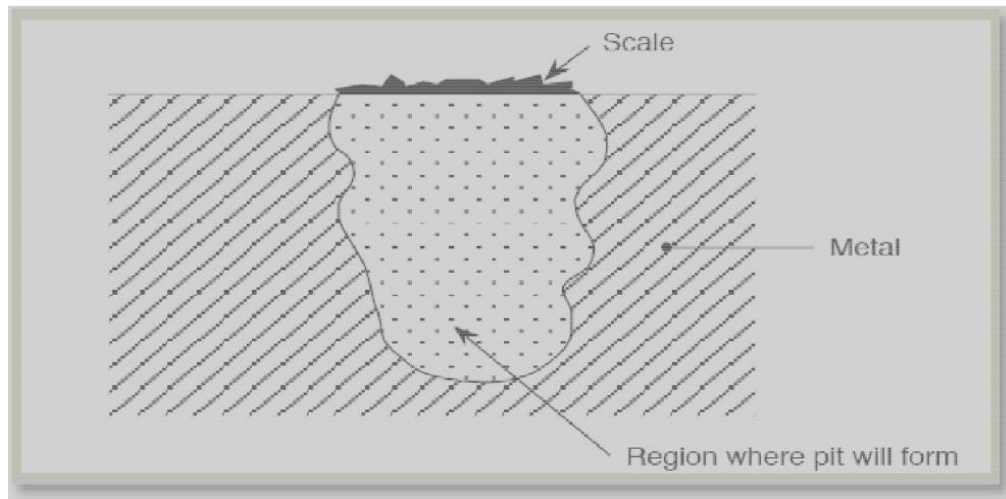


Figure II. 17 Corrosion par piqûres [5].

II.7. 2. Corrosion galvanique

Corrosion connue aussi sous le nom de corrosion de contact. La notion de couple galvanique correspond à un type particulier de corrosion qui trouve son origine dans la corrosion électrochimique résultant de la formation d'une pile par mise en contact de deux matériaux conducteurs différents Figure (II.18) dans un environnement assurant un **milieu électrolytique**. Dans ces conditions, il y a formation d'un couple galvanique. La corrosion galvanique apparaîtra donc principalement dans les zones d'assemblage entre une structure métallique et une structure composite carbone/résine, et dans les zones de liaison de deux structures composites carbone/résine à l'aide d'éléments métalliques (vis, rivets,...) [3].

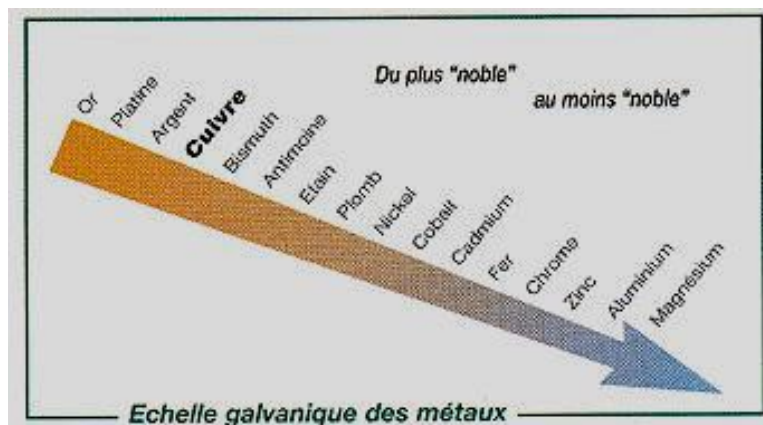


Figure II. 18 Echelle galvanique des métaux [5].

II.7. 3. Fissuration par corrosion sous contrainte (fcc)

La fissuration par corrosion sous contrainte peut se produire là où des contraintes de traction soutenues s'ajoutent à la corrosion et entraînent la formation de fissures localisées. On observe habituellement la FCC dans les systèmes en acier inoxydable, et le phénomène est exacerbé par la sans phénomène précurseur.

II.7. 4. Corrosion-érosion

La corrosion-érosion se produit lorsque le débit de l'eau se combine à la corrosion pour augmenter considérablement la vitesse d'enlèvement du métal par rapport à la vitesse d'enlèvement à des débits plus faibles. L'effet du débit est dû à l'enlèvement des ions métalliques et des couches protectrices à mesure qu'ils se forment, ce qui accroît la force d'entraînement de corrosion chimique et peut empêcher la formation d'une couche protectrice. Cet effet est l'une des principales causes de perte de métal dans les tubes des condensateurs de vapeur en alliage de cuivre.

Les particules fines et d'autres particules issues des produits de corrosion comme le sable et le limon dans le fluide de refroidissement peuvent également accroître la vitesse de corrosion.

II.7. 5. Corrosion par crevasses

Cette forme de corrosion porte parfois le nom de corrosion caverneuse ou interstitielle. Elle apparaît dans toutes les zones de confinement, les recoins de structure, les contacts entre pièces mal ajustées, sous les joints. C'est une attaque électrochimique par « Aération différentielle ».

Elle se caractérise par la dissolution très rapide de la zone confinée, précédée d'un temps d'incubation plus ou moins long pendant lequel le métal ne subit aucun dommage [7].

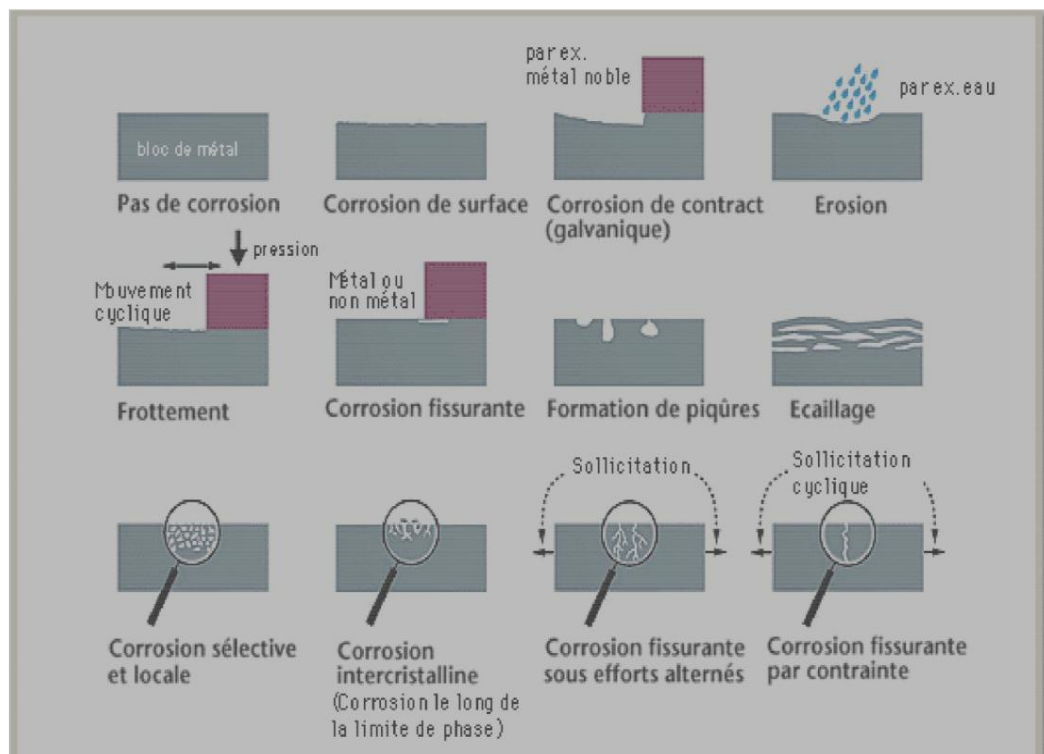


Figure II. 19 Différents types de corrosion.

II.7. 6. Corrosion par les courants vagabonds

Les lignes de transport à traction électrique sous courant continu (S.N.C.F. – tramways, métro), propagent généralement dans le sol des courants dits vagabonds Figure (II.20). En effet, le courant amené par la caténaire, qui peut pour certains trains être de plusieurs milliers d'ampères, retourne à la sous-station émettrice par le rail de roulement.

Ce rail plus ou moins bien éclissé, plus ou moins bien isolé du sol selon l'état du ballast, laisse échapper une partie importante du courant qui peut alors emprunter, sur des parcours de dizaines de kilomètres, des circuits peu résistants électriquement, tels que les conduites, avant de regagner le rail et le générateur à proximité de la sous-station [5].

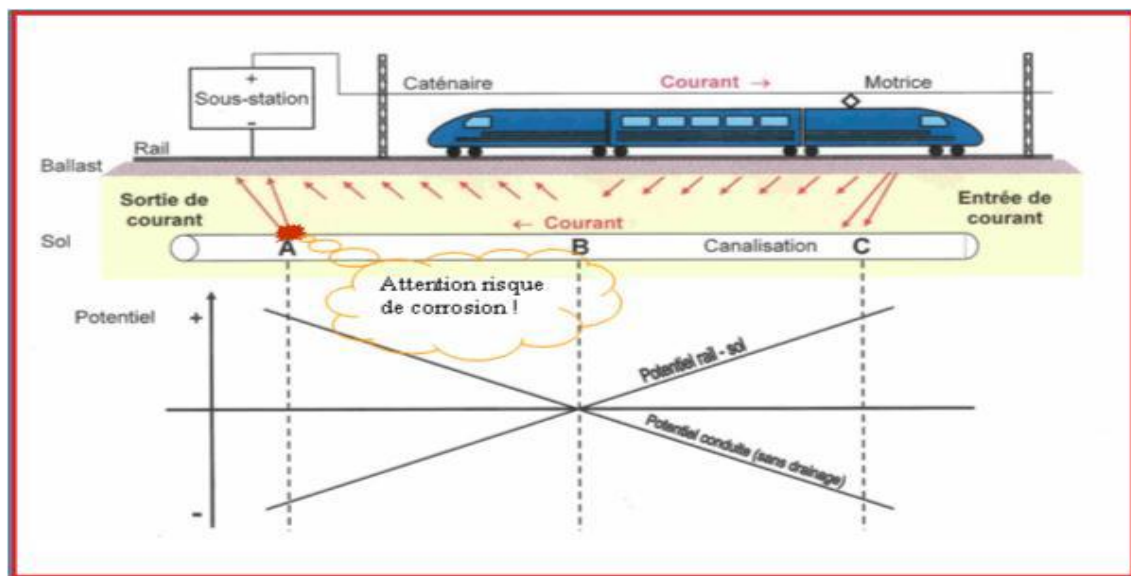


Figure II. 20 Corrosion par courant vagabond [5].

II.8. 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 III

Types de protection cathodique du pipeline

III.1. Introduction

Ce chapitre met en évidence les types de protection cathodique, la protection cathodique par anodes galvaniques et la protection par courant électrique imposée, et tout ce qui concerne l'application et l'installation des méthodes de protection cathodique, et les équipements électriques dont nous avons besoin.

III.2. Moyens techniques appliqués contre la corrosion

III.2.1. 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 [2].



Figure III. 1 Revêtement d'un tube.

III.2.1.1. Premier principe

Le 1^{er} 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 conserver 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. [5].

III.2.1.2. Deuxième principe

Le 2^{ème} principe consiste à créer au niveau du métal une couche protectrice en utilisant soit le pouvoir passivant de certains sels métalliques (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.

III.2.1.3. 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 [5].

III.2.1.4. 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 [5].

III.2.1.5. 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 [5].

III.2.2. 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 [5].

III.2.3. Protection cathodique (Protection active)

III.2.3.1. Historique

La première utilisation de la protection cathodique remonte à **1824**, lorsque **Sir Humphrey Duffy** de la marine britannique a installé des pièces de fer à l'extérieur sous une ligne flottante sur une coque en cuivre. La corrosion du fer est plus facile que le cuivre lorsqu'il entre en contact avec la coque.

III.2.3.2. 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 électronégative. 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 [3].

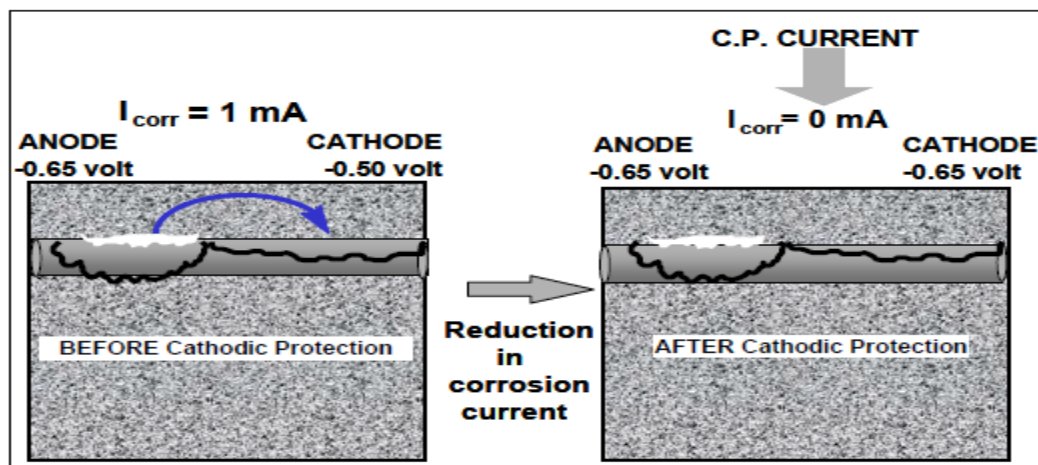


Figure III. 2 Protection cathodique appliquée à une structure [3].

III.2.3.3. 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 [3].

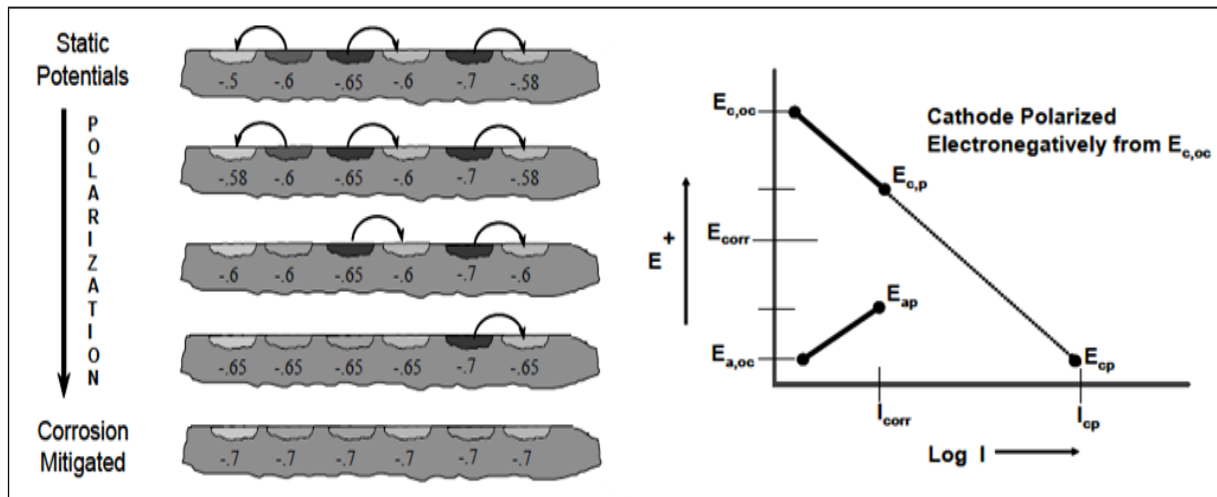


Figure III. 3 Polarisation d'une structure [3].

III.2.3.4. Critère de la protection cathodique

- ❖ 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 réduite 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 [2].

III.2.3.5. Champ d'application de la protection cathodique

III.2.3.5.1. Ouvrages au contact du sol

- Canalisations de produits pétroliers liquides, de gaz combustibles ou d'autres fluides de types produits chimiques.
- Extérieur des cuvelages des puits (pétrole, gaz).
- Réservoirs enterrés.
- Réservoirs de propane liquide installés ou enterrés.
- Réservoirs des stations-service les plus importantes [6].

III.2.3.5.2. Ouvrage submergé

- Les installations offshore fixes et les navires.
- Les bouées et ouvrages portuaires [6].

III.3. Type de la 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 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 :

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

III.3.1. Protection par anode galvanique

La protection cathodique galvanique fonctionne sur le principe qu'un métal plus actif connecté à un matériau moins actif formera une cellule de corrosion galvanique. Ceci est utilisé à notre avantage pour protéger le métal le moins actif. L'alliage plus actif se corrode se «sacrifie» pour protéger le métal protégé, par conséquent, ces anodes sont souvent appelées anodes sacrificielles.

