N° Ordre……../FHC/UMBB/2024

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES

Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Présenté par

BEROUILA Ibrahim
ROUAB Ahmed

Filière : Hydrocarbures
Spécialité : Génie Electrique : Electricité Industrielle

Thème

PROTECTION CATHODIQUE POUR UN RACCOREDEMENT DE 14 PUITS DE GAZ VERS L'USINE HAMRA.

Devant le jury :

BEDDEK Karim	MCA	UMBB	Président
TADJER Sid Ahmed	MAA	UMBB	Examinateur
BOUMEDIENE M.	MAA	UMBB	Examinateur
KIFOUCHE R.	Pr	UMBB	Encadrant

Année Universitaire : 2023/2024

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES

Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie
Département : Automatisation des procédés et électrification .
Filière : Hydrocarbures .
Spécialité : Génie Electrique : Electricité Industrielle .

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

PROTECTION CATHODIQUE POUR UN RACCOREDEMENT DE 14 PUITS DE GAZ VERS L'USINE HAMRA.

Présenté par :
BEROUILA Ibrahim
ROUAB Ahmed

Avis favorable de l'encadrant :
Nom et prénom : **KIFOUCHE R.**
signature :

.....

Avis favorable du Président du jury
Nom et Prénom : ……
Signature :

Cachet et signature

Résumé

Le présent mémoire s’inscrit dans le cadre des projets industriels de la société SARPI, spécialisée dans la réalisation des projets industriels. Cela inclut l’utilisation de la protection cathodique, avec pour objectif l’étude et l’application de ce système dans le raccordement des 14 puits de Cambro-Ordovicien de Hamra vers l’unité existante de traitement de gaz de Hamra.

La méthode de protection cathodique par courant électrique imposé est la technique la plus couramment utilisée dans ce domaine. Son succès mondial est dû à son efficacité dans la lutte contrela corrosion, une menace majeure pour les pipelines d’hydrocarbures.

Ce travail présente une étude théorique et pratique de la protection cathodique par courant électrique imposé, visant à assurer les performances de cette technologie sur une période de 30 ans.

Abstract

This thesis is part of the industrial projects undertaken by the company SARPI, which specializes in the implementation of industrial projects. This includes the use of cathodic protection, with the aim of studying and applying this system in the connection of the 14 Cambro-Ordovician wells in Hamrato the existing gas treatment unit in Hamra.

The cathodic protection method by impressed current is the most commonly used technique in this field. Its global success is due to its effectiveness in controlling corrosion, a major threat to hydrocarbon pipelines.

This work presents a theoretical and practical study of cathodic protection by impressed current, aiming to ensure the performance of this technology over a period of 30 years.

خلاصة

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة المشاريع الصناعية التي تقوم بها شركة صاربي والتي تتخصص في تنفيذ المشاريع الصناعية. هذا ا يتضمن استخدام الحماية الكاثودية، بهدف دراسة وتطبيق هذا النظام في ربط 14 بئراً كامبرو-أوردوفيشيا في حقل الحمرا بوحدة معالجة الغاز الحالية في الحمرا

.

تُعتبر طريقة الحماية الكاثودية بالتيار المسلط هي التقنية الأكثر استخدامًا في هذا المجال. ويرجع النجاح العالمي لهذه التقنية إلى السيطرة على التآكل، الذي يُعَد تهديداً كبيراً لخطوط أنابيب البترول و الغاز

يقدم هذا العمل دراسة نظرية وعملية للحماية الكاثودية بالتيار المسلط، بهدف ضمان أداء هذه التكنولوجيا على مدى فترة 30 عامًا

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, nous remercions chaleureusement notre directeur de mémoire, **Mr. Kifouche**, pour son encadrement et ses conseils avisés, ainsi que **Mr. Hamdouche** pour son soutien tout au long de ce travail. Nous exprimons également notre gratitude à l'équipe SARPI.

Nous exprimons également nos vifs remerciements aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail et évaluer le contenu de ce mémoire de master.

Nous souhaitons également remercier l'ensemble des enseignants et professeurs du département d'automatisation et électrification des procédés de la faculté des hydrocarbures et de la chimie M'hamed Bouguerra Boumerdes pour leur enseignement de qualité et leur disponibilité.

Merci également à **Mr. K. Tarek**, ingénieur de protection cathodique dans le groupement ourhoud

Un grand merci à nos camarades de promotion pour leur aide, leur soutien moral et les discussions enrichissantes que nous avons eues ensemble.

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance à nos familles et à nos amis pour leur soutien inconditionnel, leur patience et leur encouragement tout au long de nos études.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

أحمد الله تعالى أولا و آخرا على نعمه التي لا تحصى و توفيقه لي لبلوغ هذه المرحلة

Je dédie ce mémoire à mes parents, pour leur soutien constant tout au long de mes études.

À mes trois sœurs et mon frère, pour leur encouragement continu.

À ma famille, pour leur appui indéfectible.

À mes amis, pour leur précieuse collaboration et leur soutien

A.ROUAB

أحمد الله تعالى أولا و آخرا على نعمه التي لا تحصى و توفيقه لي لبلوغ هذه المرحلة

Je dédie ce mémoire à mes parents, pour leur soutien constant tout au long de mes études.

À mes frères, pour leur encouragement continu.

À ma famille, pour leur appui indéfectible.

À mes amis, pour leur précieuse collaboration et leur soutien

I.BEROUILA

Table des matières

I. Corrosion ... 1
I.1 Aspects ... 2
I.2 Cellule de corrosion ... 3
I.2.1 Anode ... 3
I.2.2 Cathode ... 4
I.2.3 Relation anode/cathode ... 4
I.2.4 Électrolyte ... 4
I.2.5 Chemin métallique ... 5
I.3 Electrode de référence ... 5
I.4 Echelle de Nernst ... 7
I.5 Cinétique ... 7
I.5.1 Polarisation électrochimique ... 7
I.5.2 Polarisation anodique/cathodique ... 8
I.5.3 Atténuation ... 9
I.5.4 Diagramme d'Evans ... 10
I.5.5 Graphe de Pourbaix ... 11
I.6 Types de corrosion ... 12
I.6.1 La corrosion uniforme ... 12
I.6.2 La corrosion localisée ... 12
I.1 Les facteurs de corrosion ... 14
I.1.1 Facteurs du milieu corrosif ... 14
I.1.2 Facteurs métallurgiques ... 14
I.1.3 Facteurs définissant les conditions d'emploi ... 14
I.1.4 Facteurs liés au temps ... 14
I.2 Moyens de protection contre la corrosion ... 14
I.2.1 Protection par revêtements non métalliques ... 14
I.2.2 Protection par revêtements métalliques ... 15
I.2.3 Protection par inhibiteurs de corrosion ... 16
I.2.4 Série galvanique ... 17
I.2.5 Introduction à la protection cathodique ... 18

I.2.6 Protection cathodique galvanique 19
I.2.7 Protection cathodique par courant imposé 20
II. Protection cathodique par courant imposé 22
II.1 Introduction 22
II.2 Principe 23
II.3 Critères de la PCCI 24
II.3.1 Mesure du potentiel 24
II.3.2 L'agressivité de sol 25
II.3.3 Mesure de densité de courant 26
II.4 L'application de la protection cathodique par courant imposé dans l'industrie des hydrocarbures 26
II.5 Installation d'un poste PCCI 27
II.5.1 Générateur de courant continu : 27
II.5.2 Déversoir anodique 27
II.5.3 Installation des anodes pour la protection des conduites 28
II.6 Facteurs affectant la protection cathodique 29
II.6.1 Conductivité 29
II.6.2 L'utilisation de revêtements protecteurs 29
II.6.3 Composition métallique de la structure 30
II.6.4 Proximité de la structure avec d'autres métaux 30
II.7 Démarrage 30
II.7.1 Postes à courant imposé 30
II.7.2 Postes d'essai 31
II.8 Vérification de l'efficacité de la protection cathodique 31
II.8.1 Généralités 31
II.8.2 Mesurages du potentiel de courant continu et de la tension alternative 31
II.8.3 Mesurages de courant 31
II.8.4 Périodicités minimales des mesurages et des contrôles de routine 32
II.9 Conclusion: 33
III. Choix des équipements de PCCI 34
III.1 Description du projet 35
III.2 Objectifs 35
III.3 Normes équivalentes 35

III.4 Techniques de protection adoptées contre la corrosion 35
III.5 Protection cathodique a courant impose 35
III.6 Générateur de courant 36
III.6.1 Etude de redresseur 37
III.6.2 Etude des tensions 38
III.6.3 Etude des courants 40
III.6.4 Circuit de commande 42
III.7 Déversoir anodique 45
III.8 Anode à courant imposé 45
III.9 Mode d'installation 46
III.10 Electrode de référence Fixe 46
III.11 Configuration du système de la protection 46
III.12 Dimensionnement du système de la protection cathodique 47
III.12.1 Collecte de données 47
III.12.2 Etude 47
III.12.3 Design de détail 48
III.13 Equipements du système de la protection cathodique 48
III.13.1 Transformateur redresseur 48
III.13.2 Unité de contrôle de la protection cathodique (CPCU) 51
III.13.3 Anodes tubulaires en Ti/MMO (Titanium / mixed Metal Oxide anodes) 53
III.13.4 Anodes de magnésium 54
III.13.5 Coke de pétrole calcine (poussier de coke) 54
III.13.6 Boites de contrôle et de test 55
III.13.7 Cellule de polarisation PCR 57
III.13.8 Prises de potentiel simple (PPS) 57
III.13.9 Coffret de mesure (C.M) 57
III.13.10 Prises de potentiel tube - gaine (PTG) 57
III.13.11 Prises Ampérométrique (PMA) 57
III.13.12 Prises de croisement de tube étranger (PCTE) 57
III.13.13 Joint isolant 59
III.13.14 Cellule de polarisation PCR 59
III.13.15 Eclateur antidéflagrant (spark gap) 60

III.13.16 Electrodes de référence 61
III.13.17 Cable 62
III.14 Conclusion 63
IV. Partie calcul 64
IV.1 Modelé de calcul du dimensionnement du système de protection cathodique : 64
IV.1.1 Résistance longitudinale de lapipe : 64
IV.1.2 La résistance d'isolement à la fin de la durée d'exploitation(t) 64
IV.1.3 Résistance transversale du revêtement 64
IV.1.4 Résistance caractéristique du pipe 64
IV.1.5 Facteur d'atténuation 65
IV.1.6 Abaissement de potentiel max. permis 65
IV.1.7 Abaissement de potentiel à minimum 65
IV.1.8 Atténuation le long du pipe 65
IV.1.9 Surface à protéger 65
IV.1.10 Densité de courant 65
IV.1.11 Courant total calculé 66
IV.1.12 Courant minimal 66
IV.1.13 Nombre d'anode calculé 66
IV.1.14 Résistance d'une anode verticale (Dwight) 66
$\boldsymbol{RVG = \rho 2 \times \pi \times L(Ln8 \times Ld - 1)}$ 66
IV.1.15 Résistance du déversoir vertical (Dwight) 66
$\boldsymbol{RVG = \rho 2 \times \pi \times LVGLn8 \times LVGdVG - 1}$ (11) 66
IV.1.16 Tension nominale 67
IV.2 Les résultats de calcul 67
Les résultats retrouvées ci-dessous concernent les quatre zones à protéger : la zone 100, 200, 300 et 400 67
IV.2.1 Relation entre le nombre d'anode et la résistance de déversoir 76
IV.2.2 Présentation de l'atténuation de potentiel 76
IV.2.1 Courant requis pour chaque zone 78

Liste des figures

Figure 1:Pipeline corrodé ---------- **Error! Bookmark not defined.**
Figure 2:corrosion du Fer ---------- 2
Figure 3:cellule de corrosion ---------- 5
Figure 4:Mesure du potentiel à l'aide d'une électrode de référence ---------- 6
Figure 5:Polarisation cathodique (activation) ---------- 8
Figure 6:Polarisation cathodique (concentration) ---------- 8
Figure 7: Polarisation anodique (activation) ---------- 8
Figure 8:Polarisation anodique (concentration) ---------- 9
Figure 9:polarisation ohmique ---------- 9
Figure 10:Diagramme d'Evans ---------- 11
Figure 13: diagramme de Pourbaix ---------- 12
Figure 14: Types de corrosion ---------- 13
Figure 15 : Schéma de protection cathodique par anode sacrificiel ---------- 20
Figure 16 : System de protection cathodique par courant imposé ---------- 21
Figure 17 : Plan d'un système PCCI ---------- **Error! Bookmark not defined.**
Figure 18 : Schéma d'un système PCCI ---------- 24
Figure 19 : Méthode de mesure de potentiel ---------- 24
Figure 20 : Electrode de référence ---------- 25
Figure 21: Schéma de mesure de l'agressivité de sol ---------- 25
Figure 22 : Déversoir anodique ---------- 27
Figure 23 : anodes installées verticalement ---------- 28
Figure 24 : anodes installées horizontalement ---------- 29
Figure 25: Schéma typique d'un redresseur à potentiel constant. ---------- 36
Figure 26 : Schéma de principe ---------- 37
Figure 27:Schémas synoptique de la commande ---------- 42
Figure 28: schéma de générateur de dent de scie ---------- 42
Figure 29: Circuit de la mise en forme ---------- 43
Figure 30: Schéma de l'amplificateur de courant. ---------- 43
Figure 31: La diode de roue libre. ---------- 44
Figure 32: CIRCUIT DE COMMANDE ---------- **Error! Bookmark not defined.**
Figure 33: Configuration générale du projet ---------- 46
Figure 34: Configuration du système de la protection cathodique définitif ---------- 47
Figure 35: image illustrative de CPCU ---------- **Error! Bookmark not defined.**
Figure 36: image illustrative Anode Tubulaire Mixed Métal Oxyde (MMO) ---------- 53
Figure 37:Poussier De Coke ---------- 54
Figure 38: image illustrative Boite De Jonction Négative (BJN) Ou Négative Jonction box (NJB) 55
Figure 39: Fiche technique de BJP ---------- **Error! Bookmark not defined.**
Figure 40: image illustrative Prise de Potentiel PPS-PTG-PJI-CM ---------- 58
Figure 41: Fiche technique de cellule de polarisation ---------- **Error! Bookmark not defined.**
Figure 42: image illustrative de éclateur anti déflagrant (Spark gap) ---------- 60