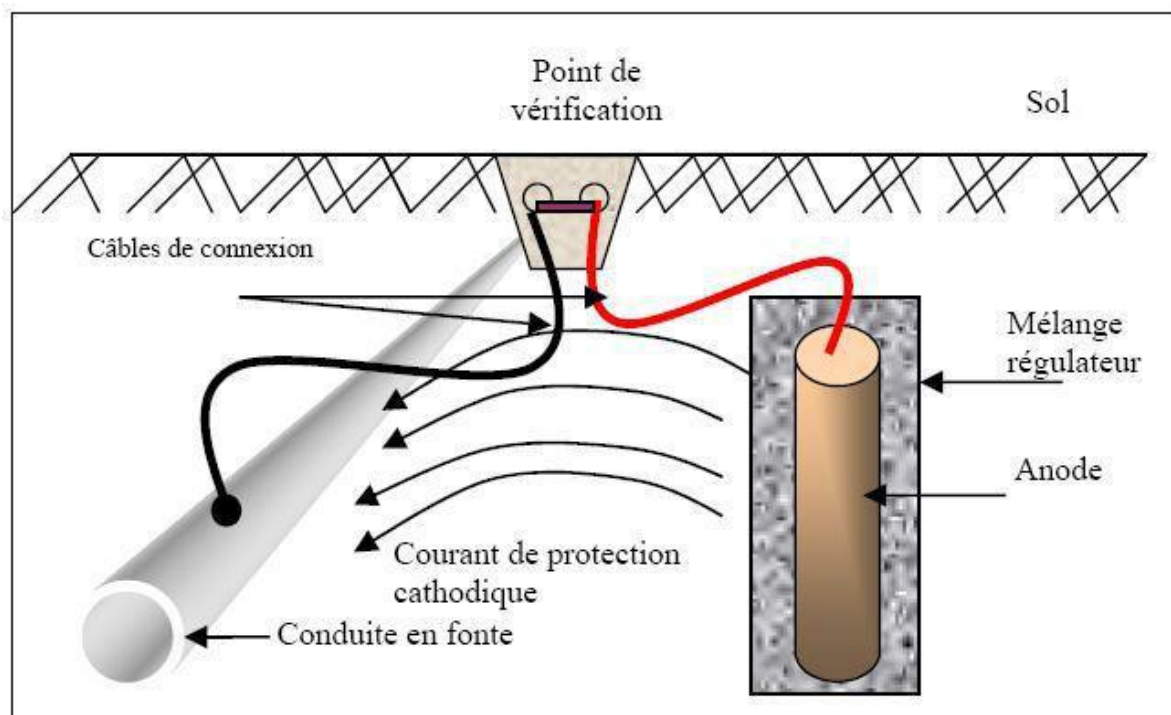


Figure III. 4 Protection cathodique à anode galvanique [5].

III.3.1.1. 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 thermite ou d'une autre méthode appropriée. La soudure à la thermite 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 [3].



Figure III. 5 Soudage des câbles de raccordement.

III.3.1.2. 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 [6].

III.3.2. Protection cathodique par courant électrique 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 protection favorisent l'application de la protection par courant imposé [7].

III.3.2.1. Principe de la protection cathodique (par courant électrique imposé)

Le principe de la protection cathodique est d'utiliser le courant imposé en connectant l'électrode positive à la source tandis que l'électrode négative est connectée à la structure à protéger. Comme le montre la figure (III.6), le courant s'écoule de la barrière avec de l'électricité, puis pénètre dans la structure, créant une diminution souhaitable des capacités correspondantes de l'immunité du métal. Par exemple, pour l'acier dans les sols typiques, la différence de potentiel (**ddp**) entre l'électrode de référence du sulfate de cuivre saturé est inférieure à **-0,850V** à tous les points de la structure. En général, la valeur minimale de la limite que nous essayons d'atteindre est d'environ **(-1)** volt, cette norme doit être atteinte à tous les points du pipeline après le fonctionnement du système, quelles que soient les conditions de fonctionnement [7].

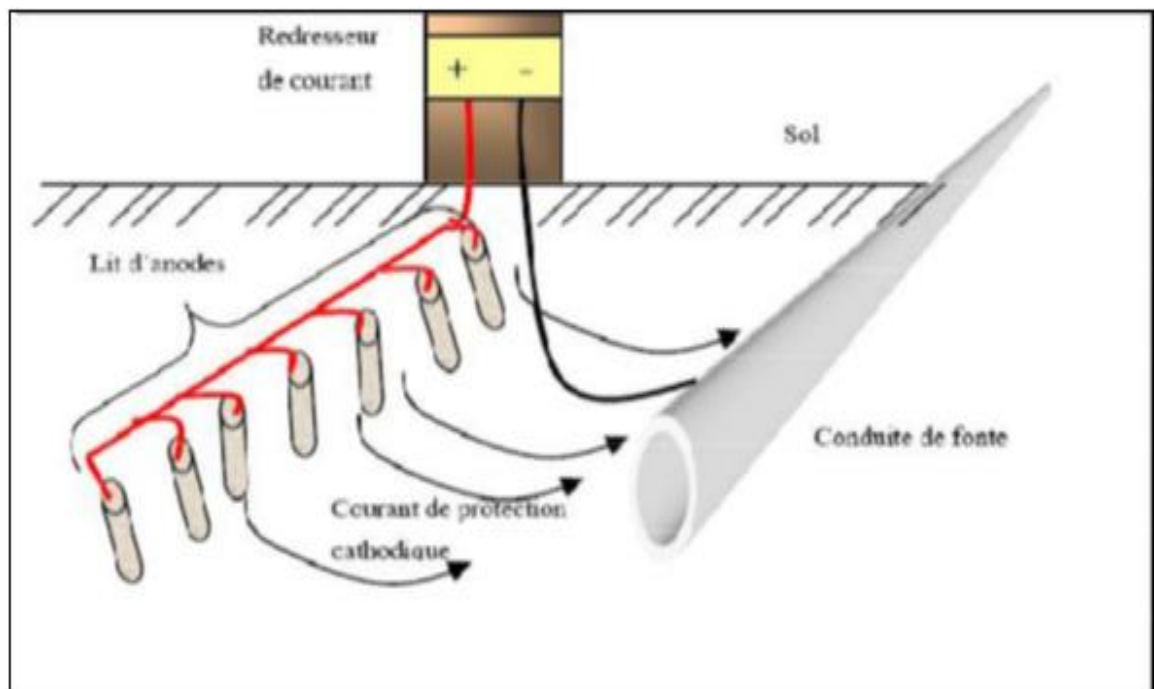


Figure III. 6 Protection cathodique à courant imposé [3].

III.3.2.2. Applications de la protection cathodique par courant imposé

- Les grandes exigences de courant, en particulier pour les surfaces nues ou mal enduites les structures.
- 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 [6].

III.3.2.3. Installation d'un poste de protection cathodique à courant imposé

III.3.2.3.1. Générateur de courant continu et ses 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.

III.3.2.3.2. 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 III. 1 Formes et dimensions des anodes [5].

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 III. 2 Propriétés et milieu d'utilisation des déversoirs [5].

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 Milieux liquides chlorurés Milieux 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 (III.7). Le courant I débité par une anode dépend de la résistance de cette dernière et également de la structure à protéger.

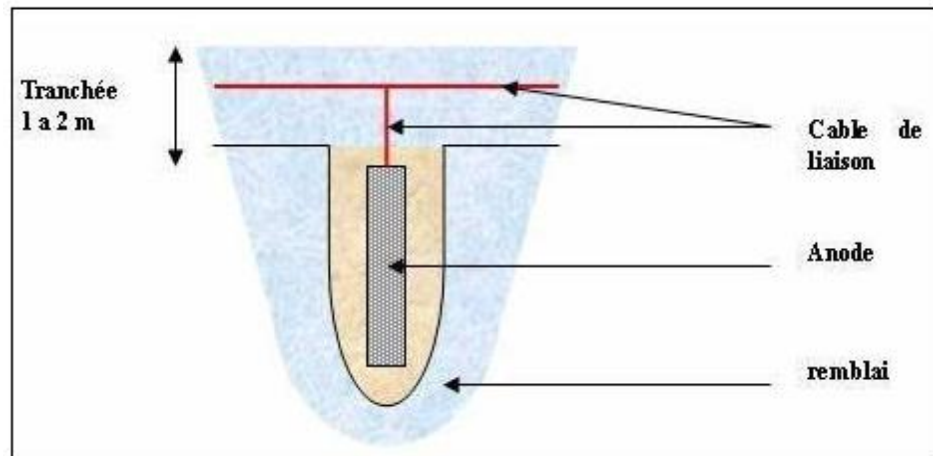


Figure III. 7 Déversoir anodique posé verticalement.

❖ 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 (III.8). Il est recommandé, par exemple l'utilisation de vieux rails ou autre ferraille de forme similaire.

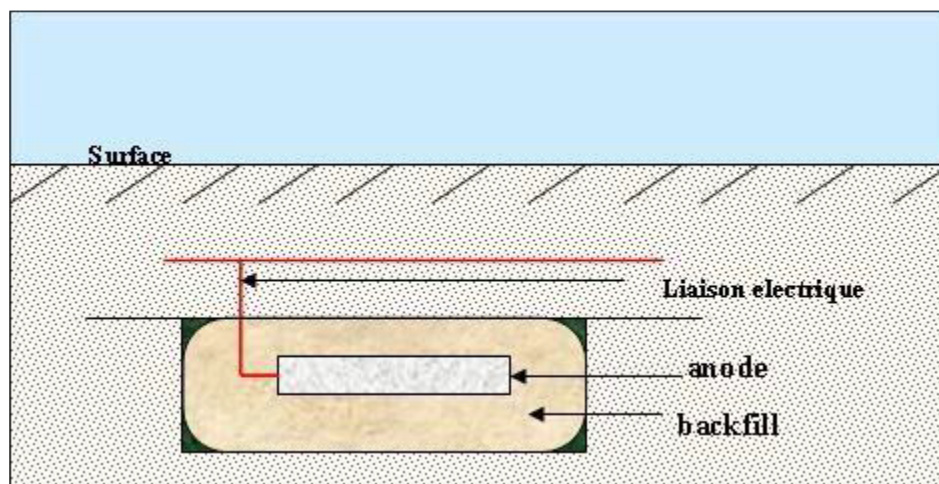


Figure III. 8 Déversoir anodique posé horizontalement.

III.3.2.4. 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 III. 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) 4	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)	CuSO ₄ , saturé	0,316

III.3.2.5. 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 repérées 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.

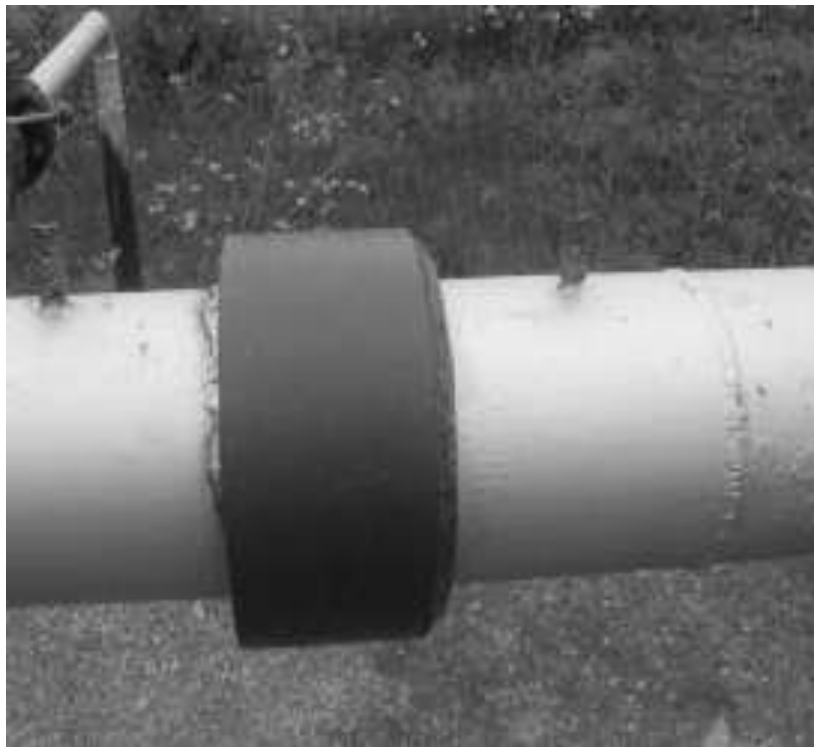


Figure III. 9 Joint isolant monobloc.

III.3.2.6. Avantages et inconvénients des systèmes protection cathodique

L'utilisation d'un système de protection cathodique est toujours bénéfique, la sélection du système à adopter demeure généralement assujéti à des conditions environnementales, énergétiques et économiques. À cet égard, 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 (III.4) donne un aperçu sur les éléments comparatifs en question [5].

Tableau III. 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

III.3.2.7. Choix du système de protection cathodique

Le choix d'une méthode de protection par rapport à une autre selon baeckmann et scwenk, dépend essentiellement de la demande en courant et de la résistivité du sol (électrolyte) telle qu'illustré dans la Figure (III.9).

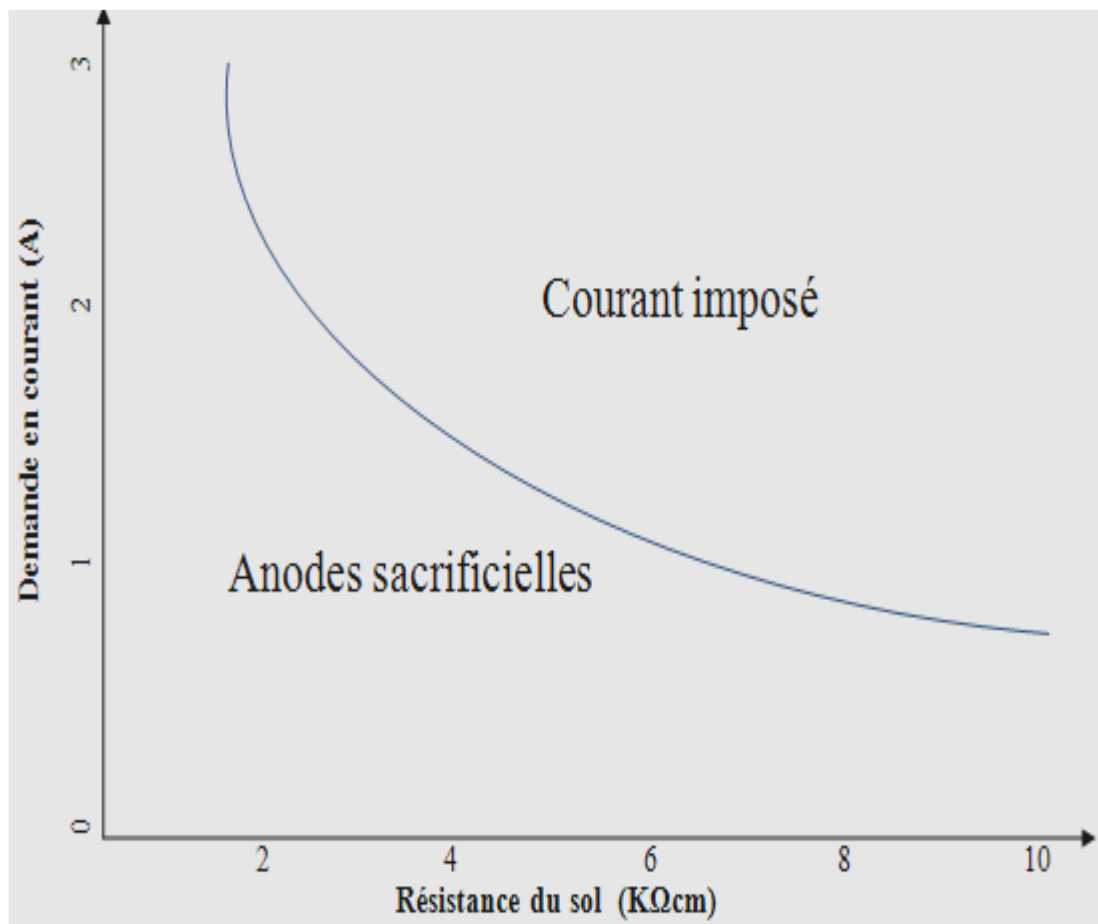


Figure III. 10 Choix du système de protection cathodique.

Aussi la sélection d'un système de protection par rapport à un autre devra être établi en tenant compte des comparaisons d'un certain nombre de facteurs économiques et aussi de problèmes de maintenance et de suivi de la protection par courant imposé qui sont très souvent limitatifs de leurs emploi tel que montré sur le tableau suivant Tableau (III.5).

Tableau III. 5 Comparatif entre la protection cathodique par anode galvanique.

	anode sacrificielle	système à courant imposé
Installation	Simple	Complexe
Source d'énergie	Non nécessaire	Indispensable
Distribution du courant sur la structure	Homogène	Souvent hétérogène
Influence de la résistivité du milieu	Non envisageable si la résistivité est trop grande	Aucune difficulté
Débit par anodes	Faible	Elevé
Nombres d'anodes	Important	Faible
Flexibilité dans les conditions de fonctionnement	Aucune	Grande
Risque de surprotection	Quasi nul sauf cas d'anode de magnésium	Possible
Interférences avec d'autres structures	Non	Possible
Risques humains	Non	Possible
Surveillance	Aisée et occasionnelle	Surveillance continue et nécessitant des techniciens spécialisés

III.4. 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).