Figure 43:Electrodes de Référence portable en Cu/CuSO4 ---------- 61
Figure 44:Câble de la Protection Cathodique ---------- 62

Abréviations

NACE	National Association of Corrosion Engineers
CP	Protection Cathodique ou « Cathodic Protection »
ICCP	Protection Cathodique par Courant Imposé ou « Impressed Current Cathodic Protection »
AC	Courant Alternatif ou « Alternative Current »
DC	Courant Continu (ou courant direct) ou « Direct Current »
PEHD	Polyéthylène Haute Densité ou « High Density PolyEthylene »
CuSO4	Sulfate de Cuivre ou « Copper Sulphate »
Ag	Argent
MMO	Oxydes de Métaux Mixtes ou « Mixed Metal Oxide »
PJB ou CAA	Positive Junction Box ou coffret d'alimentation anodique
NJB ou CSC	Negative Junction Box ou Coffret de soutirage de courant
PPS	Prise de potentiel simple
PMA	Prise de mesure ampérmétrique
PTG	Prise tube/Gaine
PJI	Prise de joint isolant
PCTE	Prise de croisement de tube existant
PPC	Poste de protection cathodique
PCR	Cellule de polarisation
TR	Transformateur Redresseur ou « Transformer Rectifier »
CPCU	Cathodic protection control unit
PVC	Chlorure de PolyVinyle ou « PolyVinyl Chloride »
Kynar ou PVDF	PolyFluorure de VinyliDène ou « Polyvinyldene Fluoride »
HMWPE	PolyÉthylène à Haut Poids Moléculaire ou « High Molecular Weight PolyEthylene »
ITP	Planning des Tests d'Inspection ou « Inspection Test Plan »

Unités

Symbol	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	Ω.m
Rl	Résistance longitudinale de la canalisation	Ω.m
ρa	Résistivité de l'acier	Ω.m
Dext	Diamètreextérieur de la canalisation	mm
Rt	Résistance transitoire	Ω.m²
Rti	Résistance transitoireinitiale pour un revêtementneuf	Ω.m²
B	Coefficient tenant compte du vieillissement du revêtement	1/an
T	Duréed'exploitation	ans
R_sol	Résistance de sol	Ω
E_max	Gain de potential au point de soutirage,	-1.7
E_ naturelle	Potentiel naturel de la canalization dans le sol	-0.550
E_min	Gainde potential en bout de bras de protection	0.85
δ	Densité du courant	µA/m²
R_puit	Résistance d'unpuitsd'anodes	Ω
Rp	Résistance de polarization	Ω
Sa	Section transversal du matériau de l'anode	mm²
R_ma	Résistance du matériau des anodes	Ω
Rd	Résistance du déversoir	Ω
Sa	Section du cable	m²
Rbackfill_sol	Résistance backfill-sol	Ω
Na _min	Nombre minimal d'anodes	
P	Puissance moyenne du poste de soutirage	W
Umax	Tension de protectionrequise	V

I. Introduction

L'industrie pétrolière et gazière est confrontée à un ennemi silencieux et destructeur : la corrosion des pipelines. La corrosion est un processus naturel qui altère progressivement les matériaux métalliques exposés à des conditions environnementales spécifiques, telles que l'eau, les produits chimiques et les variations de température. Dans le contexte de l'industrie pétrolière et gazière, où les pipelines sont des éléments vitaux pour le transport efficace des hydrocarbures, la corrosion représente une menace majeure.

Les conséquences de la corrosion dans cette industrie sont multiples et graves. Premièrement, les fuites de pipelines causées par la corrosion peuvent entraîner des incidents majeurs, tels que des déversements de pétrole ou de gaz, mettant en danger l'environnement, la santé publique et la sécurité des travailleurs. De plus, les coûts associés à la maintenance et au remplacement des pipelines corrodes représentent une charge financière significative pour les entreprises du secteur.
Selon une étude récente publiée par l'International Energy Agency (Agence internationale de l'énergie), la corrosion des pipelines dans l'industrie pétrolière et gazière entraîne chaque année des pertes économiques considérables, estimées à plusieurs milliards de dollars. Ces pertes comprennent les coûts de réparation des dommages causés par la corrosion, les pertes de production dues aux arrêts imprévus des pipelines pour des réparations, ainsi que les dépenses liées à la mise en œuvre de mesures de prévention et de protection contre la corrosion.

En outre, selon les données de l'American Petroleum Institute (Institut américain du pétrole), près de 20% des défaillances de pipelines dans l'industrie pétrolière et gazière sont attribuables à la corrosion. Ces statistiques soulignent l'ampleur du problème et la nécessité pour l'industrie de mettre en œuvre des stratégies efficaces de gestion de la corrosion pour prévenir les incidents et minimiser les pertes.

Il est donc impératif pour les entreprises du secteur pétrolier et gazier de prendre des mesures proactives pour lutter contre la corrosion, en investissant dans la recherche de nouvelles technologies de revêtement et de protection des pipelines, ainsi qu'en renforçant les programmes de surveillance et de maintenance préventive. En mettant l'accent sur la prévention de la corrosion, l'industrie peut non seulement améliorer la sécurité et la fiabilité de ses infrastructures, mais aussi réduire les coûts opérationnels et préserver l'environnement.

Chapitre 1

II. Corrosion

Lorsqu'on examine la corrosion à l'échelle microscopique, on découvre un monde fascinant et complexe où les interactions moléculaires jouent un rôle crucial dans le processus de détérioration des matériaux métalliques. À cette échelle, la corrosion peut être comprise comme une série de réactions électrochimiques qui se produisent à la surface des métaux exposés à des environnements corrosifs.

Au niveau microscopique, la surface d'un métal est constamment en interaction avec son environnement, qu'il s'agisse de l'humidité, des produits chimiques ou d'autres agents corrosifs. Ces interactions entraînent la formation de minuscules zones de réaction où des réactions d'oxydation et de réduction se produisent, conduisant à la dissolution des ions métalliques dans le milieu environnant.

La corrosion à l'échelle microscopique peut prendre différentes formes, telles que la corrosion uniforme, où la surface du métal est érodée de manière homogène, ou la corrosion localisée, où des zones spécifiques de la surface sont préférentiellement attaquées. Dans les deux cas, les processus moléculaires complexes qui sous-tendent la corrosion peuvent entraîner une détérioration significative des propriétés mécaniques et structurelles des matériaux métalliques.

Comprendre les mécanismes de la corrosion à l'échelle microscopique est essentiel pour développer des stratégies efficaces de prévention et de protection des matériaux contre ce phénomène. En examinant de près les interactions moléculaires qui se produisent à la surface des métaux, les chercheurs peuvent identifier les facteurs qui contribuent à la corrosion et concevoir des solutions innovantes pour y remédier, assurant ainsi la durabilité et la fiabilité des infrastructures métalliques dans divers environnements corrosifs.

Figure 1:Pipeline corrodé

II.1 Aspects

La corrosion des métaux est un processus électrochimique. C'est-à-dire qu'il s'agit d'un circuit électrique où l'échange d'électrons (électricité) est réalisé par des réactions chimiques dans une partie du circuit. Ces réactions chimiques se produisent à la surface du métal exposée à l'électrolyte. Les réactions d'oxydation (corrosion) se produisent à la surface de l'anode et les réactions de réduction se produisent à la surface de la cathode. Les systèmes de contrôle de la corrosion qui déplacent ces réactions d'oxydation, en faisant de la structure protégée une cathode dans une plus grande cellule de corrosion, sont appelés systèmes de protection "cathodique". Les anodes de protection cathodique sont installées pour devenir l'anode dans cette plus grande cellule de corrosion et fournir l'emplacement de toutes les réactions d'oxydation dans la cellule. Pour décrire en détail les principes de fonctionnement de la protection cathodique, la nature exacte du processus de corrosion doit être décrite en detail [(1)].

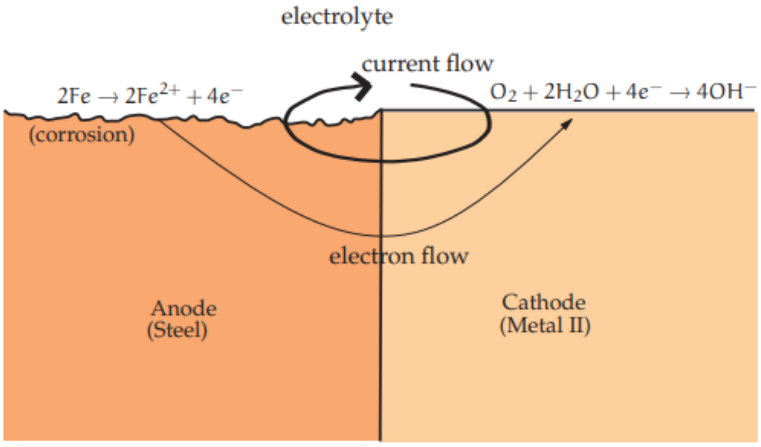


Figure 2:corrosion du Fer

Explication:

La corrosion des métaux, comme le fer, dans le sol est un processus électrochimique impliquant des réactions d'oxydation et de réduction.

Réaction d'oxydation (anodique)

$$2Fe \rightarrow 2Fe^{2+} + 4e^-$$

- **Lieu :** Anode
- **Description :** Le fer métallique se transforme en ions ferreux, libérant des électrons. C'est la dissolution du métal.

Réaction de réduction (cathodique)

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$$

- **Lieu :** Cathode
- **Description :** L'oxygène dissous réagit avec l'eau et les électrons pour former des ions hydroxyde. Les électrons nécessaires sont fournis par la réaction anodique.

Réaction globale de corrosion

$$2Fe + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_2$$

- **Description :** Les ions ferreux réagissent avec les ions hydroxyde pour former de l'hydroxyde de fer , qui peut ensuite se transformer en rouille (oxyde de fer).

La corrosion des métaux dans le sol est une série de réactions électrochimiques où le fer se dissout en ions ferreux et l'oxygène est réduit en ions hydroxyde, conduisant à la formation de rouille. Ce processus est influencé par la présence d'oxygène, d'eau, la conductivité et le pH du sol.

II.2 Cellule de corrosion

La corrosion est la détérioration d'un matériau par réaction avec son environnement. Dans le cas d'un métal, cette détérioration se produit principalement par un processus électrochimique. Le processus électrochimique se compose de quatre parties distinctes : anode, cathode, électrolyte et chemin métallique. Ces quatre parties constituent ce qu'on appelle la "cellule de corrosion". La corrosion électrochimique se produit uniquement lorsque ces quatre parties de la cellule de corrosion sont présentes. Pour comprendre le fonctionnement d'un système de protection cathodique, il est extrêmement important de comprendre ces quatre parties de la cellule de corrosion électrochimique**.**

II.2.1 Anode

La partie la plus évidente de la cellule de corrosion est l'anode. C'est l'endroit où la corrosion se produit. L'anode est le point dans une cellule de corrosion où l'électricité est transmise par des moyens chimiques de la surface du métal à l'électrolyte. Cette réaction chimique est une réaction d'oxydation, caractérisée par le métal perdant un électron et se combinant avec un autre élément, généralement de l'oxygène. Dans le cas de l'acier, le matériau résultant est de l'oxyde de fer (rouille).

II.2.1.1 Réaction à l'anode

À l'anode, les atomes métalliques cèdent un ou plusieurs électrons et deviennent des ions métalliques. En abrégé chimique, la formule générale de cette réaction est écrite :

- $M0 -> M^{n+} + ne$

M0 représente un atome métallique tel que le fer ou le cuivre dans une structure métallique. Le symbole M+ représente un ion métallique. Les ions métalliques formés dans la réaction de corrosion quittent la structure métallique et pénètrent dans l'environnement (l'électrolyte). Le symbole e- représente l'électron chargé négativement libéré par la formation de l'ion métallique. L'électron libre formé dans la réaction de corrosion reste à l'intérieur de la structure métallique. Pour une réaction anodique spécifique telle que dans le cas de la corrosion du fer, la réaction serait écrite :

- $Fe -> Fe^{2+} + 2e -$

II.2.2 Cathode

La deuxième partie de la cellule de corrosion est la cathode. C'est l'endroit où la protection se produit. La cathode est le point dans une cellule de corrosion où l'électricité est transmise par des moyens chimiques de l'électrolyte à la surface du métal. Cette réaction chimique est une réaction de réduction, caractérisée par le métal transférant des électrons à l'électrolyte.

II.2.2.1 Réaction à la cathode

À la cathode, il existe de nombreuses réactions possibles. La réaction cathodique la plus simple et la plus courante est la réaction des ions d'hydrogène, présents dans les solutions aqueuses, avec des électrons pour former du gaz d'hydrogène. En abrégé chimique, cette réaction est écrite :

- $2\,H^{+} + 2e - -> H_2$

Une autre réaction courante à la cathode est la réaction des électrons avec l'oxygène dissous et la décomposition de l'eau en ions hydroxyde. En abrégé chimique, cette réaction est écrite :

- $O_2 + 2H_2O + 4e - -> 4OH$

Cela représente la réduction de l'oxygène dissous (O2) dans des électrolytes alcalins où l'oxygène et la décomposition de deux molécules d'eau (2H2O) entraînent la formation de quatre ions hydroxyde (4OH-).

II.2.3 Relation anode/cathode

Une électrode devient soit une anode soit une cathode dans une cellule de corrosion électrochimique en fonction de son potentiel électrique par rapport à l'autre électrode. Cette différence de potentiel électrique est la force électromotrice de la cellule et représente la différence de tension entre l'anode et la cathode. L'électrode qui est plus électriquement active, ou plus négative en tension, subit la corrosion, et est donc par définition l'anode. L'électrode qui est plus noble (moins négative en potentiel) transmet des électrons à l'électrolyte (réactions de réduction) et est donc par définition la cathode et ne subit pas de corrosion (réactions d'oxydation). Comme discuté précédemment, il y a quatre parties distinctes dans la cellule de corrosion électrochimique, toutes les quatre parties doivent être présentes pour qu'un circuit complet existe et pour que le courant circule (la corrosion se produise).

II.2.4 Électrolyte

La troisième partie de la cellule de corrosion est l'électrolyte. L'électrolyte est l'endroit où les ions se déplacent. L'électrolyte est n'importe quel matériau en contact avec à la fois l'anode et la cathode qui permettra aux ions de migrer. L'électrolyte est la partie d'une cellule de corrosion qui permet aux

réactions d'oxydation et de réduction de se produire. L'électrolyte comprend la source des éléments ou des atomes nécessaires au transfert d'ions vers et depuis les électrodes métalliques

II.2.5 Chemin métallique

La quatrième partie de la cellule de corrosion est le chemin métallique. Le chemin métallique complète le circuit et permet aux électrons de circuler. Le chemin métallique est n'importe quel métal qui entre en contact à la fois avec l'anode et la cathode et permet aux électrons de circuler. Cette circulation d'électrons doit être présente pour que la corrosion électrochimique se produise. Dans le cas d'un réservoir ou d'une canalisation, il peut s'agir du réservoir ou de la canalisation elle-même, ou d'une liaison métallique à une structure métallique différente.

Encore une fois, toutes les quatre parties de la cellule de corrosion doivent être présentes pour que la corrosion électrochimique se produise. Lorsque toutes les quatre parties sont présentes, une condition de circuit fermé existe, et le courant circulera à travers ce circuit[(2)].

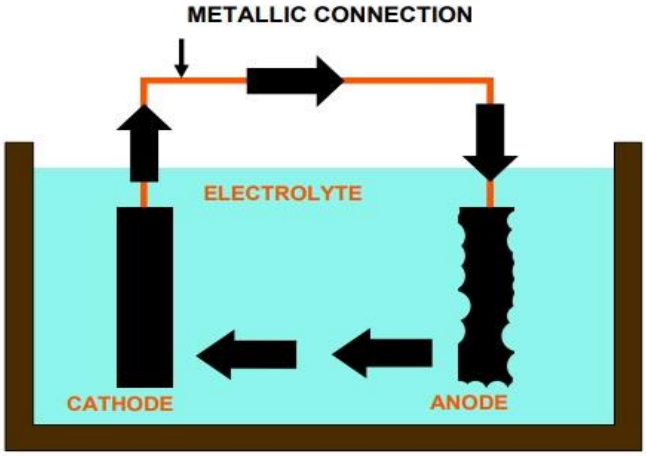


Figure 3:cellule de corrosion

II.3 Electrode de référence

Électrodes de référence. Les méthodes volta métriques sont celles dans lesquelles le courant passant dans une cellule électrochimique est mesuré en fonction du potentiel appliqué à l'électrode de travail. Le potentiel, par définition, n'est pas quelque chose qui peut être directement mesuré. Au lieu de cela, la mesure du potentiel appliqué nécessite d'abord l'établissement d'un point de référence, et les potentiels individuels sont mesurés par rapport à ce point de référence. Cela est accompli en plaçant une deuxième électrode, appelée électrode de référence, dans la cellule et en mesurant le potentiel comme la différence d'énergie entre les deux électrodes. Comme l'ont parfaitement exprimé Kissinger et Bott, "l'électrochimie avec une seule électrode, c'est comme le son d'une seule main qui applaudit". Les électrodes de référence doivent être construites en utilisant des composants de demi-cellule qui sont stables dans le temps et avec une température changeante, présents à des valeurs bien définies d'activité. Elles doivent posséder des potentiels d'électrode fixes et reproductibles. La demi-cellule de référence avec laquelle la plupart d'entre nous sont familiers est l'électrode à hydrogène standard (SHE), composé d'un solide inerte comme le platine sur lequel le gaz hydrogène est adsorbé, plongée dans une solution contenant des ions hydrogène à une activité unitaire.

.

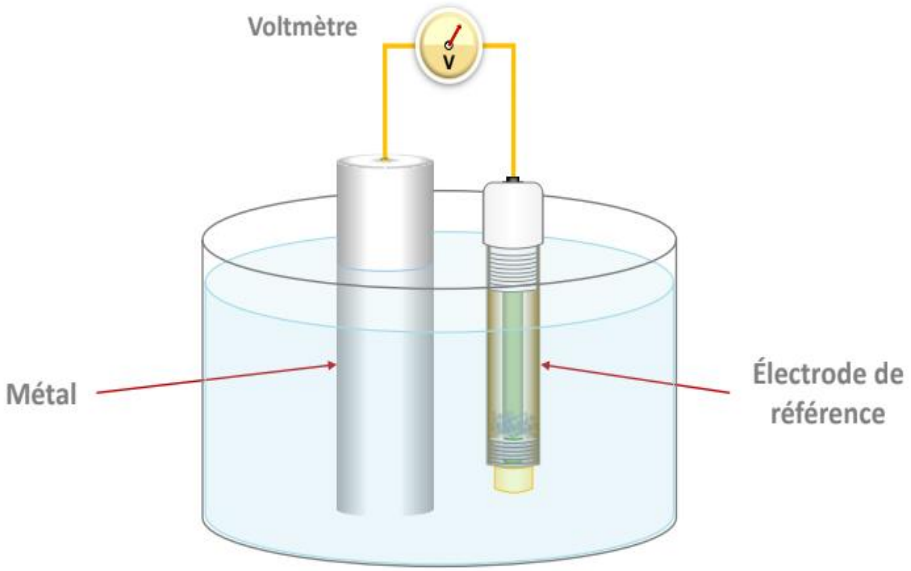


Figure 4:Mesure du potentiel à l'aide d'une électrode de référence

Les électrodes de références les plus utilisées sont :

L'électrode standard à hydrogène
Arbitrairement comme électrode de référence et ayant un potentiel égal à zéro
Dans la pratique on utilise des électrodes de référence plus simples, dont on connaît les potentiels respectifs telles que :

L'électrode au cuivre / sulfate de cuivre : Cu/CuSO4
L'électrode d'argent : Ag/AgCl
L'électrode au calomel : (KCl)

Électrode	Électrolyte	Réactions	E/V
Hydrogène	H_2SO_4	$2H^+ + 2é \rightleftharpoons H_2$	0,000
Chlorure d'argent	AgCl, saturé	$AgCl + e^- \rightleftharpoons Ag + Cl^-$	0,195
calomel	KCL, saturé KCL, 1M KCL, 0.1M	$Hg_2Cl_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2Hg + 2Cl^-$	0,241 0,280 0,333
Sulfate de cuivre	$CuSO_4$, saturé	$CuSO_4 + 2e^- \rightleftharpoons Cu + SO_4^{2-}$	0,316
Sulfate morceaux	K_2SO_4, saturé	$HgSO_4 + 2e^- \rightleftharpoons Hg + SO_4^{2-}$	0,658

Tableau II-1: Potentiels de différents électrode de référence

II.4 Echelle de Nernst

C'est une échelle de classification des métaux :
Relation de NERNST :
Tout métal plongé dans l'eau ou dans un électrolyte fait passer en solution des ions positifs, le métal se charge donc négativement.
La dissolution du métal se stabilise lorsque la pression des ions en solution équilibre la pression d'ionisation du métal (tendance du métal à projeter des ions dans la solution).
L'attraction entre la couche (–) et la couche (+) s'appelle la « couche double » à laquelle correspond un certain potentiel.

Eléments chimiques	Couples Oxydant/Réducteur	E_0 (Volts)
Au	Au^{3+}/ Au	+1,42
O	O_2/H_2O	+1,23
Pt	Pt^{2+}/ Pt	+1,20
Ag	Ag^{+}/Ag	+0,80
Cu	Cu^{2+}/Cu	+0,34
H	H^{+}/H_2	0 (par convention)
Pb	Pb^{2+}/Pb	-0,13
Ni	Ni^{2+}/Ni	-0,25
Fe	Fe^{2+}/Fe	-0,44
Zn	Zn^{2+}/Zn	-0,76
Al	Al^{3+}/Al	-1,66
Mg	Mg^{2+}/Mg	-2,37

Tableau II-2: Potentiel de double-couche pour chaque élément chimique

II.5 Cinétique

II.5.1 Polarisation électrochimique

- Changement du potentiel d'électrode dû à l'écoulement du courant - trois types :

Activation - causée par une réaction d'électrode lente
Concentration - causée par des changements de concentration des réactifs ou des produits près d'une surface d'électrode
Polarisation ohmique - causée par une chute de tension IR dans la solution à travers des films

- Degré de polarisation = surtension :

$$\eta = E - E0$$

E - potentiel d'électrode pour certaines conditions

$E0$ - potentiel d'électrode pour un débit de courant nul = potentiel de circuit ouvert

II.5.2 Polarisation anodique/cathodique

• Polarisation anodique - déplacement du potentiel d'électrode dans la direction positive = l'électrode agit de manière plus anodique

• Polarisation cathodique - déplacement du potentiel d'électrode dans la direction négative = l'électrode agit de manière plus cathodique[3]

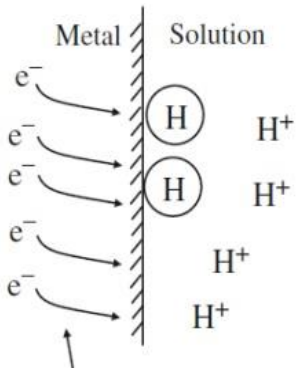


Figure 5:Polarisation cathodique (activation)

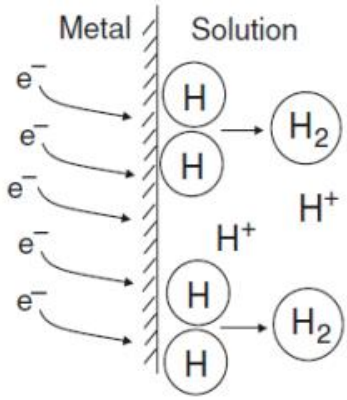


Figure 6:Polarisation cathodique (concentration)

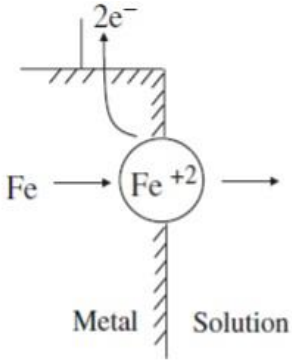


Figure 7: Polarisation anodique (activation)

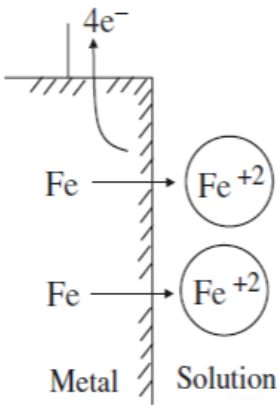


Figure 8:Polarisation anodique (concentration)

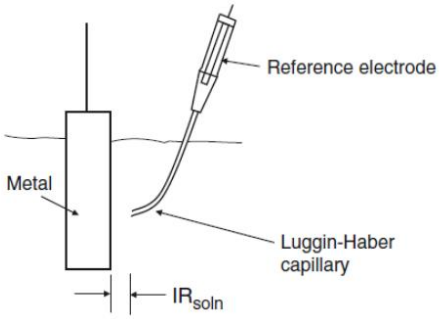


Figure 9:polarisation ohmique

II.5.3 Atténuation

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-$CuSO_4$).

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 Emax et Emin : 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 Emax, 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.