III.4.1. 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).

III.4.2. 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.

III.4.3. 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.

III.5. Conclusion

La protection cathodique nécessite une étude minutieuse et de gros équipements électriques afin de fournir à tous les points de canalisation le courant approprié pour ajuster la différence de latence entre la cathode et l'anode, ainsi que divers obstacles techniques et naturels qui ne permettent pas le succès du processus, et c'est ce qui nous fait travailler pour éliminer les obstacles et assurer Succès technologique depuis 30 ans.

Chapitre IV

Dimensionnement de protection cathodique par courant imposé

IV. 1. Introduction

Ce chapitre contient la dimension de système de la protection cathodique par courant électrique imposé de projet du gazoduc Illizi Djanet, qui est devisé en partie théorique qui présenté les équations des paramètres électrique, et autre partie représentée les résultats des calculs de notre étude.

IV. 2. Calcul de dimensionnement du système de protection cathodique

IV.2. 1. Protection cathodique par courant imposé

Ce mode de protection est appelé, plus communément, protection par soutirage. Le principe de cette protection, consiste à relier au pôle négatif d'une source à courant continu, l'ouvrage à protéger, tandis que le pôle positif est relié à une pièce conductrice (en métal ou en graphite) enterrée à une certaine distance.

Le courant partant de cette pièce appelée déversoir, traverse le sol, est capté par la canalisation et retourne au générateur par circulation dans le métal de la conduite.

La canalisation est alors rendue négative par rapport au sol. Si le critère de potentiel est atteint en tous points, la conduite est protégée cathodiquement.

Tableau IV. 1 Principales caractéristiques de l'ouvrage [8].

Caractéristiques	Valeurs
Longueur de la conduite environs	379 km
Diamètre de la conduite	10"
Épaisseur	8.7 mm
Nuance de l'acier	API 5L X52
Revêtement extérieur	PEMD
Revêtement intérieur	EPOXY
Terminal de départ	PK 88+000 ILLIZI
PK FINAL	PK 466+654 DJANE
Poste de coupure	02
Postes de sectionnement	17

IV. 3. Note de calcul de la conception du système de protection cathodique

IV.3.1. Résistivité du sol

$$\rho = 2\pi aR \quad (IV. 1)$$

Avec :

ρ : Résistivité du sol l'instant t. a : Distance entre piquets R : Résistance mesurée t.

Parfois les données dont nous disposons ne nous permettent pas d'utiliser l'équation précédente, alors on déterminera la résistivité moyenne du sol comme suite :

Avec :

$$\rho_{sm} = \frac{1}{n} \sum \rho_i \quad (IV. 2)$$

ρ_{sm} : Résistivité moyenne du sol exprimée en (Ωm)

ρ_i : Correspondant à la résistivité (i).

n : Nombre de mesures effectuées.

Remarque : en l'absence des données de résistivité du sol toute au long de la canalisation et qui doivent être prises au moins deux (02) mesures par kilomètre (km) tout au long de la Canalisation, nous avons opté pour une moyenne qui égale à la mesure prise au niveau du poste considéré plus les mesures des deux (02) postes adjacentes (celui d'avant et celui d'après), le tout divisé par trois (3), ce qui implique l'impossibilité de l'utilisation de la valeur moyenne pondérée de référence de la résistance d'isolement de la conduite.

IV.3.2. Résistance longitudinale de la conduite par unité de longueur

Autrement appelée résistance transversale, par unité de longueur elle s'exprime

En [Ω / m] est donnée par :

$$RL = \frac{\rho a}{\pi (D_{ext} - \sigma) \sigma} \quad (IV.3)$$

Avec :

ρ_a : Résistivité de l'acier (Ωm). D_{ext} : Diamètres extérieurs de la canalisation (mm).

δ : Épaisseur moyenne de la canalisation (mm).

IV.3.3. Résistance conduite-sol

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

$$R(t) = R_{ti} e^{-\beta t} \quad (IV.4)$$

Pour une durée de protection « t » connue. Exprimée en [$\Omega.m^2$], elle est obtenue par :

$$R_{tm} = \frac{R_{ti}}{\beta t (1 - e^{-\beta t})} \quad (IV.5)$$

Aves :

R_{ti} : Résistance transitoire initiale pour un revêtement neuf ($\Omega.m^2$).

β : Coefficient tenant compte du vieillissement du revêtement ($1/an$).

t : Durée d'exploitation (ans).

IV.3.4. Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la conduite

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

$$R_{rm} = \frac{R_{tm}}{\pi D_{ext}} \quad (IV.6)$$

IV.3.5. Constante de distribution du potentiel le long de la conduite:

$$\alpha = \sqrt{\frac{RL}{R_{rm}}} \quad (IV.7)$$

IV. 4. Détermination du nombre de postes de soutirage et du nombre d'anodes

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.

IV.4.1. Résistance d'entrée d'une conduite revêtue

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 :

$$Z_m = \sqrt{\frac{Rl \cdot R_{rm}}{2}} \quad (IV.8)$$

IV.4.2. Valeurs des potentiels

Généralement on distingue pour les structures métalliques 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 (Cu-CuSO₄).

Le potentiel naturel c'est le potentiel stationnaire du métal dans le sol, on le notera E naturel. L'expérience montre que pour l'acier cette valeur est dans l'intervalle de **- 0.45 à -0.617** volt, en revanche, si elle n'est pas connue on peut supposer que **Enat = - 0.55 V**.

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 choisi en fonction du type de revêtement, c'est-à-dire que pour une valeur donnée, le gain de potentiel correspondant; E_{max} ne doit pas excéder **-1700 (mV)** pour un revêtement tri couche.

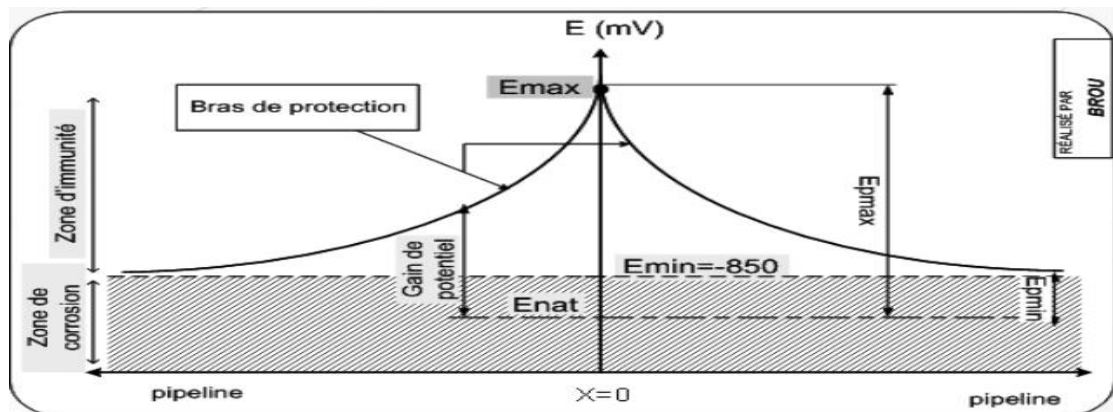


Figure IV. 1 Variation du potentiel de protection le long d'une conduite [6].

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, noté $E_{\max}$ et $E_{\min}$.

$$E_{\max} = E_{\min} - E_{\text{naturelle}} \quad (\text{IV.9})$$

$$E_{\min \text{ protection}} = E_{\min} - E_{\text{naturelle}} \quad (\text{IV.10})$$

Comme le courant qui est déversé dans l'électrolyte pour ensuite traverser dans la conduite, afin de baisser son potentiel, lorsque le potentiel de canalisation 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 où les hypothèses suivantes :

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

Ainsi, après calcul on retrouve les expressions donnant la variation du potentiel et du

Courant à un point « x » quelconque de la conduite :

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

$$I_x = \frac{E_{\max}}{\alpha * R_r + \frac{\rho_{moy}}{\pi * y}} * \left[e^{-\alpha * x} - \frac{\rho_{moy}}{\pi * R_r} * \text{Arsh} \frac{x}{y} \right] \quad (\text{IV.12})$$

IV.4.3. Coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins

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 :

$$K = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{E_{\min \text{ protection}}}{E_{\max \text{ protection}}} \right)^2 * \frac{2 * \pi * z * y + \rho_{moy}}{\pi * z * y}}} \quad (\text{IV.13})$$

Avec : γ : Distance entre la canalisation et le déversoir anodique.

IV.4.4. Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage

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'autres termes, 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) est déterminer suivant la relation :

$$L_p = \frac{2}{\alpha} \ln \left(\frac{2 * \pi * z * y}{k \left(\frac{E_{\min \text{ protection}}}{E_{\max \text{ protection}}} \right) * (2 * \pi * z * y - \rho_{\text{moy}})} \right) \quad (\text{IV.14})$$

IV.4.5. Calcul du nombre de postes de protection cathodique

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. Concernant le nombre de postes N_p à installer, nous utilisons l'équation suivante :

$$N_p = \frac{L}{L_p + 1} \quad (\text{IV.15})$$

IV.4.6. Détermination de l'intensité du courant au point de soutirage

Quant au courant de soutirage, 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 :

$$I_s = \frac{|E_{\max}|}{z * [1 + 2 * e^{-\alpha * L_p}] + \frac{\rho_{\text{moy}}}{2 * \pi * y}} \quad (\text{IV.16})$$

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 :

$$I_s = \frac{|E_{\max}|}{z(0) * [1 + 2 * e^{-\alpha * L_p}] + \frac{\rho_{\text{moy}}}{2 * \pi * y}} \quad (\text{IV.17})$$

IV.4.7. Détermination de l'intensité du courant requise

$$I = 1.15 * I_s \quad (IV.18)$$

IV.4.8. Détermination de la densité du courant

$$A = \frac{I}{\pi * D_{ext} * L_{i_troncon}} \quad (IV.19)$$

Avec : $L_{i_troncon}$: longueur du tronçon considéré (m).

IV.4.9. Calcul du nombre d'anodes minimal nécessaire à la protection

Le déversoir (lit d'anodique) est destiné à diffuser dans le sol le courant de protection provenant du pôle positif d'un poste transformateur-redresseur. Cette diffusion de courant s'effectue à partir des anodes qui seront installées horizontalement en fond de tranchée et raccordées à un câble de liaison. 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 déterminée pour que l'installation ait une durée de vie. Les lits d'anode sont généralement constitués de :

- Anodes.
- Un câble de liaison des anodes.
- Trousses de dérivation. Mélange régulateur : backfillée de vie de l'ordre de 15 à 30 ans.

$$N_{a.min} = \frac{q * t * I}{n * G} \quad (IV.20)$$

Avec :

q : Consommation massique de l'anode [Kg/(A.ans)].

t : Durée de l'exploitation [ans].

G : Poids d'une anode [Kg].

n : Coefficient d'utilisation de l'anode (0.9).

IV. 5. Calcul de la résistance de terre du déversoir

La résistance du déversoir est donnée par :

$$R_d = R_{puit} + R_{ma} + R_p \quad (IV.21)$$

Avec :

R_{puit} : Résistance d'un puits anode (Ω).

R_{ma} : Résistance du matériau (Ω).

R_p : Résistance de polarisation (Ω).

IV.5.1. Calcul de la résistance d'un puits d'anodes

$$R_{\text{puit}} = R_{\text{anode_backfill}} + R_{\text{anode_backfillsol}} \quad (\text{IV.22})$$

IV.5.2. Résistance anode/bak- fille

$$R_{\text{anode_backfill}} = \frac{\rho_{\text{backfill}}}{2 * \pi * L_{\text{chaplet}}} \left[\ln \left(\frac{4L_{\text{chaplet}}}{\varnothing_{\text{anode}}} \right) - 1 \right] \quad (\text{IV.23})$$

Avec :

$\varnothing_{\text{anode}}$ ρ_{backfill} : Résistivité du bac fille (0.5).

L_{chaplet} : Longueur du chapelet d'anodes (m).

$\varnothing_{\text{anode}}$: Diamètre de l'anode (m).

IV.5.3. Résistance bak fille-sol

$$R_{\text{backfill_sol}} = \frac{\rho_{\text{puit_anode}}}{2 * \pi * L_{\text{active}}} \left[\ln \left(\frac{4L_{\text{active}}}{\varnothing_{\text{anode}}} \right) - 1 \right] \quad (\text{IV.24})$$

Avec :

$\rho_{\text{puit_anode}}$: Résistivité au niveau puits d'anodes.

L_{active} : Partie active du puits d'anodes (m).

$\varnothing_{\text{anode}}$: Diamètre du puits d'anodes (m).

$$L_{\text{active}} = L_a + N_a + E(N_a - 1) \quad (\text{IV.25})$$

Avec :

L_a : Longueur de l'anode (m).

N_a : Nombre d'anodes.

E : Espace entre deux anodes consécutives (m).

IV.5.4. Calcul de la résistance de polarisation

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

$$R_{pol} = \frac{U_a}{I} \quad (IV.26)$$

Avec :

I : Intensité de courant requise (A).

U_a : Composante de polarisation de la chute de tension des anodes : $U_a = 2V$.

IV.5.5. Calcul de la résistance du matériau de l'anode

$$R_{ma} = \frac{L_a * \rho_{anod}}{2 * S_a} \quad (IV.27)$$

Avec :

L_a : Longueur d'anode (m).

ρ_{anod} : Résistivité de l'anode ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) (0.229).

IV.5.6. Détermination de la section transversale du matériau de l'anode

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

$$S_a = \pi \frac{(1000 d_a)^2}{2} \quad (IV.28)$$

Avec :

d_a : Diamètre du câble (avec $d_c = 8 \text{ mm}$).

IV.5.7. Calcul de la résistance des câbles

Le dimensionnement des câbles électriques du circuit anodique et cathodique de section $1 \times 50 \text{ mm}^2$, pour tous les déversoirs.

$$R_c = \frac{\rho_{cu} * L_c}{S_c} \quad (IV.29)$$

Avec :

L_c : Longueur du câble (du déversoir au poste de protection cathodique) (m).

ρ_{cu} : Résistivité du cuivre (0.0172 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$).

S_c : Section du câble (50 mm)².

IV.5.8. Détermination de la section du câble

$$S_c = \frac{\pi d c}{4} \quad (\text{IV.30})$$

IV.5.9. Détermination de la résistance totale du circuit

$$R_{\text{circuit}} = Z_m + R_c + R_d \quad (\text{IV.31})$$

Avec :

Z_m : Résistance moyenne d'entrée d'une canalisation revêtue (Ω).

R_c : Résistance du câble (Ω).

R_d : Résistance du déversoir (Ω).

IV.5.10. Détermination de la tension aux bornes de sortie du poste de soutirage

$$U = I * R_{\text{circuit}} \quad (\text{IV.32})$$

IV.5.11. Détermination de la tension de protection requise

$$U_{\text{max}} = 1.2 * U \quad (\text{IV.33})$$

IV.5.12. Détermination de la puissance moyenne du poste de soutirage

$$W = I * U_{\text{max}} \quad (\text{IV.34})$$

Remarque

- Tous les postes de protection cathodique implantés dans les PS ne doivent pas dépassés une puissance de 120 W / 48 V / 5 A (puissance disponible du générateur solaire).