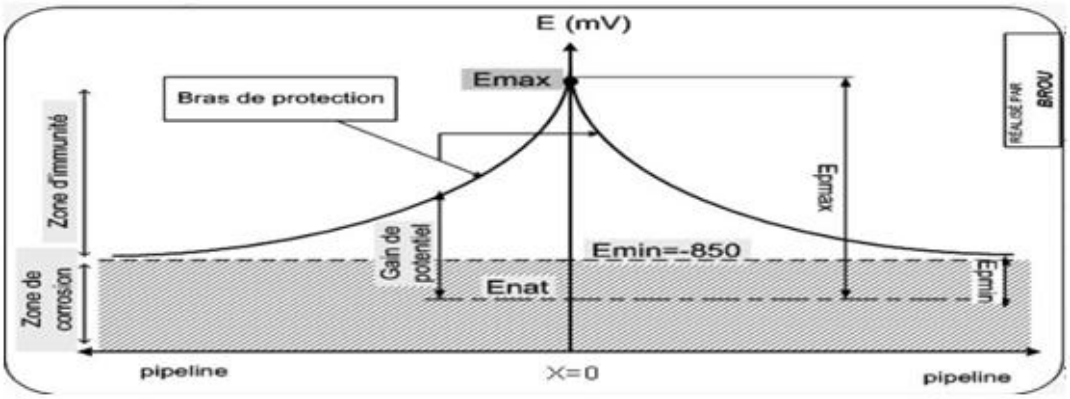


Figure 10:Variation du potentiel de protection le long d'une conduite

II.5.4 Diagramme d'Evans

Dans la plupart des cas, un système métallique simple soumis à une corrosion est assimilable à une cellule galvanique. Considérons une pile galvanique de corrosion. Pour établir le diagramme d'Evans de cette pile, on porte en abscisse le logarithme des valeurs absolues des intensités du courant (log I) et en ordonnées les valeurs correspondante des potentiels cathodique et anodique, en détermine aussi deux segments sensiblement rectilignes, qu'on appelle droites de Tafel, sur les courbes de polarisation cathodique et anodique du couple de corrosion. L'extrapolation de ces deux droites permet de déterminer en leur point d'intersection l'intensité du courant de corrosion (I_{corr}) et la valeur du potentiel de corrosion ou de dissolution (E_{corr}).

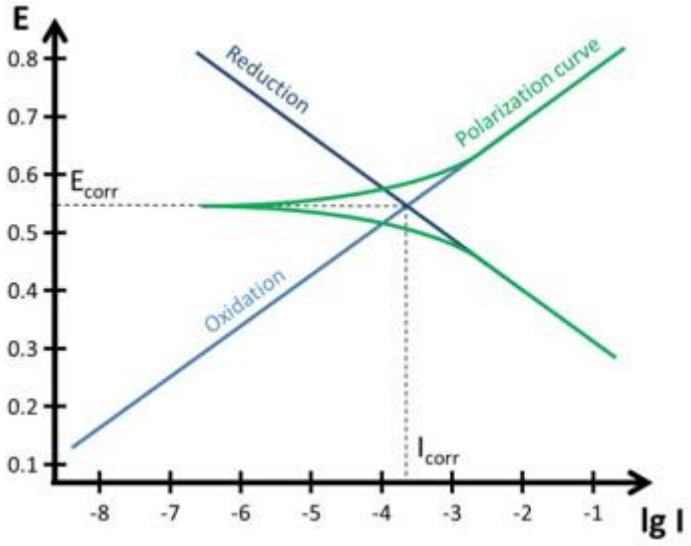


Figure 11:Diagramme d'Evans

II.5.5 Graphe de Pourbaix

Un diagramme potentiel-pH est relatif à un élément chimique donné, présent en solution aqueuse à divers nombres d'oxydation dans différentes espèces chimiques. Ces diagrammes ont été proposés et établis par le chimiste belge POURBAIX. On représente, pour les différents couples rédox mis en jeu, les variations du potentiel d'oxydoréduction (ou rédox) en fonction du pH.

Un diagramme potentiel-pH fait apparaître les différents domaines de prédominance ou d'existence de chaque espèce. La superposition de diagrammes relatifs à plusieurs éléments permet, par une méthode graphique simple de prévoir les réactions mises en jeu et leur sens d'évolution pour des concentrations initiales fixées des différents produits.(4)

Pour un métal qui se dissout son potentiel se réduira à :

$$E = E^0 + \frac{R \cdot T}{F} \cdot \ln(M^{n+})$$

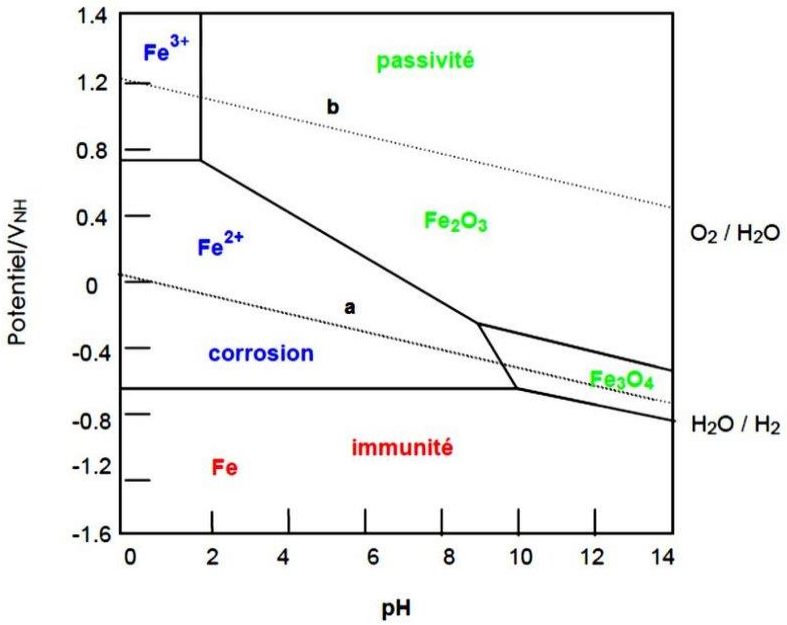


Figure 12: diagramme de Pourbaix

II.5.5.1 Zone de corrosion

Le fer se dissout dans la solution et forme des sels et des hydroxydes solubles.

II.5.5.2 Zone de passivité

Le fer est protégé par un film superficiel qui l'isole du milieu ambiant. C'est un domaine où le métal est protégé contre la solution si le film s'est formé d'une manière uniforme, s'il reste adhérent et si, mécaniquement, rien ne vient le détruire.

II.5.5.3 Zone d'immunité

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

II.6 Types de corrosion

II.6.1 La corrosion uniforme

C'est l'aspect de corrosion le plus rencontré dans la pratique, mais c'est l'aspect aussi le moins dangereux, car le métal est attaqué sur toute la surface et avec la même vitesse de corrosion. Les causes peuvent être chimiques, électrochimiques ou encore mécaniques

II.6.2 La corrosion localisée

C'est une corrosion qui se déroule en un lieu spécifiquement anodique d'une surface ou d'une structure métallique. Elle diffère de la corrosion uniforme par la distinction claire des endroits

anodiques et cathodiques. En pratique la corrosion localisée provient d'une hétérogénéité du matériau ou de l'environnement et souvent elle pose beaucoup de problèmes.

Les principales causes de cet aspect de corrosion sont :

- Surface de métal chimiquement hétérogène.
- Différence de potentiel dans les différentes zones du métal crées par la déformation.
- Endommagement local de la couche passive.

Les différents types de la corrosion localisée sont :

- Corrosion par piqûres.
- Corrosion inter-granulaire (inter-cristalline).
- Corrosion sous contrainte.
- Corrosion avec érosion.
- Fragilisation par l'hydrogène.
- Corrosion sélective.
- Corrosion galvanique.
- Corrosion par crevasses.[5]

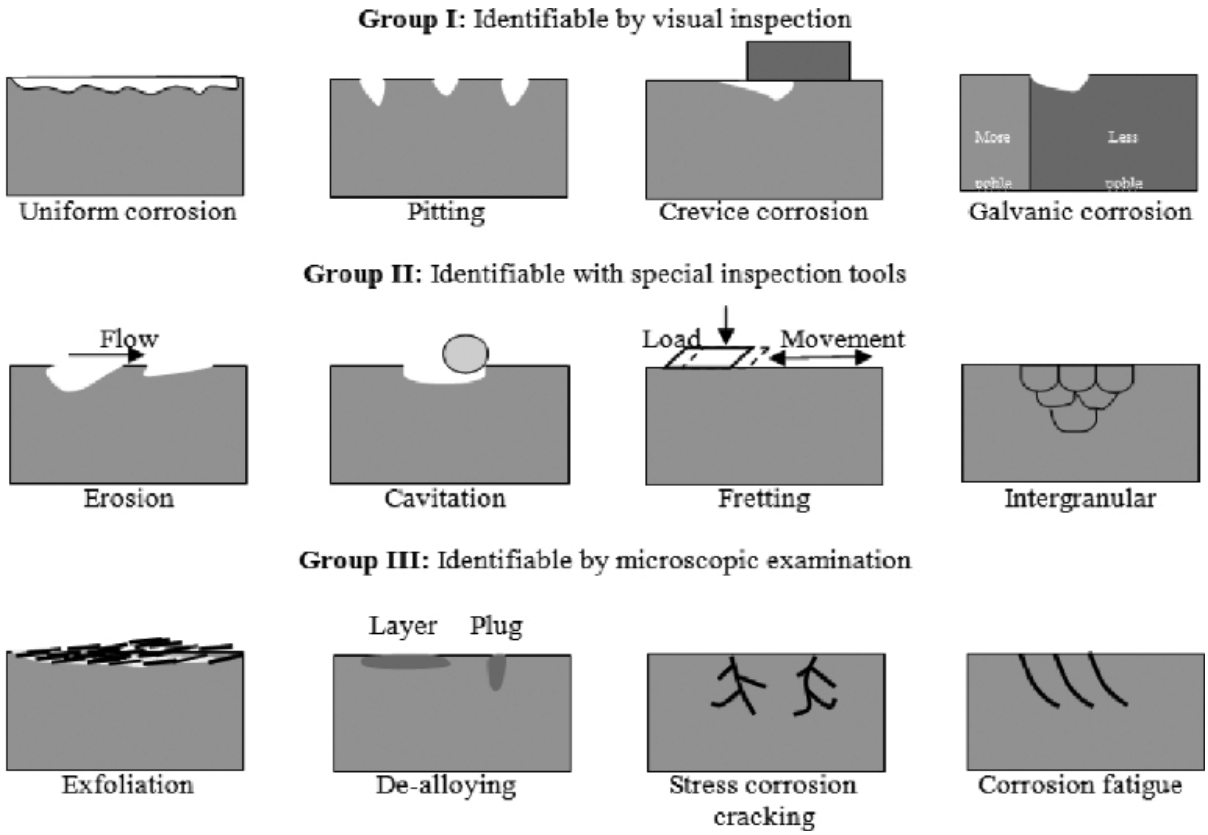


Figure 13: Types de corrosion

II.1 Les facteurs de corrosion

Les phénomènes de corrosion dépendent de nombreux facteurs et peuvent être classés en quatre grandes catégories :

II.1.1 Facteurs du milieu corrosif

Concentration en réactif, teneur en oxygène, pH du milieu, température, pression, ajout d'inhibiteurs.

II.1.2 Facteurs métallurgiques

Composition de l'alliage, processus de fabrication, impuretés, traitements mécaniques, traitements thermiques, ajouts protecteurs).
Les métallurgistes et les spécialistes de la corrosion tentent d'obtenir la meilleure résistance possible à la corrosion en modifiant la composition des alliages, les gammes de transformation et les traitements thermiques.

II.1.3 Facteurs définissant les conditions d'emploi

Etat de surface, forme des pièces, contraintes mécaniques, utilisation d'inhibiteurs, procédés d'assemblage.

II.1.4 Facteurs liés au temps

Vieillissement, contraintes mécaniques, remplacement du revêtement protecteur**.**

II.2 Moyens de protection contre la corrosion

Il n’existe pas de solution universelle de par la complexité du problème, il n’existe pas de métal inaltérable.
Pour chaque milieu, il existe un alliage moins exposé. Quatre types de solutions peuvent être retenus, avec différents principes de mise en œuvre :

- utilisation de revêtements protecteurs, non métalliques ou métalliques,
- métaux et alliages résistants à la corrosion,
- autoprotection par passivité du métal,
- protection cathodique ou électrochimique

II.2.1 Protection par revêtements non métalliques

II.2.1.1 Peinture, laque, vernis

Solution relativement simple qui permet une décoration de la pièce à protéger. C’est une faible protection car une détérioration locale du revêtement accélère la progression de la corrosion (aération différentielle).
Applications. Automobile, électroménager, cycles… Esthétique, décoration.

Type de revêtement	Densité de courant pour une conception optimisée (mA/m)	Densité de courant pour une conception conservatrice (mA/m)

PE ou PP tricouche	0,001 a 0,02	0,05 a 0,2
Résine epoxydique applique par fusion (FBE)	0,02 a 0,2	0,4 a 0,7
Goudron de houille ou revêtement asphaltique	0,2 a 0,3	0,3 a 0,8

II.2.1.2 Oxydation chimique

Méthode essentiellement appliquée à l'aluminium et ses alliages. L'épaisseurdu film d'oxyde qui se forme naturellement à la surface ne dépasse pas 1/10^{e}de micron. C'est une protection insuffisante contre une attaque chimique oul'abrasion. Le traitement d'oxydation permet de former à la surface du métal, par électrolyse, une pellicule d'alumine épaisse, dure et protectrice. Applications. Pièces exposées en atmosphère extérieure.

II.2.1.3 Phosphatation

Méthode consistant à réaliser une sous-couche permettant une meilleure adhésion des peintures à la surface d'une pièce à protéger. La pièce est plongée dans une solution de phosphate de manganèse, de zincou de sodium, portée à une température de 80°C à 100°C. L'immersion durede quelques minutes à une heure. Il y a formation de cristaux de phosphates de fer insolubles à la surface du métal qui permettront ensuite une meilleure adhésion mécanique de la peinture ou une protection naturelle. Applications. Métaux ferreux, aciers, fontes. Epaisseur du revêtement : 10 à20 μm. Anticorrosion. Bonne résistance au frottement. Déformation à froid des aciers et alliages d'aluminium.

II.2.2 Protection par revêtements métalliques

II.2.2.1 Immersion

Les pièces à protéger sont plongées dans un bain de métal en fusion.
Les revêtements possibles sont surtout des métaux à bas point de fusion :

- étain : étamage,
- zinc : zingage, galvanisation.

Applications. Protection contre la corrosion atmosphérique. Corps de vannes, bacs...

II.2.2.2 Diffusion

Les pièces à protéger sont soumises à un traitement thermique aucontact d'un élément chimique. Celui-ci diffuse depuis la surface. La pièce estrecouverte de métal pur en surface avec une sous-couche d'alliage par endessous:

- shérardisation : cémentation à 350°C de sable et de gris de zinc,
- chromisation : cémentation au fluorure de chrome à 1050°C,
- calorisation : cémentation Al + Al2O3 à 850°C.

Applications. Pièces mécaniques. Esthétique. Décoration.

II.2.2.3 Métallisation

Le métal protecteur (Zn, Al) est fondu à l'aide d'un pistolet métalliseur à gaz. Un jet d'air comprimé pulvérise le métal fondu. Les gouttelettes sont ainsi projetées sur la pièce avec une grande vitesse (100 m/s environ), permettant leur soudure en donnant un dépôt très adhérent.
Applications. Canalisations souterraines en fonte ou acier, automobile. Très bonne protection.

II.2.2.4 Placage

Méthode s'effectuant sur les tôles au cours d'un laminage à chaud. La pression et la diffusion thermique assurent la liaison entre le métal à protéger et le métal protecteur. Le cuivre, le nickel, le laiton sont utilisés comme métaux protecteurs sur les métaux ferreux ainsi que l'acier inoxydable.
Applications. Construction mécanique, chaudronnerie, cuves.

II.2.2.5 Electrolyse

On fait passer un courant électrique dans un bain électrolytique par l'intermédiaire d'une cathode constituée de la pièce à protéger (pôle –) et l'anode du métal à déposer. Le métal d'apport se dissout dans l'électrolyte et vient se déposer sur la cathode. Principaux métaux d'apport utilisés : cuivre, nickel, chrome, zinc, étain. Plusieurs étapes peuvent se succéder : par exemple, le chromage d'une pièce en acier nécessite un cuivrage suivi d'un nickelage.

Choix du revêtement Le choix d'un revêtement anticorrosion doit remplir les conditions 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, pour que les propriétés anticorrosion puissent être maintenues de façon permanente[(6)]

II.2.3 Protection par inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion sont des substances chimiques ajoutées à un environnement pour réduire la vitesse de corrosion d'un métal. Ils agissent de différentes manières, mais leur objectif principal est de perturber le processus électrochimique de la corrosion.

II.2.3.1 Types d'inhibiteurs de corrosion :

On distingue généralement quatre types d'inhibiteurs de corrosion selon leur mode d'action :

- **Inhibiteurs anodiques :** Ils bloquent la réaction d'oxydation à l'anode en formant une couche protectrice sur la surface du métal.
- **Inhibiteurs cathodiques :** Ils réduisent la vitesse de la réaction de réduction cathodique en s'adsorbant sur la surface du métal ou en complexant les ions métalliques.
- **Inhibiteurs filmants :** Ils forment une barrière imperméable entre le métal et l'environnement corrosif.
- **Absorbeurs d'oxygène :** Ils éliminent l'oxygène de l'environnement, qui est un élément essentiel à la corrosion.

II.2.4 Série galvanique

Les deux principaux facteurs affectant le taux de corrosion dans une cellule de corrosion électrochimique sont les caractéristiques électriques de l'électrolyte (résistivité) et la différence de tension entre l'anode et la cathode. La résistivité de l'électrolyte n'est généralement pas une caractéristique contrôlable, mais elle est mesurable. La tension ou le potentiel de l'anode métallique et de la cathode est également une caractéristique mesurable.

La tension mesurée est la différence de tension entre les deux électrodes. Étant donné que cette tension dépend uniquement d'une différence de tension, il doit y avoir une référence par rapport à laquelle toutes les autres électrodes peuvent être mesurées, pour donner un tableau relationnel, ou série, du potentiel de n'importe quelle électrode donnée. Comme indiqué précédemment, tous les métaux ont des potentiels différents, et un métal donné à des potentiels différents dans différents électrolytes. Pour qu'une électrode puisse être utilisée comme référence pour mesurer d'autres électrodes, le métal électrolyte en contact avec le métal doit être spécifié. Une fois cela fait, l'électrode devient une électrode de référence.

De nombreux types d'électrodes de référence ont été utilisés. En laboratoire, l'électrode hydrogène/hydrogène (électrode hydrogène, électrolyte hydrogène) est courante. Pour une utilisation sur le terrain, l'électrode cuivre/sulfate de cuivre (électrode cuivre, électrolyte de sulfate de cuivre entièrement saturé) est couramment utilisée, sauf en eau de mer où l'électrode argent/chlorure d'argent (électrode argent, électrolyte chlorure d'argent) est utilisée et doit être ajustée par le facteur ou le contact de chlorure de l'électrolyte. Ces références ne sont que des électrodes stables avec un potentiel connu utilisé pour mesurer le potentiel d'électrodes inconnues. En utilisant ces références, la valeur de potentiel de n'importe quel métal dans n'importe quel électrolyte peut être enregistrée pour référence future et comparée à d'autres électrodes. Un tableau de telles mesures est appelé série galvanique de mesures. Chaque tableau doit spécifier l'électrode de référence utilisée pour effectuer les mesures et
L'électrolyte dans lequel se trouvaient les électrodes inconnues, pour permettre une interprétation par des experts en corrosion. Cette série peut ensuite être utilisée pour déterminer quelle électrode sera l'anode (et se corrodera) dans une cellule de corrosion électrochimique.

SÉRIE GALVANIQUE DE METAUX : RÉFÉRENCE MÉTAL OU ALLIAGE :	CUIVRE/SULFATE DE CUIVRE

ÉLECTROLYTE	SOLS ET EAU NEUTRE
Magnésium pur	-1.75
Magnésium standard	-1.55
Zinc	-1.10
Alliage d'aluminium	-1.05
Aluminium pur	-0.80
Acier à faible teneur en carbone (propre et brillant)	-0.50 to -0.80
Acier à faible teneur en carbone (rouillé)	-0.20 to -0.50
Fonte (non graphitée)	-0.50
Plomb	-0.50
Acier à faible teneur en carbone (dans le béton)	-0.20
Laiton	
Cuivre, Laiton, Bronze	-0.20
Fonte à haute teneur en silicium	-0.20
Balance de moulin sur acier	-0.20
Carbone, graphite, coke	+0.30

Tableau II-3:Potentiel naturel de différents métaux

II.2.5 Introduction à la protection cathodique

La protection cathodique (CP) consiste à prévenir la corrosion en faisant en sorte qu'un métal, qui se comporterait normalement comme une anode et se corroderait, se comporte comme une cathode et soit préservé de l'attaque corrosive. Essentiellement, la CP consiste à prédéterminer l'anode dans la cellule de corrosion, ou à créer une grande cellule de corrosion pour surmonter les autres cellules de corrosion plus petites. Dans la protection cathodique, cela est réalisé de deux manières fondamentales. La première consiste à utiliser la série galvanique pour sélectionner un métal plus actif, installer ce

métal dans l'électrolyte et fournir un chemin métallique. Cette méthode est appelée protection cathodique sacrificielle, ou protection cathodique galvanique. Le métal galvaniquement plus actif (anode) est installé pour se sacrifier afin de protéger la structure
(Cathode). La tension (et le courant résultant) est simplement la différence de potentiel entre les deux types de métal. La deuxième méthode fondamentale de protection cathodique consiste à appliquer une source de courant continu qui force le courant à circuler d'une anode (ou plusieurs) installée vers la structure, faisant ainsi de toute la structure une cathode. Cette méthode est appelée protection cathodique par courant imposé.(7)

ENVIRONNEMENT	MILLIAMPÈRES (PAR MÈTRE CARRÉ)
Sol avec résistivité > 30 000 ohm-cm	10.7– 21.5
Sol avec résistivité 10 000 - 30 000 ohm-cm	21.5– 32.3
Sol avec résistivité 1 000 — et 10 000 ohm-cm	43.0– 64.6
Sol avec résistivité <1 000 ohm-cm	75.3– 269.1
Sol très agressif avec des bactéries anaérobies	161.5– 430.5
De l'eau encore fraîche	21.5– 43.0
Déplacement de l'eau douce	43.0– 64.6
Eau douce turbulente	53.8– 161.4
Eau fraîche et chaude	53.8– 161.4
Eau de mer calme	10.7– 32.3
Eau de mer en mouvement	32.3– 269.1
Béton	5.4– 16.1

Tableau II-4: Densite de courant a injecter selon lenvironnement

II.2.6 Protection cathodique galvanique

Dans les systèmes d'anodes galvaniques, le courant nécessaire à la protection cathodique est fourni par la corrosion d'un métal actif. Les systèmes d'anodes sacrificielles dépendent des différences de potentiel de corrosion établies par les réactions de corrosion qui se produisent sur différents métaux ou alliages. Par exemple, la différence de potentiel de corrosion naturelle du fer par rapport à une

électrode de référence cuivre/sulfate de cuivre est couramment comprise entre -0,4 et -0,6 volts en courant continu.

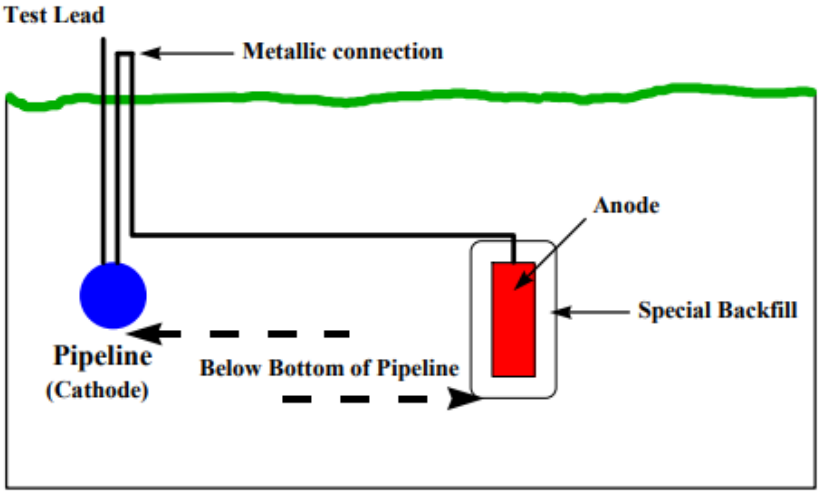


Figure 14 : Schéma de protection cathodique par anode sacrificiel

II.2.7 Protection cathodique par courant imposé

Tout comme dans les systèmes à anode galvanique, les systèmes à courant imposé fournissent un courant pour la protection cathodique d'une surface métallique. Cependant, dans le cas d'un système à courant imposé, le courant protecteur est fourni par un redresseur (ou une autre source de courant continu) au lieu de la différence de potentiel naturelle de l'anode par rapport à la structure. La différence de potentiel entre l'anode et la cathode est forcée à partir d'un lit d'anode non réactif par l'action d'une énergie supplémentaire provenant d'un redresseur pour forcer le flux d'électrons qui serait normalement produit dans la réaction de corrosion. L'énergie pour l'action de la pompe d'énergie électronique du redresseur est fournie par un courant alternatif ordinaire. L'effet deces électrons sur la structure protégée est le même que celui dérivé du type de système deprotection cathodique à anode sacrificielle. Cependant, le matériau de l'anode ne sert que desource d'électrons et de réactions électrochimiques anodiques (d'oxydation)

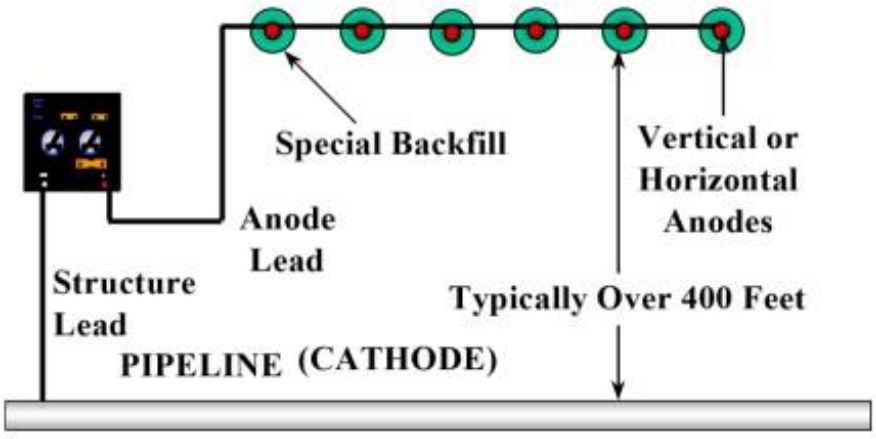


Figure 15 : System de protection cathodique par courant imposé

Conclusion

Corrosion des métaux est un processus naturel qui peut entraîner des dommages importants aux structures métalliques. Elle se manifeste sous plusieurs formes, notamment la corrosion uniforme, la corrosion galvanique, la corrosion par piqûres et la corrosion sous contrainte, chacune étant influencée par différents facteurs tels que l'humidité, la température et la composition chimique de l'environnement.