IV. 6. L'organigramme des équations de dimensionnement de protection cathodique

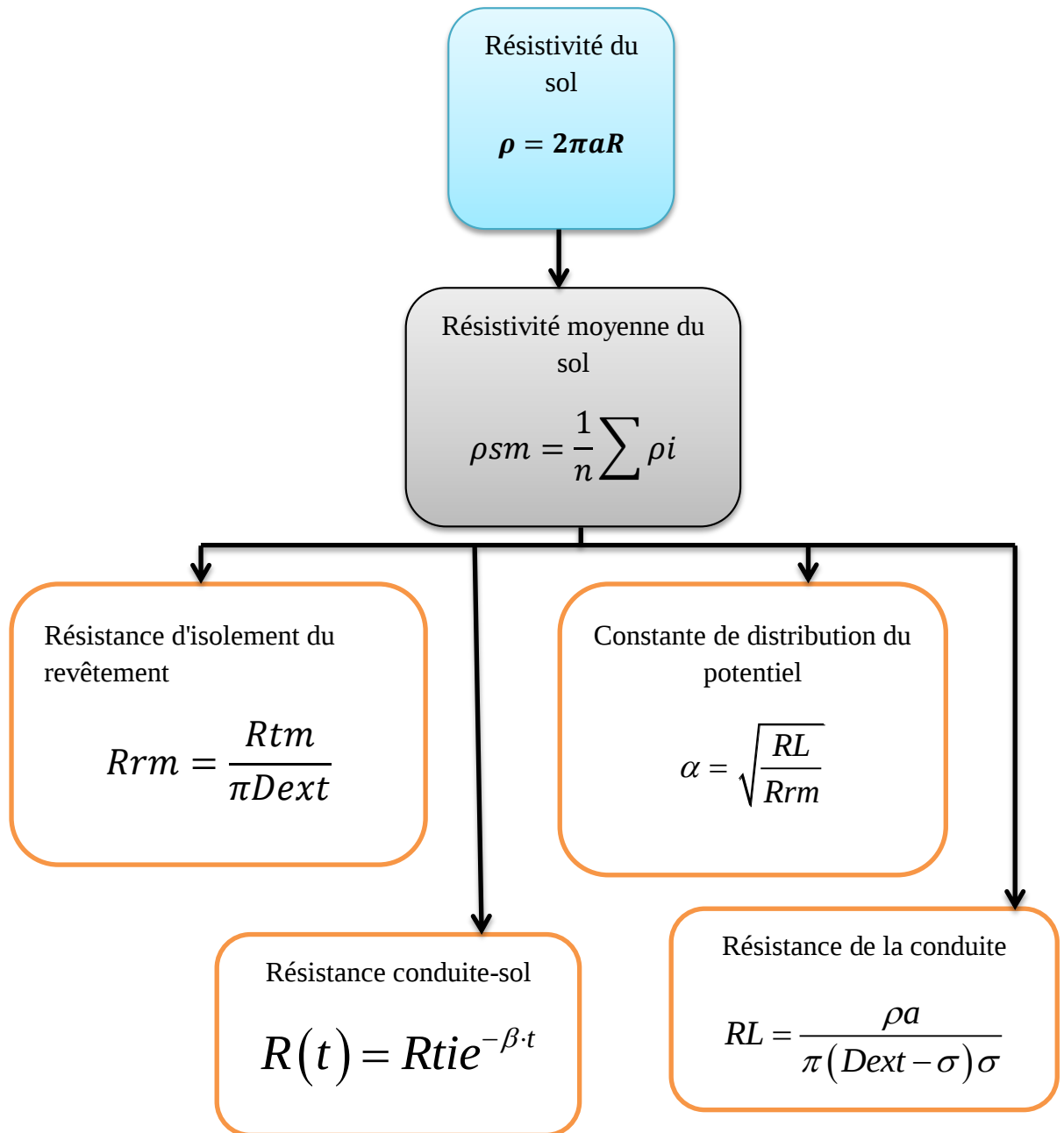


Figure IV. 2 Schéma de l'organigramme des équations de système de protection cathodique.

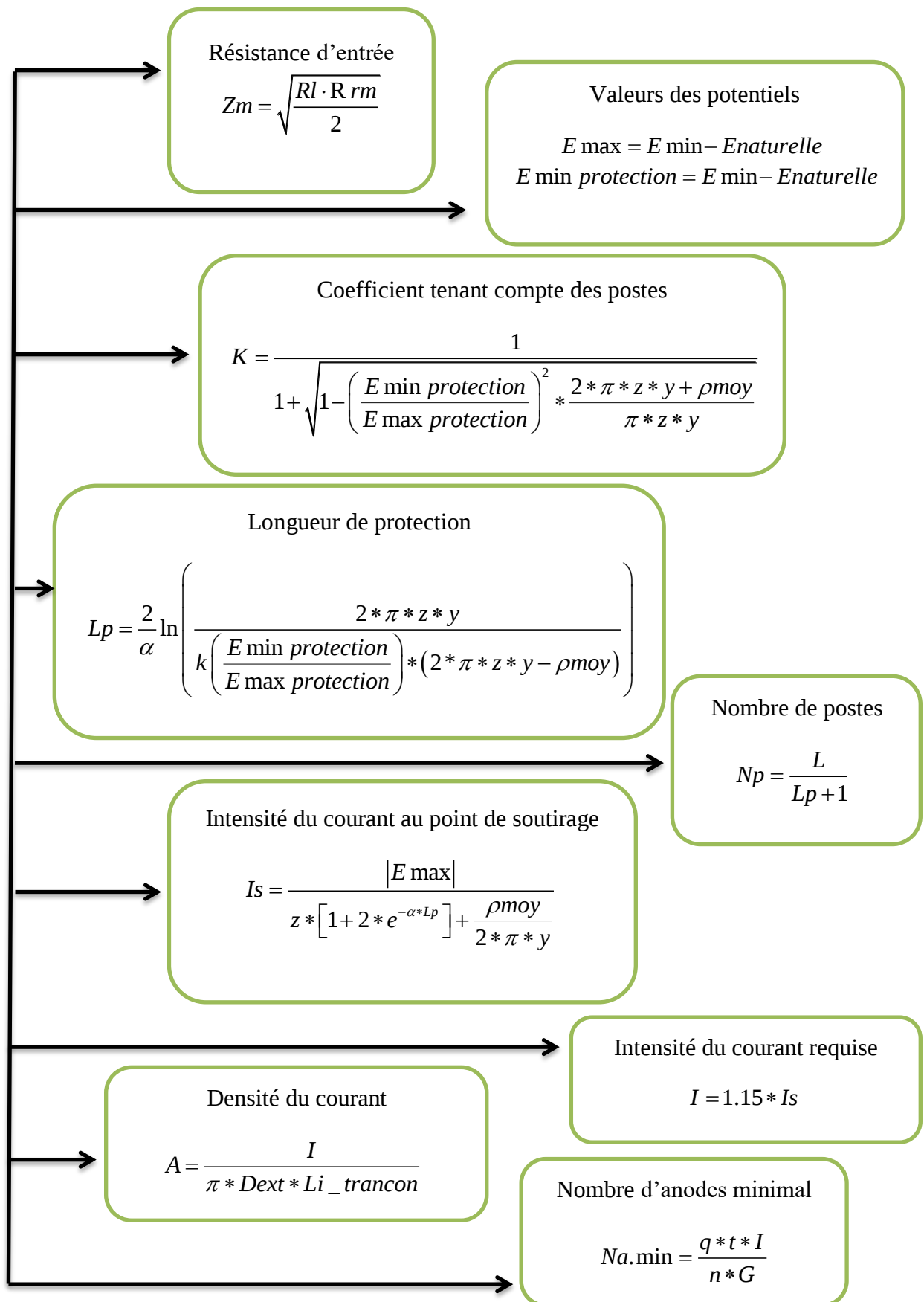


Figure IV. 3 La suite de figure IV.2.

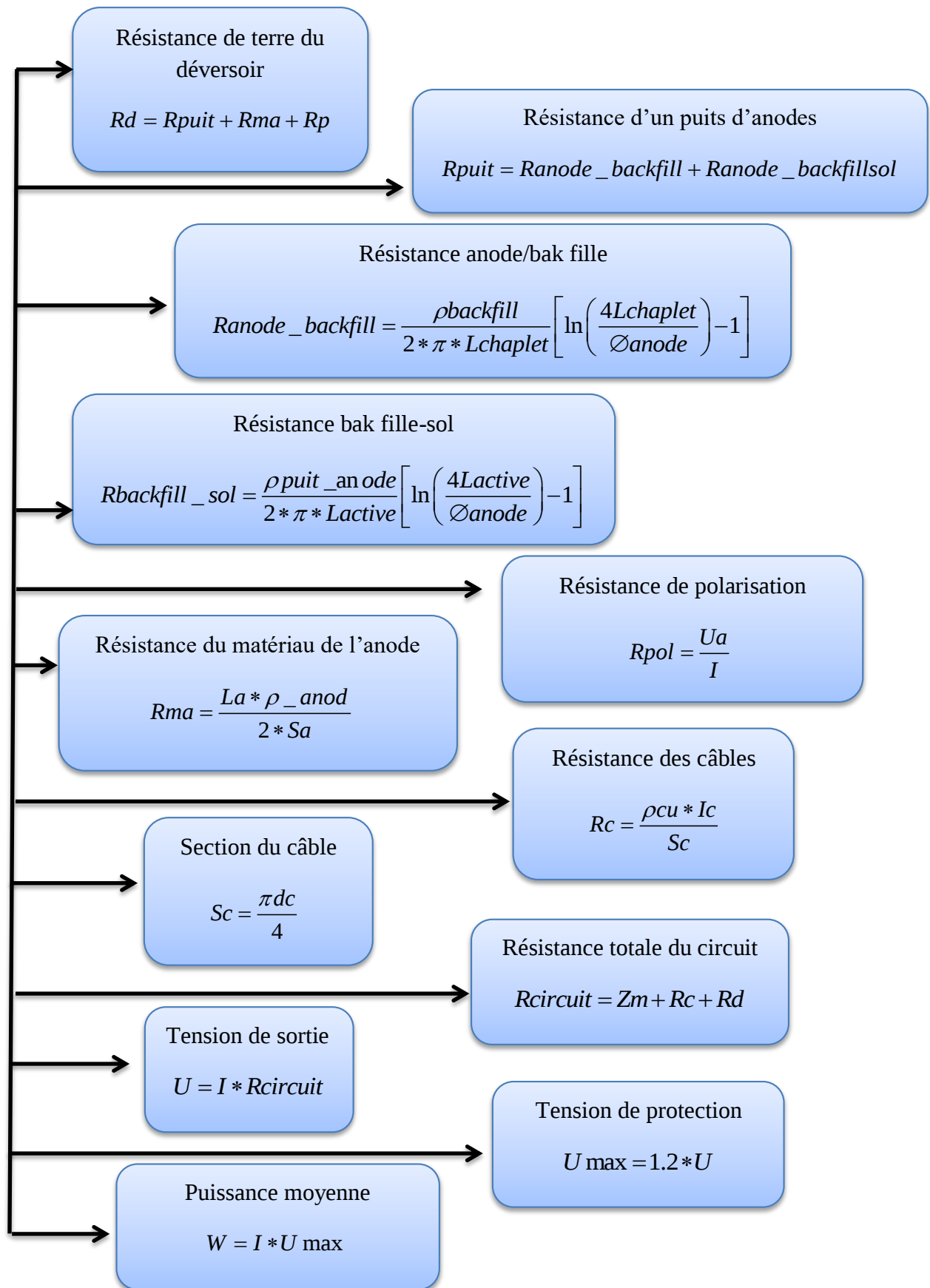


Figure IV. 4 La suite de figure IV.2.

IV. 7. Résultats et discussion

Cette partie présente les résultats des calculs de la conception du système de protection par soutirage de courant électrique.

IV.7.1. Données du projet

Cette partie présente les données du projet de protection cathodique, qui sont indiquées dans les tableaux suivants :

Tableau IV. 2 Données du projet.

L'élément	valeur	unité
Résistivité du bac fille	0.5	$\Omega.m$
diamètre canalisation	10	Pouces
Résistivité de l'acier	0.169	$\Omega.mm^2/m$
Épaisseur de la canalisation	8.7	mm
Coefficient tenant compte du vieillissement du revêtement	0.124	1/an
Résistance transitoire initiale (revêtement neuf)	1 E+04	$\Omega.m^2$
Durée de vie requise des anodes FeSi	25	ans
Distance entre canalisation et déversoir	400	m
E _{max} gain de potentiel au point de soutirage	1.7	V
E _{min} gain de potentiel en bout de bras de protection	0.85	V
Potentiel naturel de la canalisation dans le sol	0.55	V
Densité de courant de protection PC	60	$\mu A/m^2$
Nombre d'anodes	8	
Facteur de réserve sur la tension de sortie	1.2	
Facteur de réserve sur l'intensité de sortie	1.15	
Résistivité de l'anode FeSi	0.229	$\Omega.mm^2/m$
Longueur d'une anode FeSi	1.52	m
Poids d'une anode FeSi	22.7	kg
Consommation des anodes	0.5	Kg/A/an
Facteur d'utilisation des anodes	0.9	
Espace entre anodes	2	m
Profondeur du puits d'anodes	60	m
diamètre du câble	8	mm
Résistivité du cuivre	0.02	$\Omega.mm^2/m$
Composante de polarisation	2	V

IV.7.2. Résultats du calcul des différentes valeurs résistivité

Cette partie présente les calculs que nous effectuons afin de connaître l'étendue de la conductivité de la terre et sa résistance, comme indique dans les tableaux suivants :

Tableau IV. 3 Différentes valeurs de résistivité.

Terminal départ		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV01 (X=0446658 : y=2933557) error=40.2%		
0/3.52	$\rho_1=1485$	Horizon très résistant
3.52/9.38	$\rho_2=51.3$	Horizon assez frais
>9.38	$\rho_3=60.3$	Horizon assez frais
PS 01		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV01 (X=0445403: y=292085) error=25.9%		
0/1.45	$\rho_1=42.4$	Horizon assez résistant
1.45/25.1	$\rho_2=195$	Horizon résistant
>25.1	$\rho_3=1039$	Horizon très résistant
PS 02		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV29 (X=0434637: y=2906904) error=13.6%		
0/2.26	$\rho_1=340$	Horizon assez résistant
2.26/6.13	$\rho_2=645$	Horizon résistant
6.13/15.2	$\rho_3=81.1$	Horizon très résistant
15.2/38.3	$\rho_4=516$	Horizon très résistant
> 38.3	$\rho_5=1.69$	Horizon résistant
PS 03		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV28 (X=0427512: y=2891958) error=25.9%		
0/7.43	$\rho_1=855$	Horizon très résistant
7.43/15.5	$\rho_2=125$	Horizon assez résistant
>15.5	$\rho_3=1579$	Horizon très résistant

Tableau IV. 4 La suite de tableau IV. 3.

PS 04		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV27 (X=0426860: y=2875158) error=9.09%		
0/1.94	$\rho_1=193$	Horizon assez résistant
1.94/5.83	$\rho_2=1299$	Horizon très résistant
5.83/30.3	$\rho_3=327$	Horizon résistant
>30.3	$\rho_4=1484$	Horizon très résistant
PS 05		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV26 (X=0419118: y=2862978) error=10.9%		
0/2.62	$\rho_1=81.4$	Horizon assez résistant
2.62/7.96	$\rho_2=556$	Horizon résistant
7.96/34.8	$\rho_3=99$	Horizon assez frais
>34.8	$\rho_4=804$	Horizon très résistant
PC 01		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV25(X=0412031: y=2846123) error=15.1%		
0/1.66	$\rho_1=660$	Horizon résistant
1.66/4.99	$\rho_2=1602$	Horizon très résistant
4.99/13.2	$\rho_3=56.7$	Horizon assez frais
13.2/31.5	$\rho_4=898$	Horizon très résistant
>31.5	$\rho_5=2.56$	Horizon frais
PS 06		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV25(X=0407282: y=2833832) error=22.2%		
0/6.78	$\rho_1=993$	Horizon très résistant
6.78/14.4	$\rho_2=611$	Horizon résistant
14.4/30.5	$\rho_2=98.1$	Horizon assez frais
>30.5	$\rho_3=1055$	Horizon très résistant

Tableau IV. 5 La suite de tableau IV. 3.

PS 07		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV25(X=0403209: y=2813410) error=7.6%		
0/19.7	$\rho_1=934$	Horizon très résistant
19.7/33.4	$\rho_2=152$	Horizon assez résistant
>33.4	$\rho_3=497$	Horizon résistant
PS 08		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV19(X=0411584: y=2801234 error=7.25%)		
0/3.19	$\rho_1=420$	Horizon résistant
3.19/10.9	$\rho_2=87.2$	Horizon assez frais
>10.9	$\rho_3=1414$	Horizon très résistant
PS 09		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV07(X=0433904: y=2796301 error=30.4%)		
0/6.41	$\rho_1=627$	Horizon résistant
6.41/16	$\rho_2=915$	Horizon très résistant
16/40	$\rho_3=1135$	Horizon très résistant
>40	$\rho_4=776$	Horizon résistant
PS 10		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV06(X=0444615: y=2787990 error=20.6%)		
0/6.91	$\rho_1=888$	Horizon très résistant
6.91/11.5	$\rho_2=14.3$	Horizon frais
>11.5	$\rho_3=279$	Horizon résistant
PC 02		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV05(X=0440709: y=2773141 error=31.1%)		
0/4.74	$\rho_1=330$	Horizon résistant
4.74/9.01	$\rho_2=31.1$	Horizon assez frais
>9.01	$\rho_3=486$	Horizon résistant

Tableau IV. 6 La suite de tableau IV. 3.

PS 11		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV21(X=0443003: y=2754414 error=2.98%		
0/2.48	$\rho_1=662$	Horizon très résistant
2.48/6.32	$\rho_2=1485$	Horizon très résistant
6.32/15.5	$\rho_3=339$	Horizon résistant
15.5/36.4	$\rho_4=864$	Horizon très résistant
>36.4	$\rho_5=237$	Horizon résistant
PS 12		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV09(X=0460720: y=2749957 error=17.8%		
0/4.44	$\rho_1=15.9$	Horizon frais
4.44/39.4	$\rho_2=947$	Horizon très résistant
>39.4	$\rho_3=31.1$	Horizon frais
PS 13		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV11(X=0479828: y=2751780 error=10.2%		
0/16.9	$\rho_1=298$	Horizon résistant
16.9/38.1	$\rho_2=48.4$	Horizon assez frais
>38.1	$\rho_3=806$	Horizon très résistant
PS 14		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV12(X=0496912: y=2744565 error=27.8. %		
0/15.5	$\rho_1=860$	Horizon résistant
5.5/162	$\rho_2=224$	Horizon résistant
>162	$\rho_3=1.18$	Horizon frais

Tableau IV. 7 La suite de tableau IV. 3.

PS 15		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV14(X=0511135: y=2732640error=15.9 %		
0/1.47	$\rho_1=52.6$	Horizon assez frais
1.47/6.41	$\rho_2=806$	Horizon très résistant
6.41/9.58	$\rho_3=12.3$	Horizon frais
>9.58	$\rho_4=513$	Horizon résistant
PC 03		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV15(X=0522774: y=2716547 error=21.1 %		
0/0.531	$\rho_1=456$	Horizon résistant
0.531/44.1	$\rho_2=259$	Horizon assez frais
>44.1	$\rho_3=704$	Horizon très résistant
PS 16		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV16(X=0540270: y=2711946 error=6.83 %		
0/2.91	$\rho_1=1460$	Horizon très résistant
2.91/5.89	$\rho_2=469$	Horizon résistant
5.89/15.6	$\rho_3=2472$	Horizon très résistant
15.6/37.3	$\rho_4=401$	Horizon résistant
>37.3	$\rho_5=897$	Horizon très résistant
TERMINAL ARRIVE		
Profondeur	Résistivité ($\Omega.m$)	Observation (résistance de sol)
SEV30(X=0546662: y=2709187 error=29.6 %		
0/3.99	$\rho_1=33.7$	Horizon assez frais
3.99/17.7	$\rho_2=1557$	Horizon très résistant
>17.7	$\rho_3=5.8$	Horizon frais

Tableau IV. 8 Valeurs de résistivité.

N°	Localisation	Résistivité moyenne du tronçon	Résistivité au puits d'anodes
1	TD	622	60.3
2	PS 01	622	1039
3	PS 02	412	1.69
4	PS 03	462	1484
5	PS 04	374	1484
6	PS 05	291	99
7	PC 01	558	2.56
8	PS 06	842	1055
9	PS 07	782	497
10	PS 08	660	1414
11	PS 09	645	776
12	PS 10	645	272
13	PC 02	626	486
14	PS 11	336	237
15	PS 12	325	31.1
16	PS 13	391	48.4
17	PS 14	403	224
18	PS 15	456	513
19	PC 03	656	259
20	PS 16	650	401
21	TA	680	5.8

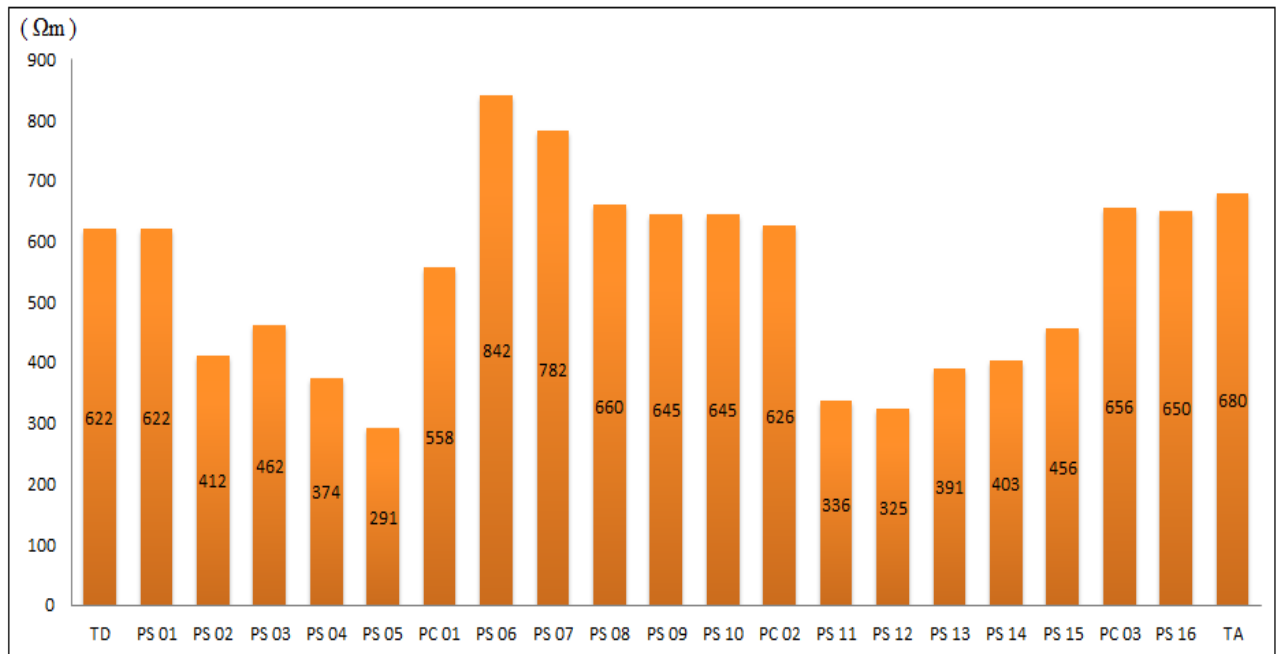


Figure IV. 5 Évolution de résistivité moyenne du tronçon en fonction des postes de soutirage de courant électrique.

- Nous constatons d'après les résultats des calculs, que (11) des postes, à savoir les postes: **TD, PS 01, PC 01, PS 04, PS 06, PS 07, PS 08, PS 09, PS 10, PC 03, PS 14, TA**, sont irréalisables à cause de leurs résistivités très élevées. Donc dans ce cas prône une valeur moyenne à tous les points de canalisation, et le point très élevés on diminue avec des produits spéciaux.

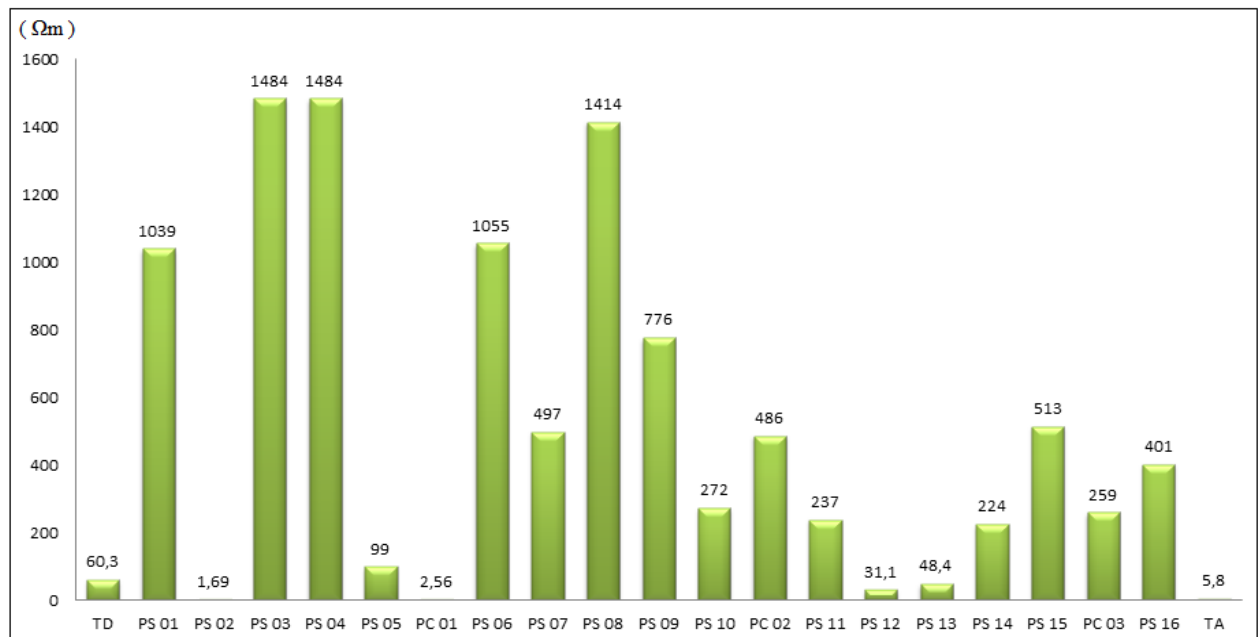


Figure IV. 6 Évolution de résistivité au puits d'anodes des postes de soutirage de courant électrique.

- Nous constatons d'après les résultats des calculs, que six (06) des postes, à savoir les postes: **PS 01, PS 03, PS 04, PS 06, PS 08, PS 09**, sont irréalisables à cause de leurs résistivités très élevées.

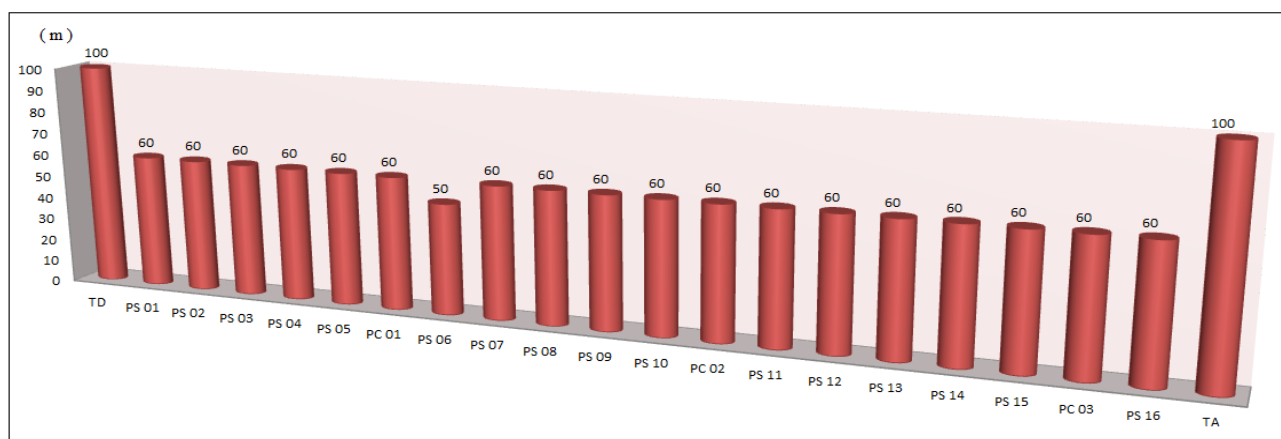


Figure IV. 7 Profondeur de puits d'anodes.

IV.7.3. Résultats des calculs communs

Cette partie présente les résultats communs pour les postes de soutirage courant électrique, présentés dans les tableaux suivants :

Tableau IV. 9 Résultats des calculs commun pour toutes les postes de soutirage.

L'élément	Valeur	Unité
Résistance longitudinale	2,52E-05	$\Omega.m$
Résistance transitoire	4.50 E +02	$\Omega.m^2$
Résistance transitoire moyenne	3.38 E +03	$\Omega.m^2$
Résistance d'isolement	4.24 E +03	$\Omega.m$
Résistance d'entrée	0.33	Ω
Paramètre d'atténuation	7.72E-05	
Potentiel max	-1.15	V
Potentiel min	-0.3	V
Coefficient d'interférence postes voisin K	0.52	
Section transversale du matériau de l'anode (Sa)	2.03 E+03	mm^2
Résistance du câble	0.17	Ω

IV.7.4. Résultats du calcul des différentes valeurs électriques

Cette partie présente les résultats des différents calculs pour les postes de soutirage courant électrique, présentés dans les tableaux suivants :

Tableau IV. 10 Résultats des calculs.

Localisation	Type de transformateur	Nombre d'anodes	PROFONDEUR (m)	Résistance de déversoir (Ω)	Résistance de circuit (Ω)	Intensité (A)	Tension (V)	Puissance (W)	Bras de protection (km)	Courant au point de soutirage (A)	Densité du courant ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	Nombre minimal d'anodes	Résistance anode-backfill (Ω)	Résistance backfill-sol (Ω)	Résistance du puits d'anodes (Ω)	Résistance de polarisation (Ω)	Résistance du matériau des anodes (Ω)	Tension de sortie du poste de soutirage (V)
TD	TR 3 phases 150/100A	20	100	1.49	1.98	3.19	7.62	24.37	37.4	2.78	1.07 E-04	1.96	1.79 E-02	8.41 E-01	8.59 E-01	0.6251	1.72 E-03	6.35
PS 01	PHV 48 V/5A	8	60	23.10	23.60	3.20	90.60	289.89	37.4	2.78	1.07 E-04	1.96	2.76 E-02	2.24 E+01	2.25 E+02	0.6251	1.03 E-03	75.50
PS 02	PHV 48 V/5A	8	60	0.62	1.12	3.78	5.07	19.17	41.6	3.29	1.14 E-04	2.31	3.88 E-02	5.17 E-02	9.055 E-02	0.5292	6.87 E+01	4.23
PS 03	PHV 48 V/5A	8	60	48.93	49.43	3.62	214.96	779.02	40.5	40.5	1.12 E-04	2.22	3.88 E-02	4.83 E+01	4.84 E+01	0.5519	6.87 E-04	179.13
PS 04	PHV 48 V/5A	8	60	10.56	11.06	3.90	51.75	201.79	42.4	3.39	1.15 E-04	2.39	3.88 E-01	1.00 E+01	1.00 E+01	0.5129	6.87 E-04	43.13
PS 05	PHV 48 V/5A	12	60	2.64	3.14	4.21	15.87	66.87	44.3	3.66	1.19 E-04	2.58	2.76 E-02	2.14 E+00	2.17 E+00	0.4748	1.03 E-03	13.23
PC 01	PHV 48 V/5A	10	60	0.71	1.21	3.35	4.88	16.39	38.6	2.92	1.09 E-04	2.05	3.88 E-02	7.84 E-02	1.17 E-01	0.5957	6,87E-04	4.07

Tableau IV. 11 La suite de tableau IV.10

Localisation	Type de transformateur	Nombre d'anodes	PROFONDEUR (m)	Résistance de déversoir (Ω)	Résistance de circuit (Ω)	Intensité (A)	Tension (V)	Puissance (W)	Bras de protection (km)	Courant au point de soutirage (A)	Densité du courant ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	Nombre minimal d'anodes	Résistance anode-backfill (Ω)	Résistance backfill-sol (Ω)	Résistance du puits d'anodes (Ω)	Résistance de polarisation (Ω)	Résistance du matériau des anodes (Ω)	Tension de sortie du poste de soutirage (V)
PS 06	PHV 48 V/5A	8	50	3.77	4.27	2.75	14.08	38.71	33.6	2.39	1.03 E-04	1.68	3.88 E-02	3.00 E+00	3.04 E+00	0.7275	6.87 E-04	11.73
PS 07	PHV 48 V/5A	12	60	4.01	4.51	2.86	15.48	44.86	34.5	2.49	1.04 E-04	1.75	2.76 E-02	3.28 E+00	3.31 E+00	0.6993	1.03 E-03	112.90
PS 08	PHV 48 V/5A	8	60	43.97	44.47	3.11	166.07	516.87	36.7	2.71	1.06 E-04	1.90	3.88 E-02	4.33 E+01	4.33 E+01	0.6426	6.87 E-04	138.40
PS 09	PHV 48 V/5A	8	60	40.06	46.56	2.12	118.91	253.09	36.9	2.74	1.07 E-04	1.92	3.88 E-02	2.38 E+01	2.38 E+01	0.6357	6.87 E-04	78.43
PS 10	PHV 48 V/5A	12	60	5.37	5.87	3.14	22.15	69.69	36.9	2.74	1.07 E-04	1.92	2.17 E-02	4.71 E+00	4.73 E+00	0.6357	1.37 E-03	18.46
PC 02	PHV 48 V/5A	8	60	15.54	16.04	3.19	61.41	195.92	37.3	2.77	1.07 E-04	1.95	3.88 E-02	1.49 E+01	1.49 E+01	0.6269	6.87 E-04	51.18
PS 11	PHV 48 V/5A	12	60	5.64	6.14	4.04	29.78	120.34	43.3	3.51	1.17 E-04	2.47	2.76 E-02	5.12 E+00	5.15 E+00	0.4949	1.03 E-03	24.82
PS 12	PHV 48 V/5A	12	60	1.19	1.69	4.08	8.27	33.76	43.5	3.55	1.18 E-04	2.50	2.76 E-02	6.72 E-01	7.00 E-01	0.4900	1.03 E-03	6.89
PS 13	PHV 48 V/5A	12	60	1.59	2.09	3.84	9.66	37.18	42	3.35	1.15 E-04	2.35	2.76 E-02	1.05 E+00	1.07 E+00	0.5197	1.03 E-03	8.05
PS 14	PHV 48 V/5A	8	60	7.42	7.92	3.80	36.20	137.86	41.8	3.31	1.14 E-04	2.33	3.88 E-02	6.86 E+00	6.90 E+00	0.5251	6.87 E-04	30.16
PS 15	PHV 48V/5A	8	60	16.29	31.19	2.46	92.21	227.17	40.6	3.17	1.12 E-04	2.23	3.88 E-02	1.57 E+01	1.57 E+01	0.5491	6.87 E-04	611.15
PC 03	PHV 48V/5A	12	60	6.26	6.76	3.12	25.33	79.06	36.7	2.71	1.07 E-04	1.91	2.76 E-02	5.60 E+00	5.62 E+00	0.6408	1.03 E-03	21.11
PS 16	PHV 48 V/5A	8	60	28.64	28.64	3.13	107.72	337.69	36.8	2.73	1.07 E-04	1.92	3.88 E-02	2.75 E+01	2.75 E+01	0.6380	6.87 E-04	89.77
TA	TR 3 phases 150/100A	20	100	0.74	1.24	3.13	4.65	14.58	36.8	2.73	1.07 E-04	1.92	1.79 E-02	8.09 E-02	9.88 E-02	0.6380	1.72 E-03	3.88