Pour contrôler la corrosion, diverses techniques sont utilisées, notamment la conception de matériaux résistants à la corrosion, l'application de revêtements protecteurs, et l'utilisation de méthodes électrochimiques comme la protection cathodique. Chaque méthode vise à prolonger la durée de vie des structures métalliques en minimisant les effets destructeurs de la corrosion.

Chapitre 2

III. Protection cathodique par courant imposé

III.1 Introduction

La Protection Cathodique par Courant Imposé (PCCI) est une méthode largement utilisée pour prévenir la corrosion dans les structures métalliques telles que les pipelines, les réservoirs de stockage, les plateformes offshores et les navires. Contrairement à la protection cathodique par anode sacrificielle, où un métal plus réactif est connecté à la structure pour attirer la corrosion, la PCCI repose sur une source de courant externe pour générer un courant électrique protecteur.

Voici quelques caractéristiques essentielles d'un système de protection cathodique par courant imposé :

1. **Source d'Énergie** : Les systèmes de PCCI nécessitent une source d'énergie externe, généralement un redresseur, pour fournir un courant électrique continu à la structure à protéger. Ce courant est utilisé pour contrer la tendance naturelle du métal à se corroder
2. **Anodes** : Dans un système de PCCI, des anodes inertes, souvent constituées de matériaux tels que le platine, l'oxyde métallique mixte ou le graphite, sont utilisées pour générer le courant protecteur. Ces anodes ne se corrodent pas et ne sont pas consommées pendant le processus de protection
3. **Électrolyte** : La structure à protéger doit être en contact avec un électrolyte, généralement du sol ou de l'eau, pour compléter le circuit électrique. L'électrolyte permet aux ions de se déplacer entre l'anode et la structure, facilitant ainsi le flux de courant.
4. **Système de Contrôle** : Les systèmes de PCCI nécessitent un système de contrôle pour surveiller et réguler la sortie du redresseur afin de garantir que la quantité correcte de courant est appliquée à la structure. Ce système de contrôle peut inclure des dispositifs de surveillance, tels que des électrodes de référence, pour mesurer le potentiel électrique de la structure et ajuster le courant en conséquence.
5. **Considérations de Conception** : Une conception appropriée d'un système de PCCI est essentielle pour une protection contre la corrosion efficace. Des facteurs tels que la taille et la forme de la structure, les propriétés de l'électrolyte et le niveau de protection souhaité doivent être pris en compte lors du processus de conception.
6. **Maintenance** : Une maintenance régulière est nécessaire pour garantir l'efficacité continue d'un système de PCCI. Cela peut inclure des inspections périodiques, des tests des composants du système et des ajustements des paramètres de contrôle si nécessaire.

Dans l'ensemble, les systèmes de protection cathodique par courant imposé offrent une protection contre la corrosion fiable et durable pour un large éventail de structures métalliques, ce qui en fait un choix privilégié dans de nombreuses applications industrielles.

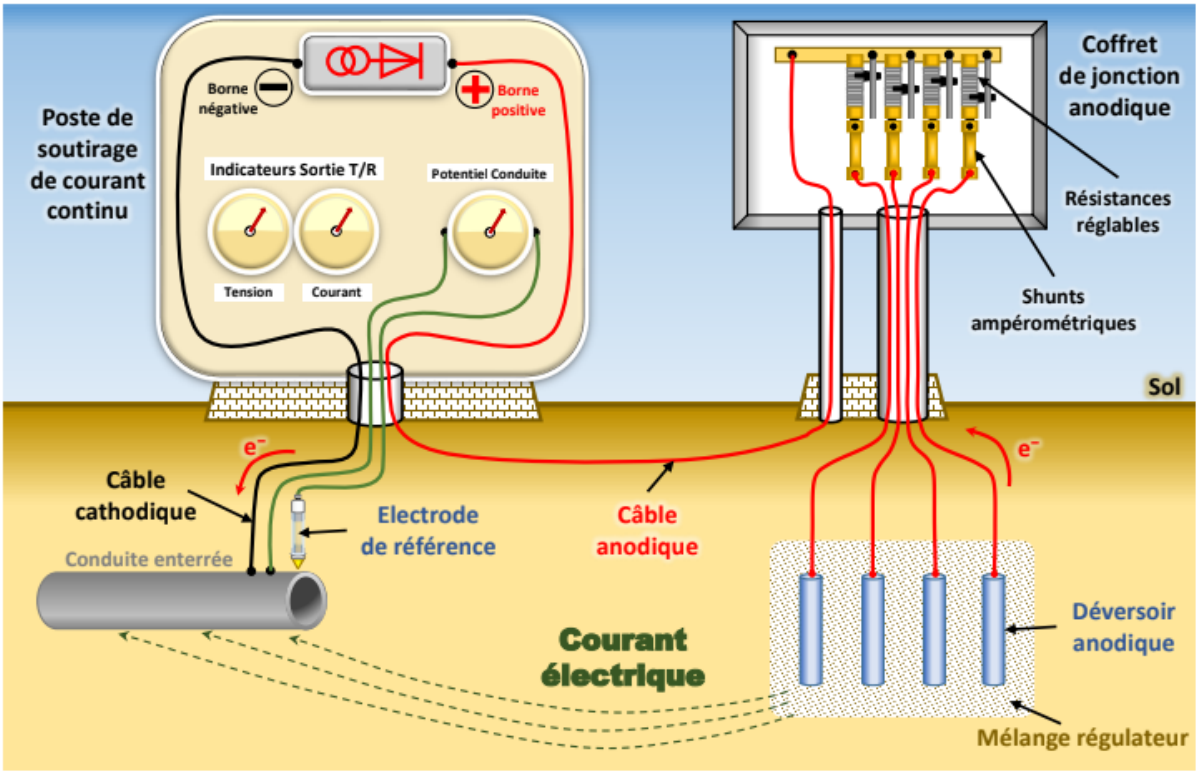


Figure 16 : Plan d'un système PCCI

III.2 Principe

- Relier au pôle négatif d'une source à courant continu, l'ouvrage à protéger,
- Relier le pôle positif relié à une pièce conductrice (en métal ou en graphite) enterrée à une certaine distance (déversoir)
- Le courant partant du 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.[8]

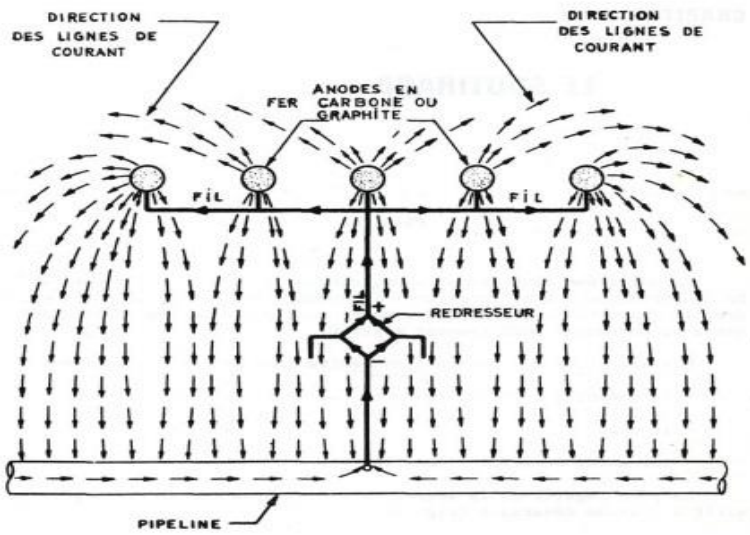


Figure 17 : Schéma d'un système PCCI

III.3 Critères de la PCCI

III.3.1 Mesure du potentiel

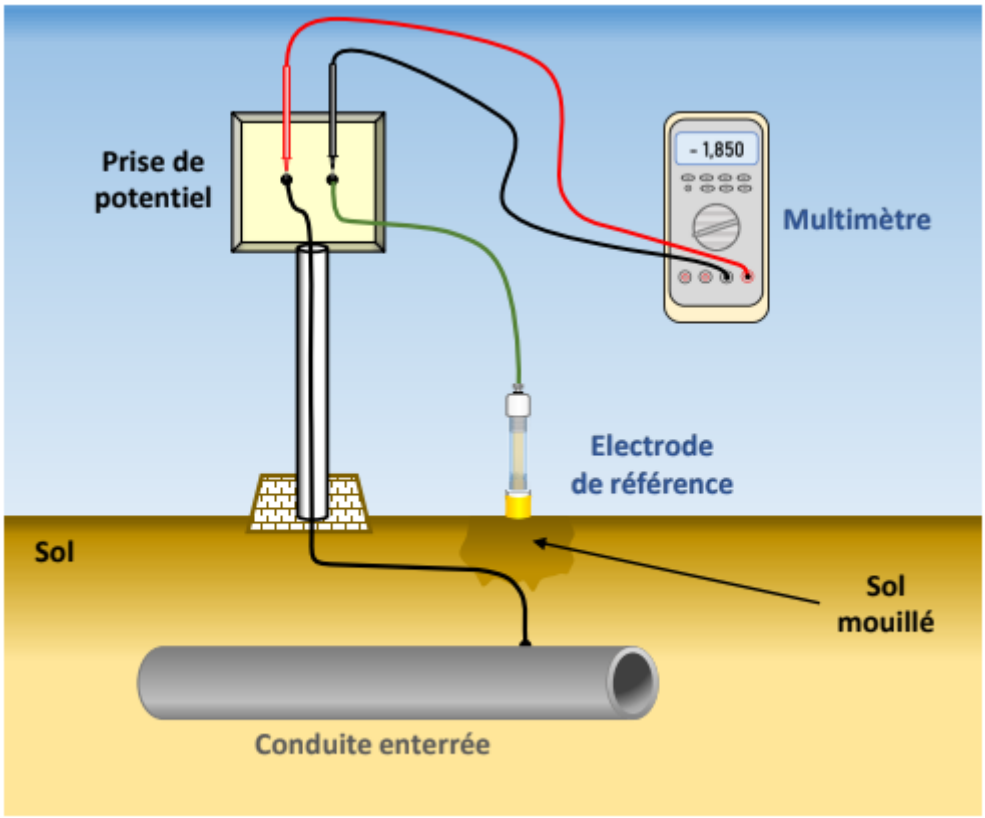


Figure 18 : Méthode de mesure de potentiel

L'électrode de référence Cu/CuSO4 est celle qui est le plus couramment utilisée pour les mesures du potentiel sur les conduites enterrées.

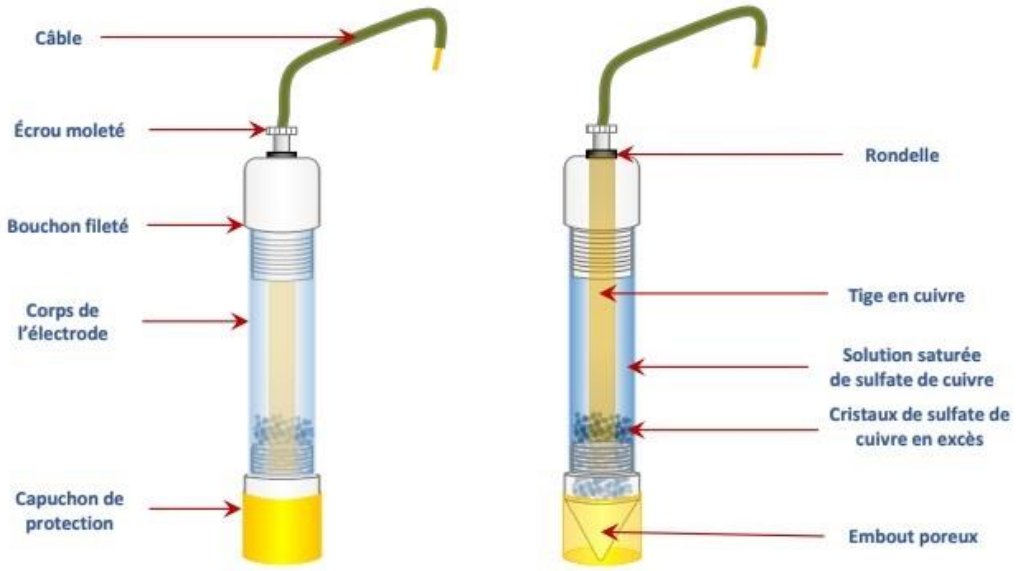


Figure 19 : Electrode de référence

III.3.2 L'agressivité de sol

La mesure de l'agressivité des sols pour les métaux peut être déduite de la mesure de leur résistivité électrique, c'est le critère d'appréciation le plus fréquemment utilisé.

- La méthode la plus utilisée est celle de WENNER ou méthode des 4 piquets.
- On plante dans le sol 4 piquets métalliques sur la même ligne, et à la même distance « a ».
- A l'aide d'une pile on fait passer un courant « I » entre les piquets extérieurs et l'on mesure la variation de tension « ΔU » produite par lecourant, entre les piquets intérieurs.
- On utilise pour cela un voltmètre à forte résistance interne (au moins50.000 Ω/V).

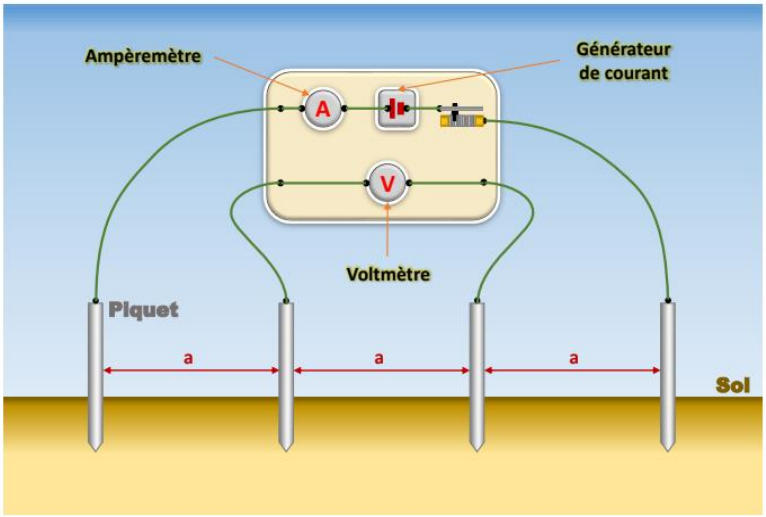


Figure 20: Schéma de mesure de l'agressivité de sol

La résistivité du sol à une profondeur comprise entre "a" et les 2/3 de "a" (a > H > 2/3a) est donnée par la formule suivante :

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot \frac{U}{I}$$

III.3.3 Mesure de densité de courant

Dans certaines circonstances si la mesure du potentiel n'est pas réalisable, il peut être utile de contrôler le courant assurant la protection cathodique.

Les densités de courant de protection usuelles pour l'acier nu tirées de l'expérience

- 0,7 mA/m2 : dans le ciment
- 5 mA/m2 : dans un sol résistant anaérobie et sans bactérie
- 35 mA/m2 : dans un sol aéré
- 70 mA/m2 : en eau douce non agitée
- 150 mA/m2 : en eau de mer faiblement agitée
- 500 mA/m2 : dans l'eau de mer mise en mouvement

Ces valeurs sont des moyennes et doivent toujours, au moment de projets, être ajustées en fonction

- des caractéristiques réelles du métal.
- de la nature de l'électrolyte (surtout).[9]

III.4 L'application de la protection cathodique par courant imposé dans l'industrie des hydrocarbures

La protection cathodique par courant imposé est une méthode cruciale dans l'industrie des hydrocarbures pour prévenir la corrosion des équipements métalliques enterrés ou immergés tels que les pipelines, les réservoirs de stockage et les plateformes offshore. Voici quelques-unes de ses applications principales :

1. **Pipelines**: Les pipelines transportent les hydrocarbures sur de longues distances, souvent à travers des environnements corrosifs comme le sol ou l'eau. La protection cathodique par courant imposé est utilisée pour prévenir la corrosion externe des pipelines, assurant ainsi leur intégrité et prolongeant leur durée de vie.
2. **Réservoirs de stockage**: Les réservoirs de stockage souterrains ou enterrés sont sujets à la corrosion due à l'environnement dans lequel ils sont placés. En utilisant la protection cathodique, on peut empêcher la corrosion des parois métalliques de ces réservoirs, assurant ainsi la sécurité et la longévité des installations de stockage.
3. **Plateformes offshore**: Les structures offshores, telles que les plateformes de forage et les installations de production, sont exposées à des conditions environnementales sévères, y compris le contact direct avec l'eau de mer, ce qui les rend particulièrement sujettes à la corrosion. La protection cathodique est utilisée pour protéger les structures métalliques de ces plateformes, réduisant ainsi les risques de défaillance structurelle.
4. **Équipements de raffinage**: Les équipements de raffinage, tels que les cuves de stockage et les échangeurs de chaleur, peuvent également bénéficier de la protection cathodique pour prolonger leur durée de vie en évitant la corrosion.

5. **Installations de traitement**: Les installations de traitement des hydrocarbures, y compris les usines de traitement du gaz et les installations de séparation, peuvent utiliser la protection cathodique pour protéger les équipements métalliques contre la corrosion, ce qui garantit un fonctionnement sûr et fiable de ces installations.

III.5 Installation d'un poste PCCI

III.5.1 Générateur de courant continu :

Constitué d'un transformateur et d'un redresseur.
Dans certaines situations où l'énergie électrique basse tension n'est pas disponible, il est nécessaire d'avoir recours à d'autres sources d'énergie autonomes comme :

- **Thermo-générateurs** : Un thermo-générateur est un dispositif qui convertit la différence de température entre deux points en électricité
- **Groupes électrogènes.**
- **Panneaux solaires.**
- **Accumulateurs et piles**

III.5.2 Déversoir anodique

Un déversoir anodique est un élément clé de la protection cathodique par courant imposé, utilisé pour fournir une source de courant électrique uniforme dans le sol.

- Il est constitué de matériaux conducteurs de courant.
- Il se comporte comme une anode,
- Il est soumis aux phénomènes d'oxydation.
- La masse du matériau constituant le déversoir devra être déterminéepour que l'installation ait une durée de vie de l'ordre de 15 à 20 ans.

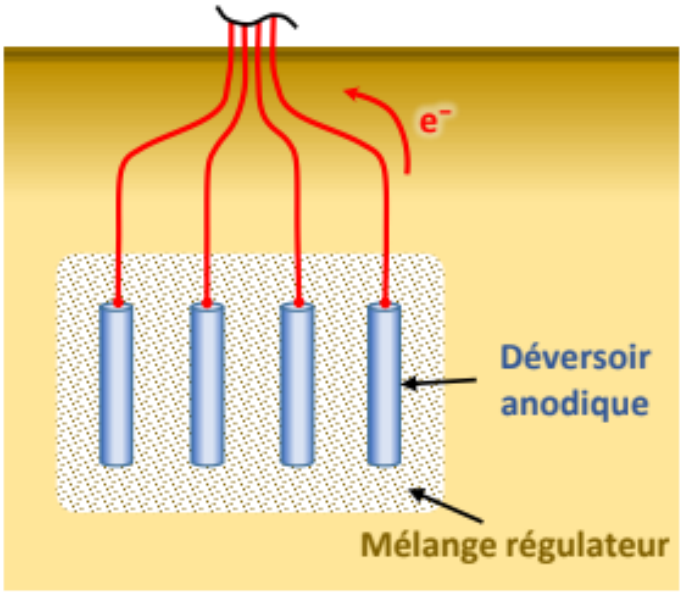


Figure 21 : Déversoir anodique

Déversoir	Perte de poids (Kg/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 x** 10^{-3}	**Tous types de sol Eau de mer**
Titane platiné	**10 x** 10^{-6}	**Milieu de faible résistivité**

III.5.3 Installation des anodes pour la protection des conduites

III.5.3.1 Anodes disposées verticalement

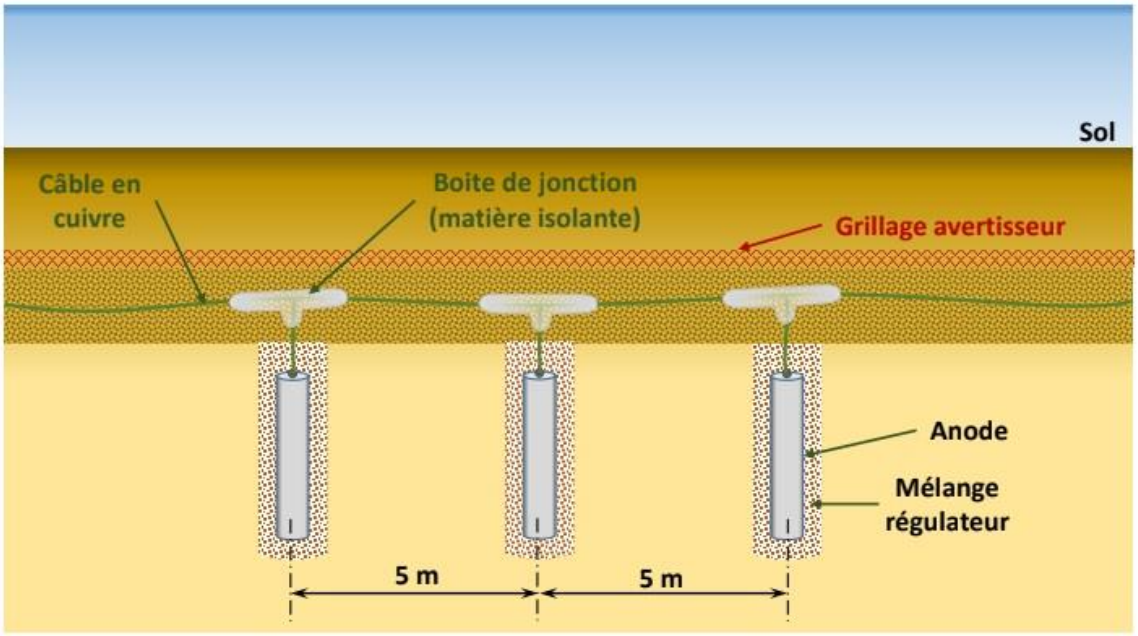


Figure 22 : anodes installées verticalement

III.5.3.2 Anodes disposées horizontalement

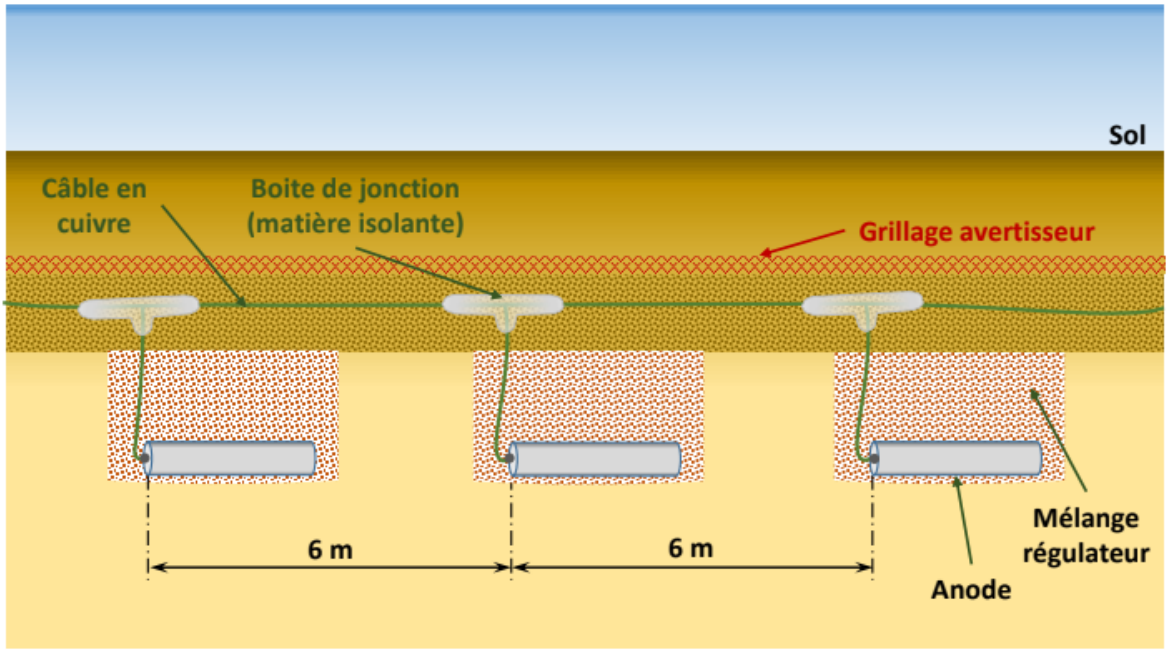


Figure 23 : anodes installées horizontalement

III.6 Facteurs affectant la protection cathodique

La corrosion est une menace pour d'innombrables industries. Elle endommage les métaux et peut créer une multitude de risques pour la sécurité. S'il existe de nombreux moyens de prévenir la corrosion, la protection cathodique est la plus efficace. Découvrez les principaux facteurs qui influencent la protection cathodique.

III.6.1 Conductivité

La conductivité est un facteur qui affecte l'efficacité de la protection cathodique en tant que méthode de résistance à la corrosion ou de prévention de la corrosion des métaux à risque. Les matériaux corrosifs et les environnements moins conducteurs ont une résistivité plus élevée. Plus il y a d'électrolytes conducteurs dans un environnement, plus la corrosion peut se former rapidement et dépasser les méthodes de protection cathodique. Comprendre la conductivité de l'environnement permet de déterminer à quel point la protection cathodique, ainsi que d'autres méthodes de prévention, doivent être surveillées.

Les applications dans le domaine de l'eau en sont un exemple. Le taux de corrosion dans l'eau océanique et salée est nettement plus élevé que dans l'eau douce ou les environnements humides. Cela s'explique par les propriétés moins conductrices de l'eau douce que de l'eau de mer.