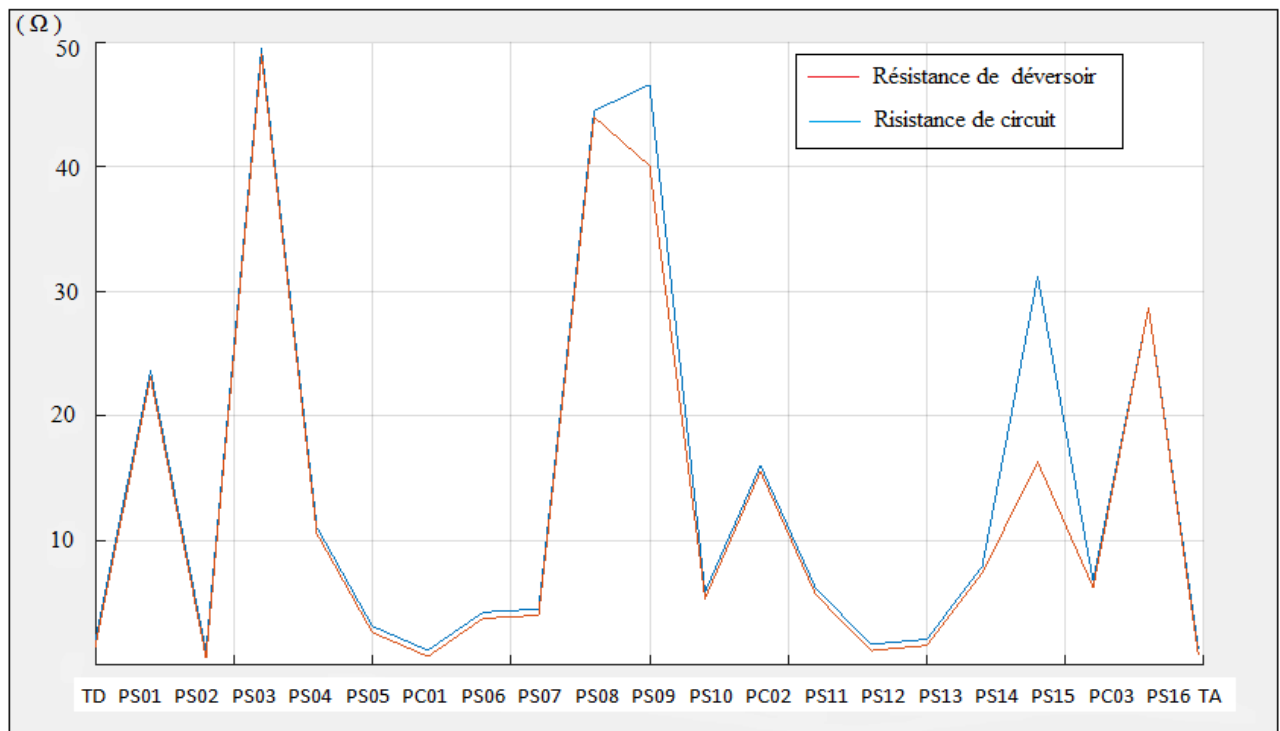


Figure IV. 8 Évolution (résistance de déversoir et résistance de circuit) en fonction des postes de soutirage de courant électrique.

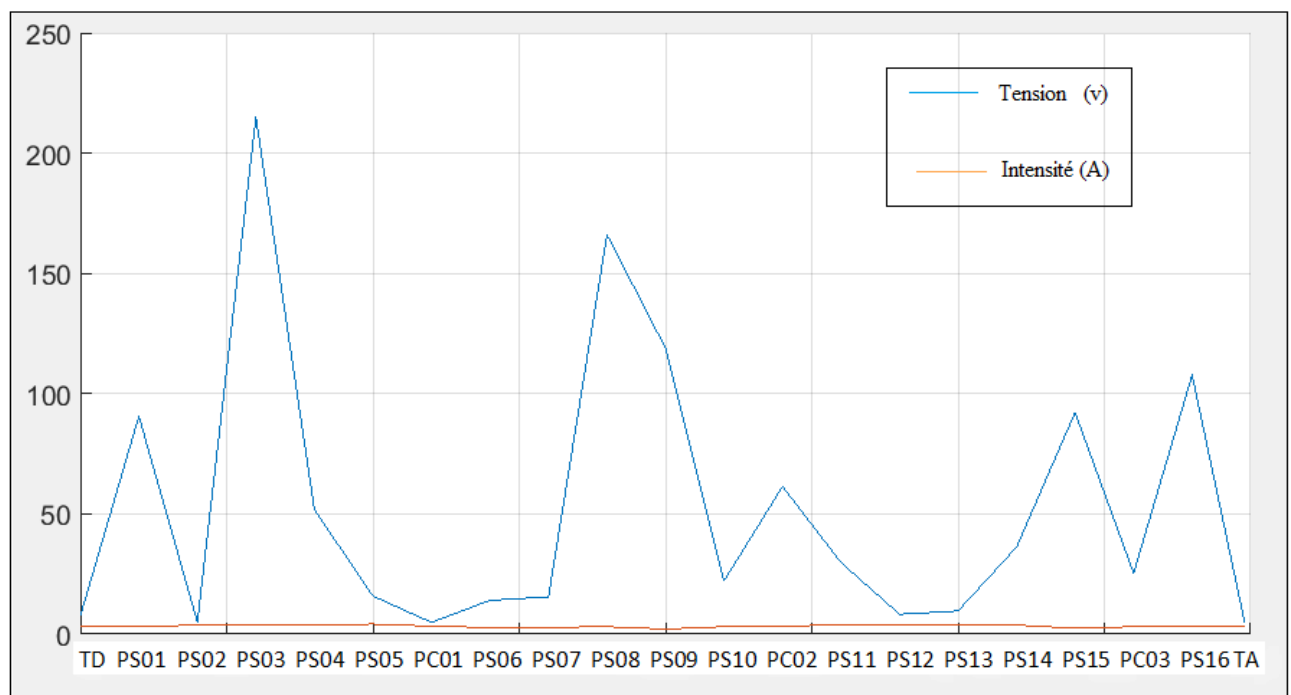


Figure IV. 9 Évolution (tension et intensité) en fonction des postes de soutirage de courant électrique.

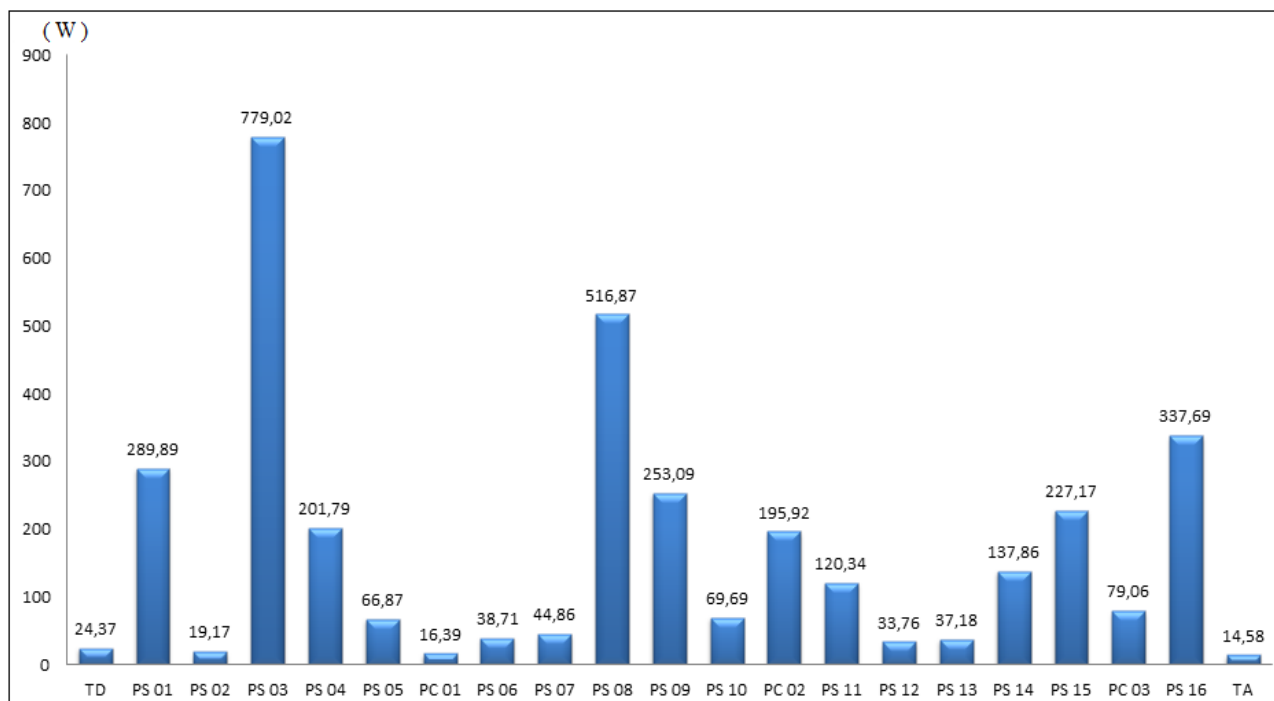


Figure IV. 10 Évolution puissance en fonction des postes de soutirage de courant électrique.

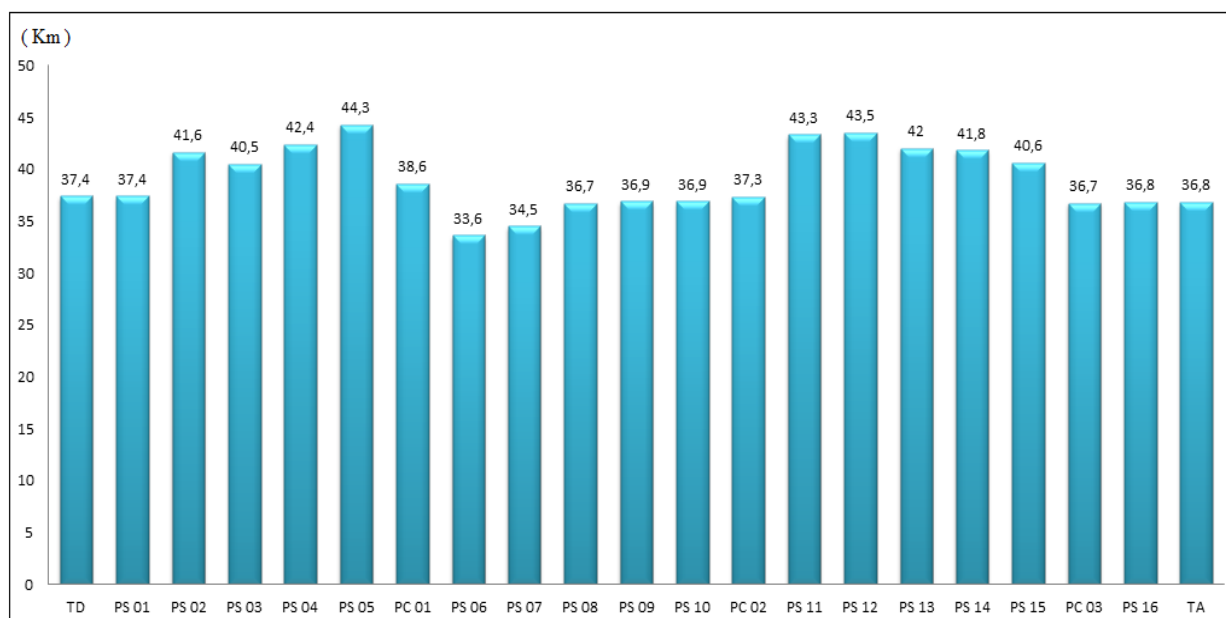


Figure IV. 11 Évolution bras de protection en fonction des postes de soutirage de courant électrique.

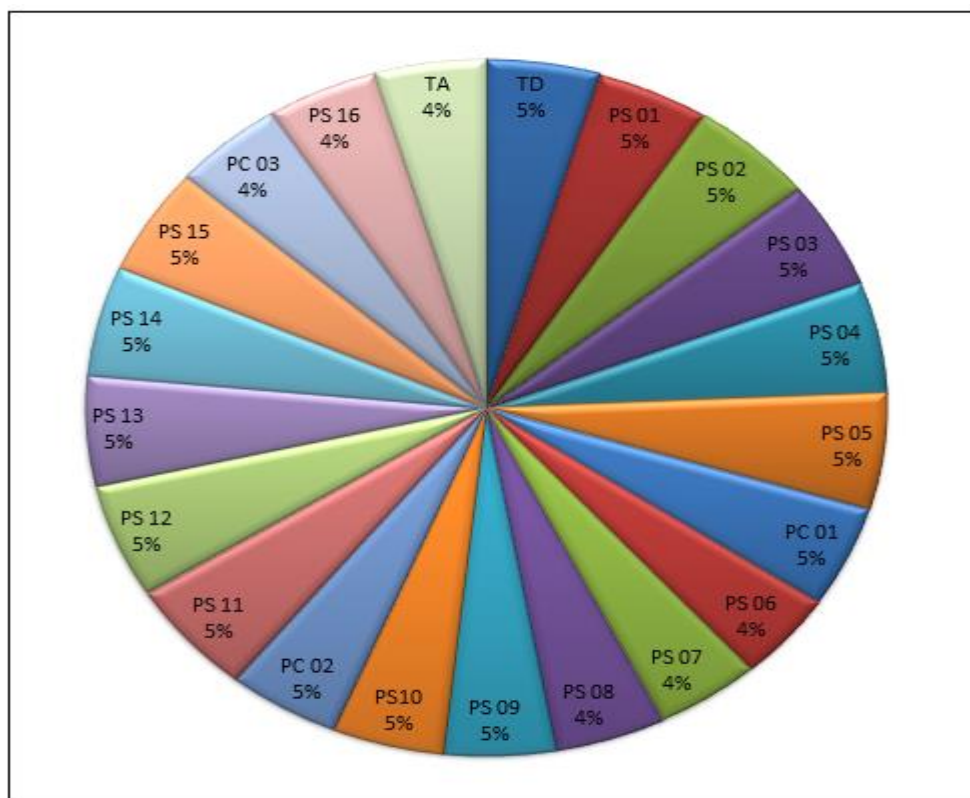


Figure IV. 12 Pourcentage de distribution des bras de protection en fonction des postes de soutirage de courant électrique.

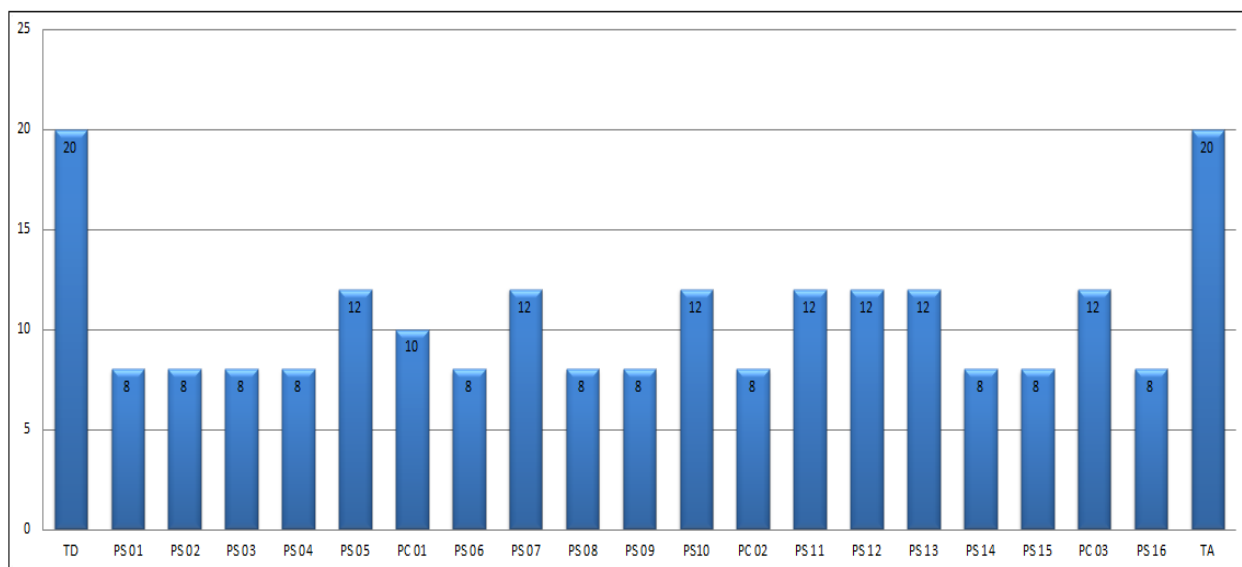


Figure IV. 13 Évolution nombre d'anodes en fonction des postes de soutirage de courant électrique.

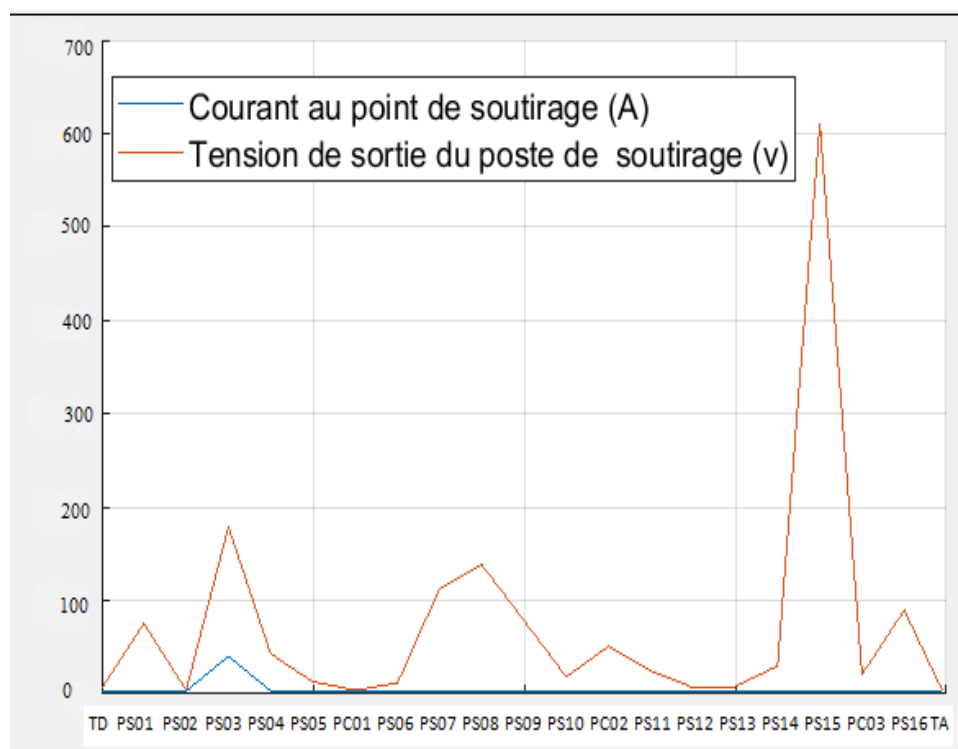


Figure IV. 14 Évolution courant au point de soutirage et tension de sortie du poste de soutirage en fonction des postes de soutirage de courant électrique.

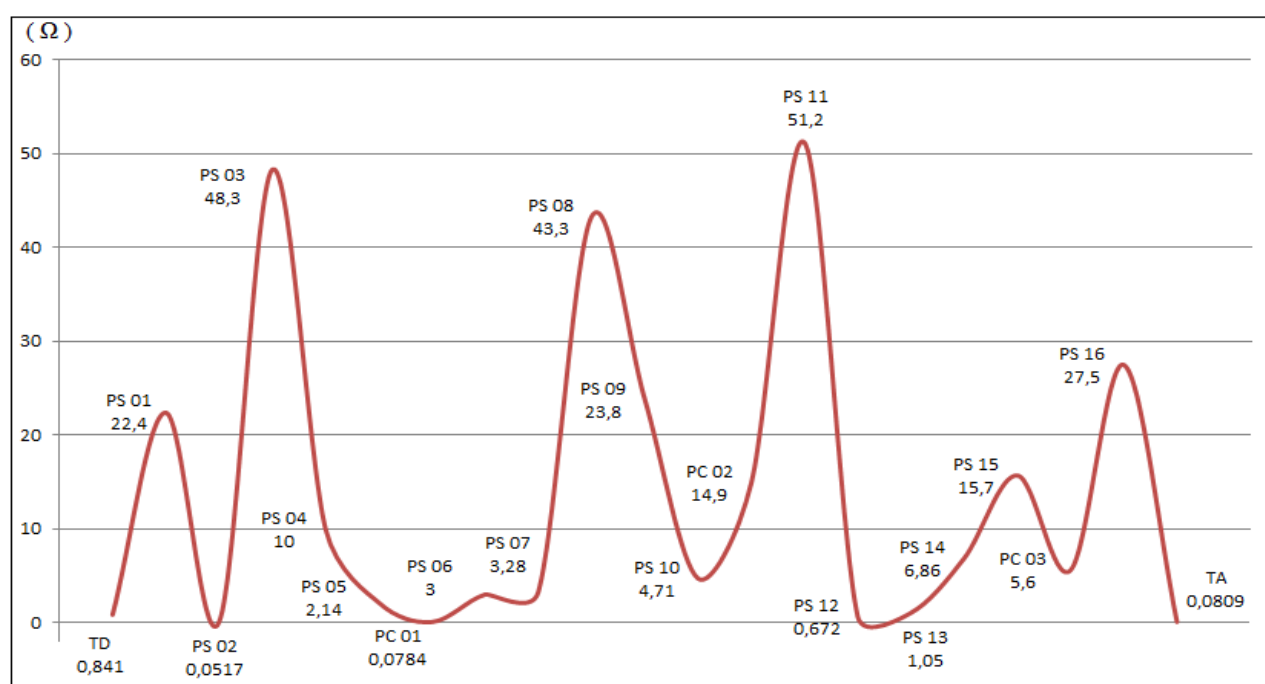


Figure IV. 15 Évolution résistance backfill-sol en fonction des postes de soutirage de courant électrique.

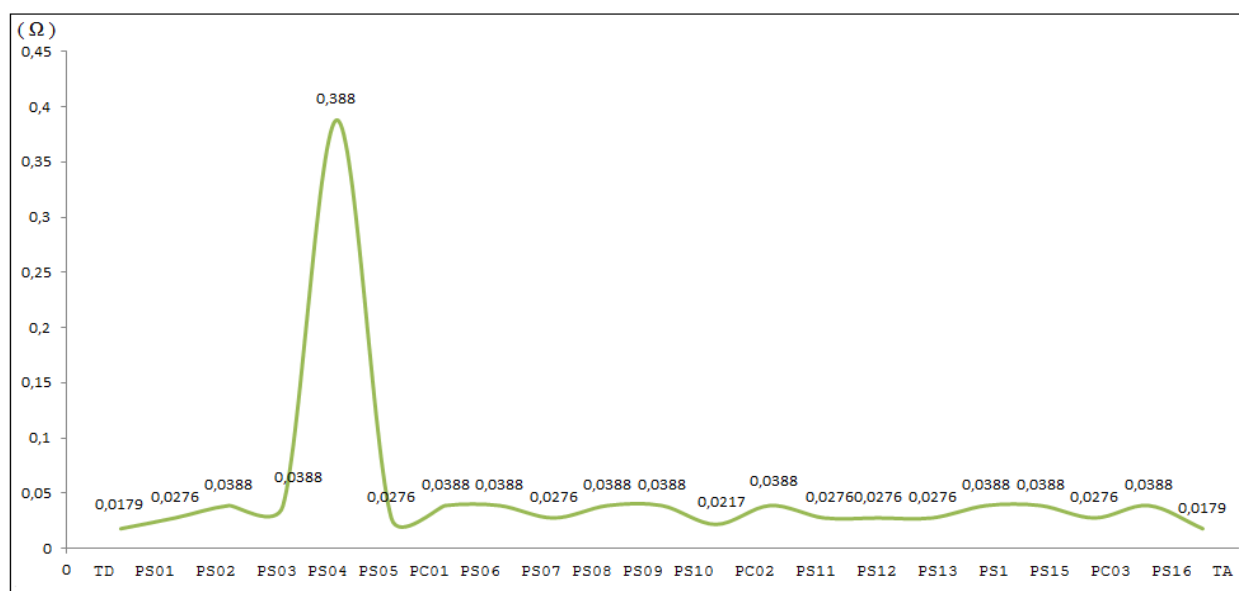


Figure IV. 16 Évolution résistance anode-back-fill en fonction des postes de soutirage de courant électrique.

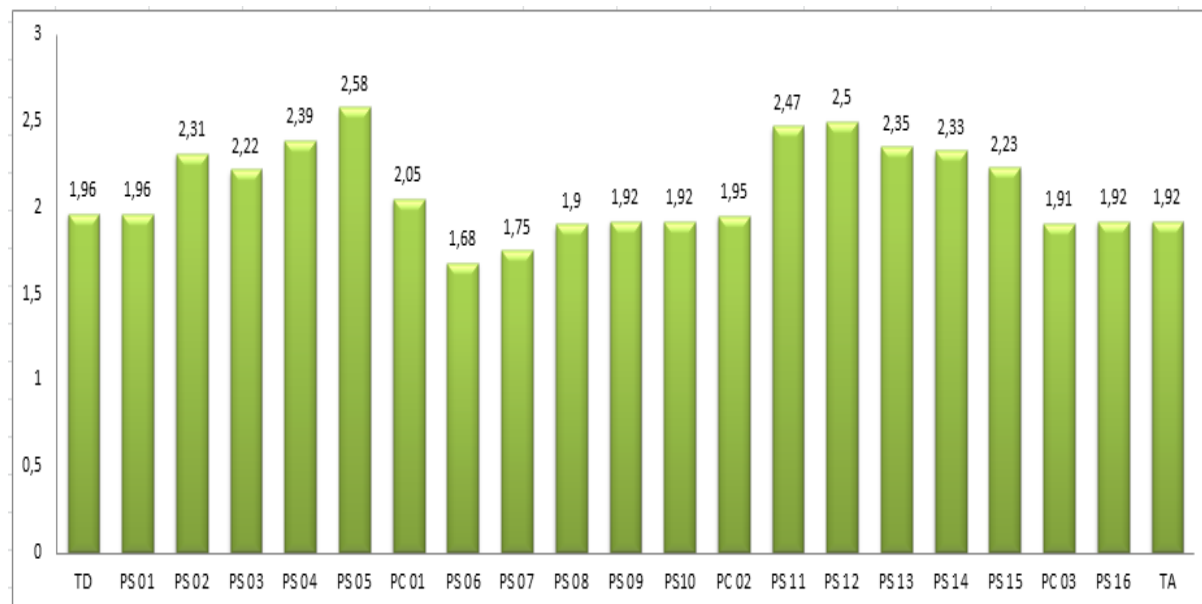


Figure IV. 17 Évolution nombre minimal d'anodes en fonction des postes de soutirage de courant électrique.

IV. 8. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les étapes de calcul et de réalisation d'un système de protection cathodique qui a été appliqué auparavant sur le pipeline du projet réalisation du gazoduc Djanet reliera le champ (Illizi à Djanet. Notons que ce système de protection des pipelines de transport des hydrocarbures est très efficace et d'une part, un suivi périodique particulier dans le cadre de la maintenance.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail consiste à l'étude de protection cathodique de la ligne gazoduc reliera le champ d'Assekaiffaf (Illizi) à Djanet, la protection cathodique est une technique de protection active contre la corrosion d'un matériau métallique au contact d'un électrolyte (milieu aqueux conducteur ionique comme les eaux, les sols, le béton). Il s'agit d'un système de présentation électrochimique basé sur la diminution du potentiel de corrosion jusqu' à un niveau ou la vitesse de corrosion du métal est réduite de manière significative.

Tous les ouvrages en acier enterrés ou immergés peuvent bénéficier d'une protection anticorrosion efficace. Au vu de son efficacité, les coûts de mise en place et de suivi de la protection cathodique sont faibles par rapport aux coûts d'investissement et de fonctionnement. La protection cathodique permet de réduire la vitesse de corrosion des ouvrages et d'augmenter considérablement leur durée de vie.

Pour cette raison, on a choisi dans ce mémoire une application pour réduire les problèmes de corrosion les plus rencontrés dans la pratique .La protection cathodique à courant électrique imposé (soutirage de courant électrique) par grille est une méthode plus efficace avec une durée vie 30 ans.

Le dimensionnement du système de cette application effectuée à base de données des paramètres de conception pour assurer l'efficacité la protection contre la corrosion externe des pipelines .cette méthode a démontré son efficacité dans la protection des canalisations auprès des industriels des hydrocarbures, vu qu'elle est économiquement peu coûteuse, et elle a été largement utilisée avec résultats satisfaisants quant à la prévision de la durée de vie du pipeline.

La protection cathodique nécessite des connaissances en électrochimie, corrosion, électricité, maintenance, métrologie et réglementation. Le Cefracor s'assure, par l'intermédiaire de la certification en protection cathodique, que les agents de terrain et les ingénieurs ont une excellente connaissance des techniques de mesures, nécessaire pour assurer une meilleure maîtrise de la corrosion des ouvrages enterrés. Cette certification octroie, aux entreprises utilisatrices, des interlocuteurs spécialisés et, aux agents certifiés, la reconnaissance de leurs compétences.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

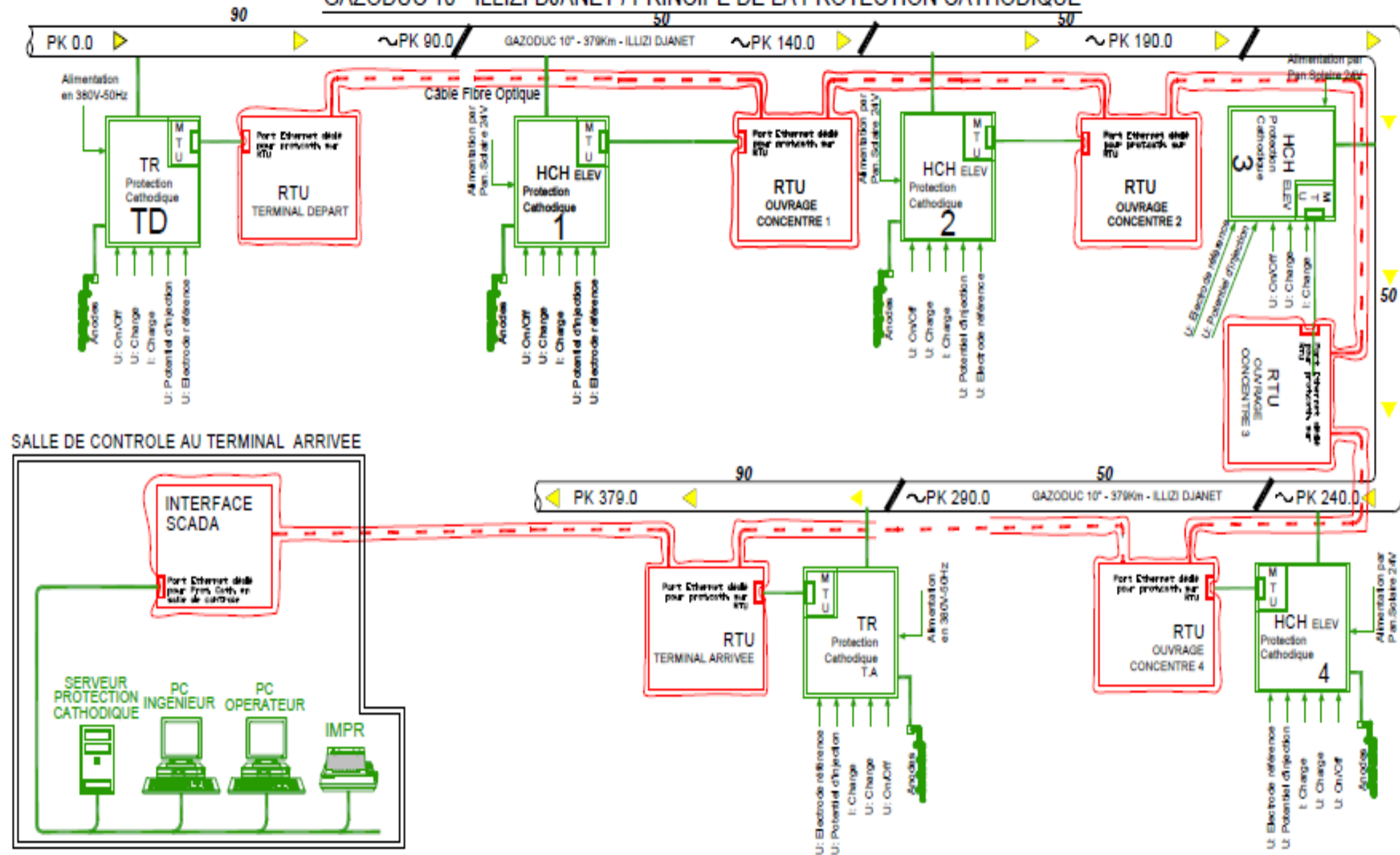
- [1] **MAREC**, corrosion et protection cathodique, école d'application des techniques gazières, TRAN 96.2, (1996), Gaz de France.
- [2] **D. BOUZIDI** Corrosion et protection cathodique des conduites souterraines, mémoire d'ingénieurs, École de technologie supérieure université du Québec 2011.
- [3] **CP 2**—Cathodic Protection Technician Certification Application, NACE International, 2000, April 2005.
- [4] **J.BENARD, A.MECHEL**, Métallurgie Générale, Ed Masson, paris, (1991).
- [5] **M.POURBAIS** ;<<Notion fondamentale, Aspecte électrochimiques de la corrosion>> chapitre III, Matériaux Métallique, Phénomène de corrosion Leçon en corrosion électrochimique (Ceferacor), Ed (1975).
- [5] **Séminaire** de la protection cathodique, service protection cathodique /RTO, (2011).
- [6] 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).
- [7] **M.PARKER**, E, Peattie Pipeline Corrosion and cathodic protection, this edition (1986).
- [8] **ENGTP**, spécification technique de protection cathodique, projet réalisation gazoduc 10 "Illizi/Djanet : N°GE3ESE00001 2014.
- [9] **R. Winston** Revie, Herbert H. Uhlig. Corrosion and corrosion. Protection. And introduction to corrosion Science and Engineering ». 4th Edition, 2008, John Wiley & Sons (Livre).
- [10] **H.H.UHLIG**, corrosion and control, Wiley, New York. (1971).11.
- [11] **ENGTP**, Restructuration de l'entreprise nécessite et impact première conférence des cadres.

Annexes

Annexe A

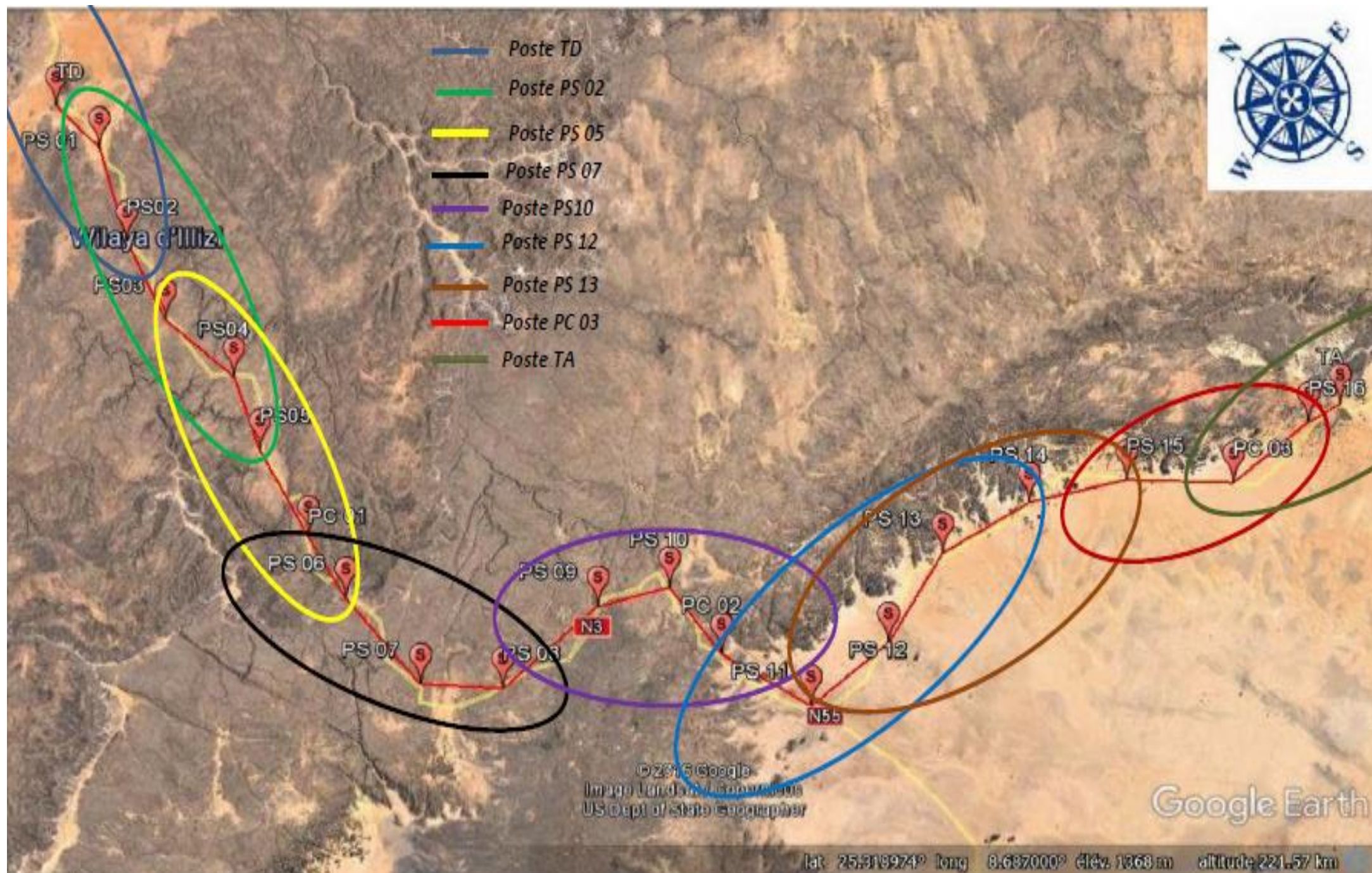
Principe de la protection cathodique
GAZODUC 10" ILLIZI-DJANET

GAZODUC 10" ILLIZI-DJANET / PRINCIPE DE LA PROTECTION CATHODIQUE



Annexe B

Schéma de représentation des bras de
protection des postes



Annexe C

Tableau: Liste des ouvrages concentrés
de la ligne Illizi – Djanet

N°	Ouvrage	PK	ALT
1	TERMINAL DE DEPART	88+000	576
2	POSTE DE SECTIONNEMENT N°05	100+228	588
3	POSTE DE SECTIONNEMENT N°05 Bis	120+940	802
4	POSTE DE SECTIONNEMENT N°06	140+437	990
5	POSTE DE SECTIONNEMENT N°07	159+980	1174
6	POSTE DE SECTIONNEMENT N°08	179+980	1302
7	POSTE DE SECTIONNEMENT N°09	199+685	1414
8	POSTE DE SECTIONNEMENT N°10	219+700	1174
9	POSTE DE SECTIONNEMENT N°02	239+681	1503
10	POSTE DE SECTIONNEMENT N°11	259+573	1440
11	POSTE DE SECTIONNEMENT N°12	280+466	1650
12	POSTE DE SECTIONNEMENT N°13	301+448	1445
13	POSTE DE SECTIONNEMENT N°14	319+682	1210
14	POSTE DE SECTIONNEMENT N°15	339+828	1142
15	POSTE DE COUPURE N°03	360+013	1120
16	POSTE DE SECTIONNEMENT N°16	380+085	1196
17	POSTE DE SECTIONNEMENT N°17	399+564	1159
18	POSTE DE SECTIONNEMENT N°18	419+815	1160
19	POSTE DE SECTIONNEMENT N°19	439+814	1070
20	POSTE DE SECTIONNEMENT N°20	459+616	1146
21	Terminal Arrivée	466+654	1077

Annexe D

Tableau longueurs des câbles par puits
anodiques

N°	Localisation	TYPE	Nombre	PROFONDEUR	Nombre De Chapelet	Longueur du câble 1*16 mm ² pour puits (m)	Longueur totale du câble 1*16 mm ² pour puits (m)	Longueur du câble positif 1*50 mm ² (m)	Longueur du câble négatif 1*16 mm ² (m)
1	TD PK 00	TR 3 phases 150/100A	20	100	5	1*100 :1*90 1*80 : 1*70 1*60	400	400	50
2	PS 02PK 40	PHV 48 V/5A	8	60	2	1*60 :1*50	400	400	50
3	PS 05 PK 100	PHV 48 V/5A	12	60	3	1*60 :1*50 1*40	110	400	50
4	PS 01 PK 120	PHV 48 V/5A	10	60	3	1*60 :1*50 1*40	150	400	50
5	PS 07 PK 160	PHV 48 V/5A	12	60	3	1*60 :1*50 1*40	150	400	50
6	PS 10 PK 220	PHV 48 V/5A	12	60	3	1*60 :1*50 1*40	150	400	50
7	PS 12 PK 280	PHV 48 V/5A	12	60	3	1*60 :1*50 1*40	150	400	50
8	PS 13 PK 300	PHV 48 V/5A	12	60	3	1*60 :1*50 1*40	150	400	50
9	PS 03 PK 360	PHV 48 V/5A	12	60	3	1*60 :1*50 1*40	150	400	50
10	TA PK 398	TR 3 phases 150/100A	20	100	5	1*100 :1*90 1*80 ; 1*70 1*60	150	400	50

Annexe E

Types et quantités d'équipements
électriques pour le projet de PC Illizi/Djanet

N°	Désignation	Unité	Quantité
Mode définitif (à courant impose)			
1	Transformateur - Redresseur, Entrée (~) : 400(V) - 50(Hz), Sortie(=) 100 (A) - 150(V), muni d'interrupteur périodique et instruments de contrôle de la PROTECTION CATHODIQUE (avec bain d'huile avec parasoleil); Equipé d'un module MTU* muni de 2 ports Ethernet pour le raccordement au module de la RTU* Master Terminal Unit.	U	2
2	Hacheur élévateur en Entrée (=) : 24(V), Sortie (=) : 30 (A) - 60(V), muni d'interrupteur périodique et instruments de contrôle de la PROTECTION CATHODIQUE ; Equipé d'un module MTU et de 2 ports Ethernet pour le raccordement au module de la RTU.	U	4
3	Câble armé 4Gx50 mm ² .	ML	1500
4	Coffret de jonction 6D en fonte d'aluminium type étanche et hermétique à l'humidité résistant à la chaleur pourra atteindre les 50°C avec indice de protection de dimension 600 x600 x200 (mm), équipé d'une platine isolante en bakélite de dimension indicative 400x400x15 (mm), il sera monté sur tube support coudé à 120° en sa partie inférieure Ø2" Lg:2 (m) munie : -06 Barrettes amovibles de sectionnement en cuivre de dimensions 120x20x5 (mm). - 06 Borniers de connexion (cosses à étrier pour câble 1x50(mm ²)) - 06 Résistances ajustables Ø20x120 (mm) / 6 (Ω)/400(W). - 06 Shunt 20(A)/150(mV). - 01 Barrettes de schuntage de sectionnement en cuivre de dimensions 350x20x5 (mm). RM : Le coffret sera livré avec clés de fermeture	U	30
5	Coffret de jonction 6D en fonte d'aluminium type étanche et hermétique à l'humidité résistant à la chaleur pourra atteindre les 50°C avec indice de protection de dimension 600 x600 x200 (mm), équipé d'une platine isolante en bakélite de dimension indicative 400x400x15 (mm), il sera monté sur tube support coudé à 120° en sa partie inférieure Ø2" Lg:2 (m) munie : - 06 Résistance ajustable Ø20x120 (mm) / 6 (Ω)/400(W). - 06 Barrettes amovibles de sectionnement en cuivre de dimensions 120x20x5 (mm). -06 Borniers de connexion (cosses à étrier pour câble 1x 35 (mm ²)). -06 Shunt 20(A)/150(mV). -01 Éclateur séparateur (antidéflagrant) type EX-FS dehn shone (muni d'un câble de 500 mm). -01 Barrettes de schuntage de sectionnement en cuivre de dimensions 350x20x5 (mm). -02 fileries de schuntage. RM : Le coffret sera livré avec clés de fermeture	U	6

6	LOT DE FOURNITURE pour puits anodique vertical	Tube casing Ø9"5/8 et couvercle, et équipement de pose avec revêtement plus accessoires appropriés. Forage de profondeur d'environ 130 M.	U	1	X 6 Lots
		Tube support et de fixation des anodes (en acier galvanise) Ø2" & 6 (ML) de long chacun fileté des 2 extrémités livrets avec 17 manchons de raccordement ; sera fermé au fond du puits par un bouchon fileté.	U	17	
		Un tube de dégazage en pvc de 30 (mm) de Ø et 5 (mm) de d'épaisseur et percé 3(mm) de Ø et espacé de 150 (mm) centre à centre accessoires d'enrobage en laine de verre et collier de fixation au total (250) attaches, ruban adhésif et colle.	U	110	
		Anodes en Ferro-Silicium chrome de 2"x60" simple tête avec 5 m de câble de cuivre rigide 1x16 mm2 XLPE/PVC.	U	18	
7	Backfill de coke.		tonnes	3	X 6 lots
8	Lot de manchon de couleur pour identification des câbles lot de (150 pièces) avec pince.		Lot	6	
9	Trousses de dérivation pour câble principal 1x35 (mm ²) Type KY ou KYO Connecteur 35 mm ² / dérivation 16 mm ² Elles seront livrées avec résine époxy et connecteurs à griffe.		U	110	
10	Trousses de dérivation pour câble principal 1x16 (mm ²) Type KY ou KYO Connecteur 16 mm ² / dérivation 1X16 mm ² Elles seront livrées avec résine époxy et connecteurs à griffe.		U	20	
11	Grillage avertisseur de couleur rouge.		ML	3000	
12	Électrodes de référence à poste fixe Cu/Cuso4 [équipées avec 6(m) de câbles 1x16 mm ²].		U	20	
13	Prises de potentiel, type Inox 304 L 120 x120 (mm) avec Lg: 120 (cm) équipée d'une platine à 05 D (directions).		U	190	
14	Câble électrique rigide U1000R2V de dimension 1x16 (mm ²).		ML	3000	
15	Câble électrique rigide U1000R2V de dimension 1x 35 (mm ²).		ML	6000	
16	Électrode de référence portative Cu/Cuso4.		ML	2	
Soudage des câbles par abrasure sur pipe					
17	Mastic de remplissage en primaire époxy PERP 80 pour réparation de revêtement PE et protection soudure.		U	40 rouleaux	
18	Manchon thermorétractable pour enrobage pipe et fixation liaison câble et soudure en forme de chatelton, soit 20 à 30 (cm) Largeur & 20 à 25 (m) Longueur / à titre indicatif TEM 50°C -130 a 150(µm)		U	60 rouleaux	
19	PIN BRASING GUN EQUIPMENT Under référence ECIM 2100ON DATA SHEET (pistolet de soudage abrasif) avec secteur muni d'accessoires de recharge.		U	1	
20	BRASING PIN CONTAINING SILVER FLOW [Direct filler to connection cable-thimble (lug)-pipeline](métal d'apport)		U	500	

21	Accessoires de Connexion : - FELLURES : (Capsules d'empreinte pour " le pin containing silver flow"). - LUG : (Cosses à sertir pour câbles 1x16mm ²).	U	500 (capsules) 500(cosses)
22	Coffret de joint isolant en fonte d'aluminium type étanche et hermétique à l'humidité résistant à la chaleur pourra atteindre les 50°C avec indice de protection de dimension 310 x265 x115 (mm), équipé d'une platine isolante en bakélite de dimension indicative 245x180x15 (mm), il sera monté sur tube support coudé à 120° en sa partie inférieure Ø2" Lg:2 (m) munie : -01 Résistance ajustable Ø20x120 (mm) / 6 (Ω)/400(W). -01 Barrettes amovibles de sectionnement en cuivre de dimensions 120x20x5 (mm). -01 Shunt 20(A)/150(mV). -04 Borniers de connexion (cosses à étrier pour câble 1x 16 (mm ²)). -01 Éclateur séparateur (antidéflagrant) type EX-FS dehn shone (muni d'un câble de 500 mm). -2 fileries de schuntage. RM : Le coffret sera livré avec clés de fermeture.	U	12
Mode (Interface de contrôle à distance)			
23	Un système de supervision en protection cathodique comprenant: - Un serveur pour la protection cathodique de technologie récente avec logiciel dédié - Micro-ordinateurs de bureau pour [1 opérateur et pour 1 ingénieur], type industriel, de technologie récente ayant une configuration minimale : - Microprocesseur Core i5 2.66 Ghz - Disque dur 2 x 160 Go (redondant) - 4 GO de RAM - Ecran LCD TFT 22" - 1 Lecteur/graveur DVD - 1 carte réseau Ethernet - Six (06) ports USB, port RS232, port imprimante ...etc. - Logiciel de gestion/supervision du système de protection cathodique -Switch - Imprimante laser couleur (IMPI) A4 - Lot de papier pour 06 mois d'exploitation- (5 rames avec 500 feuilles/unité de rame) - Onduleur avec une autonomie de 30 MIN - Mobiliers - Câbles de connexion	U U	1 2
24	Câbles de connexion avec port Ethernet de longueur 80 ML	U	8
25	Mégohmmètre	U	2
26	Multimètre à haute impédance	U	2
27	Résistivimètre pouvant atteindre l'intervalle maximum 10000 (Ω.m)	U	1