III.6.2 L'utilisation de revêtements protecteurs

Les revêtements protecteurs sont un autre facteur qui influe sur la protection cathodique. Les revêtements de protection sont aussi communément appelés revêtements sacrificiels. Un revêtement

sacrificiel est une fine couche de substance semblable à de la peinture qui est appliquée sur les applications métalliques à risque. Ces fines couches permettent aux matériaux corrosifs de les affecter plutôt que la structure elle-même, ce qui protège cette dernière de la corrosion. Les revêtements de protection et la protection cathodique peuvent être utilisés conjointement. Il n'est pas rare que l'utilisation de ces deux méthodes de prévention de la corrosion soit imposée par les municipalités. Les revêtements protecteurs, ou revêtements sacrificiels, visent à attirer les matériaux corrosifs pour les corroder plutôt que la structure elle-même qui est protégée. Il ne s'agit pas d'une solution permanente, et elle peut ne pas durer très longtemps dans les zones très corrosives. Il est essentiel qu'un ingénieur certifié NACE participe à l'élaboration d'un plan global de prévention de la corrosion. Des structures différentes se dégradent à des vitesses différentes, nécessitant de nouvelles couches de protection à des moments différents. Il convient d'en tenir compte pour la santé et la sécurité de votre structure.

III.6.3 Composition métallique de la structure

Le type de métal dont est faite la structure que vous essayez de protéger peut affecter sa probabilité d'être sensible à la corrosion. Cela affecte grandement la protection cathodique. Certains métaux, en particulier les métaux purs, sont plus sensibles aux effets de la corrosion que d'autres métaux. De nombreux alliages métalliques sont conçus spécifiquement pour aider à prévenir la corrosion en ne réagissant pas aussi fortement à certaines matières corrosives. Bien qu'aucun métal ne puisse garantir une résistance parfaite, l'utilisation d'un alliage conçu pour résister à l'environnement dans lequel votre structure résidera peut contribuer à rendre la protection cathodique plus efficace. Il s'agit d'une information à prendre en compte lors du développement ou de la construction de votre application. La protection cathodique reste nécessaire pour chaque type de métal, en particulier dans les environnements à faible résistivité, mais elle peut être moins fréquente avec certains types de métaux qu'avec d'autres. L'environnement et les types de métaux ont tous deux une incidence sur ce point.

III.6.4 Proximité de la structure avec d'autres métaux

La proximité d'autres métaux par rapport à la structure à protéger peut affecter la protection cathodique. La force du flux d'ions entre les anodes et la cathode est affectée par la distance entre deux structures métalliques dans un environnement corrosif, en particulier pour les applications dans l'eau. Si d'autres métaux se trouvent à proximité, en fonction des méthodes de protection contre la corrosion et du type de métal, cette structure peut être affectée plus ou moins rapidement que la vôtre, et vice versa. Votre consultant en protection cathodique doit en prendre note et en tenir compte dans votre plan de protection.

III.7 Démarrage

III.7.1 Postes à courant imposé

La phase de démarrage doit comprendre les étapes suivantes:

- la mise sous tension des postes à courant imposé et la confirmation de leur fonctionnement correct;
- le réglage des paramètres des postes pour se conformer aux exigences en termes de potentiel de la conception. Il convient que les causes d’écarts majeurs soient confirmées par des mesurages.

Une action immédiate doit être entreprise si le potentiel d’une canalisation évolue vers des valeurs plus électropositives après la mise sous tension des sources de courant continu.

Les mesurages suivants doivent être effectués sur l'ensemble des postes à courant imposé:

- la tension de sortie du redresseur sur les postes à courant imposé;
- l'intensité du courant de protection;

En fonction de l'évaluation des résultats de ces mesurages, il convient d'ajuster les paramètres de réglage et d'effectuer de nouveau des mesurages.

III.7.2 Postes d'essai

Les mesurages suivants doivent être effectués au niveau des postes d'essai:

- le potentiel à courant établi aux extrémités de la canalisation protégée;
- le potentiel à courant établi aux emplacements importants;
- le potentiel à courant établi et le courant sur les coupons, s'ils existent;
- les potentiels de la structure par rapport à l'électrolyte des structures étrangères voisines afin de
- vérifier toute influence éventuelle sur ces dernières;
- le potentiel à courant établi et le courant traversant la liaison au niveau des structures liaisonnées;
- le potentiel à courant établi pour vérifier l'isolement électrique de la canalisation au niveau des raccords isolants, des fourreaux métalliques, du béton armé, des systèmes de mise à la terre

III.8 Vérification de l'efficacité de la protection cathodique

III.8.1 Généralités

Les potentiels de la canalisation par rapport à l'électrolyte doivent être mesurés une fois que la canalisation à protéger a un contact suffisant avec le milieu électrolytique après consolidation de la tranchée par le matériau de remblai, fonctionne à sa condition de conception (température, pression) et après une période de polarisation appropriée (dépendant principalement de la nature de l'électrolyte et de la densité du courant de protection traversant les défauts de revêtement).

III.8.2 Mesurages du potentiel de courant continu et de la tension alternative

Les mesurages suivants doivent être effectués:

- les potentiels à courant établi continu et les tensions alternatives au niveau de chaque poste d'essai: dans les zones où les potentiels ou bien les chutes de tension mesurés varient (par exemple, à la suite d'une interférence provenant d'un système de traction à courant continu), il convient d'effectuer des mesurages à l'aide d'un enregistreur de données, de préférence pendant 24 h, et simultanément sur des postes d'essai adjacents;
- les potentiels à courant coupé sans courants vagabonds continus au niveau de tous les postes d'essai.

NOTE Il est préférable d'effectuer ces mesurages au niveau de tous les postes d'essai.

III.8.3 Mesurages de courant

Les mesurages suivants doivent être effectués:

- le courant continu protecteur au niveau de chaque poste à courant imposé comprenant le mesurage du courant dans chaque câble négatif;

- le courant continu protecteur au niveau de chaque anode;

- les courants continu et alternatif circulant à travers des liaisons, le sens des courants continus devant être noté, en particulier en présence de courants vagabonds;;
- les courants continu et alternatif traversant des dispositifs de découplage de courant continu;
- les courants continu et/ou alternatif traversant une sonde ou un coupon d'essai externe, de préférence enregistrés sur 24 h dans le cas de courants vagabonds continus et/ou d'interférences de courant alternatif.

III.8.4 Périodicités minimales des mesurages et des contrôles de routine

Élément	Action	Périodicité
Poste à courant imposé	Contrôle visuel de l'unité de transformateur-redresseur et relevé par lecture de la tension et du courant de sortie	De trois mois
Poste à courant imposé	Essais fonctionnels complets du poste à courant imposé (par exemple, vérification de l'unité de transformateur- redresseur, contrôle de l'électrode permanente, détermination de la résistance du déversoir, mesurage du système de mise à la terre, contrôle des instruments) et mesurage de la tension et du courant de sortie	De trois mois
Connexions à la structure étrangère (liaison résistive ou directe)	Mesurage de la circulation du courant	Un an
Connexions à la structure étrangère (liaison résistive ou directe)	Essais fonctionnels complets du dispositif et mesurage de la circulation du courant (intensité et sens) et du potentiel	De un à trois ans
Systèmes de mise à la terre connectés à la canalisation et associés au système de protection cathodique ou au système d'atténuation de corrosion	Essais fonctionnels complets des dispositifs et détermination de la résistance des déversoirs et de la circulation du courant traversant le système d'atténuation (s'il existe)	De un à trois ans
Électrode de référence permanente	Comparaison avec une électrode de référence dont l'exactitude peut être reliée à une électrode fixe	De un à six ans
Postes d'essai sélectionnés	Mesurage du potentiel *E*ON	Un an
Tous les postes d'essai	Mesurage du potentiel *E*OFF	De trois ans
Poste d'anodes galvaniques	Contrôle visuel des postes et mesurage du potentiel de la conduite par rapport à l'électrolyte	Un an
Poste d'anodes galvaniques	Essais fonctionnels complets du poste d'anodes galvaniques (par exemple, paramétrage de la résistance, efficacité de la connexion des liaisons et mesurage du potentiel de la conduite par rapport à l'électrolyte)	Trois ans

III.9 Conclusion:

En conclusion, la protection cathodique par courant imposé est une méthode essentielle pour prévenir la corrosion dans les structures métalliques, en particulier dans des industries telles que les hydrocarbures. Cependant, son efficacité repose sur des calculs précis et le respect de critères spécifiques pour obtenir les résultats souhaités.

Des calculs doivent être effectués pour déterminer des facteurs tels que la densité de courant, la distribution des anodes et les exigences en potentiel électrique. De plus, des critères tels que l'intégrité du revêtement, la résistivité du sol et les conditions environnementales doivent être pris en compte pour assurer une performance optimale.

En évaluant méticuleusement ces facteurs et en respectant les normes établies, les systèmes de protection cathodique peuvent efficacement atténuer la corrosion, prolongeant ainsi la durée de vie des structures métalliques et garantissant leur fonctionnalité et leur sécurité continues dans des environnements industriels exigeants.

Chapitre 3

IV. Choix des équipements de PCCI

Introduction:

Dans les chapitres 3 et 4 de ce mémoire, nous aborderons en détail le processus de mise en place d'un système de protection cathodique pour le raccordement des 14 puits de gaz brut vers l'usine de HAMRA à Hassi Messaoud. Ces chapitres se concentrent sur les aspects techniques et pratiques nécessaires pour assurer une protection efficace contre la corrosion des pipelines. Les étapes suivantes seront couvertes :

Calcul et dimensionnement du système de protection cathodique : Nous présenterons les méthodes et les formules nécessaires pour dimensionner correctement le système, en tenant compte des paramètres spécifiques aux conditions du site.

Spécification du matériel et équipements de la protection cathodique : Une liste détaillée des équipements requis, ainsi que leurs spécifications techniques, sera fournie pour garantir une mise en œuvre optimale.

Procédure pour l'installation du système de protection cathodique : Nous décrirons les étapes de l'installation, en insistant sur les bonnes pratiques et les précautions à prendre pour assurer une installation correcte et durable.

Spécification pour les essais, pré démarrage et mise en service : Nous expliquerons les tests àeffectuer avant la mise en service du système, ainsi que les procédures de pré démarrage pourvérifier que tout fonctionne conformément aux spécifications.

Diagrammes schématiques des systèmes de la protection cathodique : Des diagrammes schématiques seront présentés pour illustrer les configurations typiques des systèmes de protection cathodique.

Plans d'implantation des équipements de la protection cathodique : Nous fournirons des plans détaillés montrant l'emplacement des différents équipements sur le site.

Plans de cheminement des câbles de la protection cathodique : Enfin, nous inclurons des plans de cheminement des câbles, indispensables pour assurer une connexion fiable et sécurisée entre les différentes composantes du système.

Ces chapitres fourniront une vue d'ensemble complète et intégrée des différentes étapes nécessaires pour la mise en place et la maintenance d'un système de protection cathodique efficace, assurant ainsi la longévité et la fiabilité des pipelines pour une durée de vie d'environ 30 ans.

IV.1 Description du projet

Le projet consiste en la réalisation en EPC d'un réseau de collecte pour le raccordement de 14 puits de gaz brut vers l'usine existante de Hamra comprend : Raccordement de quatorze (14) Puits de Gaz (PPG), Quatre (04) Manifolds y compris installation de 14 Flowlines enterrés des puits vers MFDs et de 04Trunklines enterrés.

Le champ de Hamra est situé dans la région de Rhour de Nouss, à environ 1200 km au Sud d'Alger et à350 km au Sud Est de Hassi Messaoud. Le champ gazier Cambro-ordovicien de Hamra comporte quatorze (14) puits de gaz à condensat avec une production estimée entre 3 à 3,5 MM Sm3/j de gaz et1 172 m3/j de condensat.

L'étendue des prestations et travaux relatives à ce Projet comprend essentiellement :

- Toutes les études d'ingénierie de detail ;
- L'approvisionnement en matériels et équipements ;
- La construction et le montage sur Site ;
- Le raccordement des puits et manifolds aux installations existantes ;
- L'ensemble des essaies et mise en service

IV.2 Objectifs

Le présent document a pour objet de la description technique des principaux travaux à exécuter dans lecadre du projet « la réalisation en EPC d'un réseau de collecte pour le raccordement de14 puits de gazbrut vers l'usine existante de Hamra ».

IV.3 Normes équivalentes

La priorité suivante de respect des normes et standards doit être suivie :

- Chaque fois que les standards communément adoptés par l'entreprise réalisatrice sont disponibles, ils doivent être utilises en priorité.
- Les normes nationales ou internationales, correspondant aux besoins du projet, doivent être utilisees, si le sujet en question n'est pas couvert par des standards communément adoptés par l'entreprise réalisatrice.
- En cas de contradiction entre deux documents, le document le plus contraignant sera appliqué.
- Quand deux normes ou plus définissent des exigences différentes, la plus sécurisante devra être utilisee, sous réserve de l'approbation du M.O.

.

IV.4 Techniques de protection adoptées contre la corrosion

Les paragraphes suivants donnent plus de détails sur les différentes structures et les différents systèmes à proposer.

IV.5 Protection cathodique a courant impose

Le courant électrique est généralement fourni par un générateur de courant continu, dont le pôle négatif est relié à la structure à protéger et le pôle positif à un « déversoir» (anode) qui est enterré assez loin de cette structure. L'alimentation électrique permet de polariser catholiquement la structure à protéger en faisant circuler un courant continu entre l'ouvrage à protéger et une anode auxiliaire dite « déversoir».

La protection cathodique à courant imposé sera utilisée comme une protection permanente pendant toute la durée de vie du pipeline. Cette protection peut assurer la régulation du courant débité vers la structure à protéger selon la demande du courant requise.
Avant de pouvoir finaliser la conception du système de protection cathodique définitive, le tracé du pipeline doit faire l'objet d'une étude de résistivité de sols, ainsi que les emplacements des déversoirs anodiques (puits anodique).

IV.6 Générateur de courant

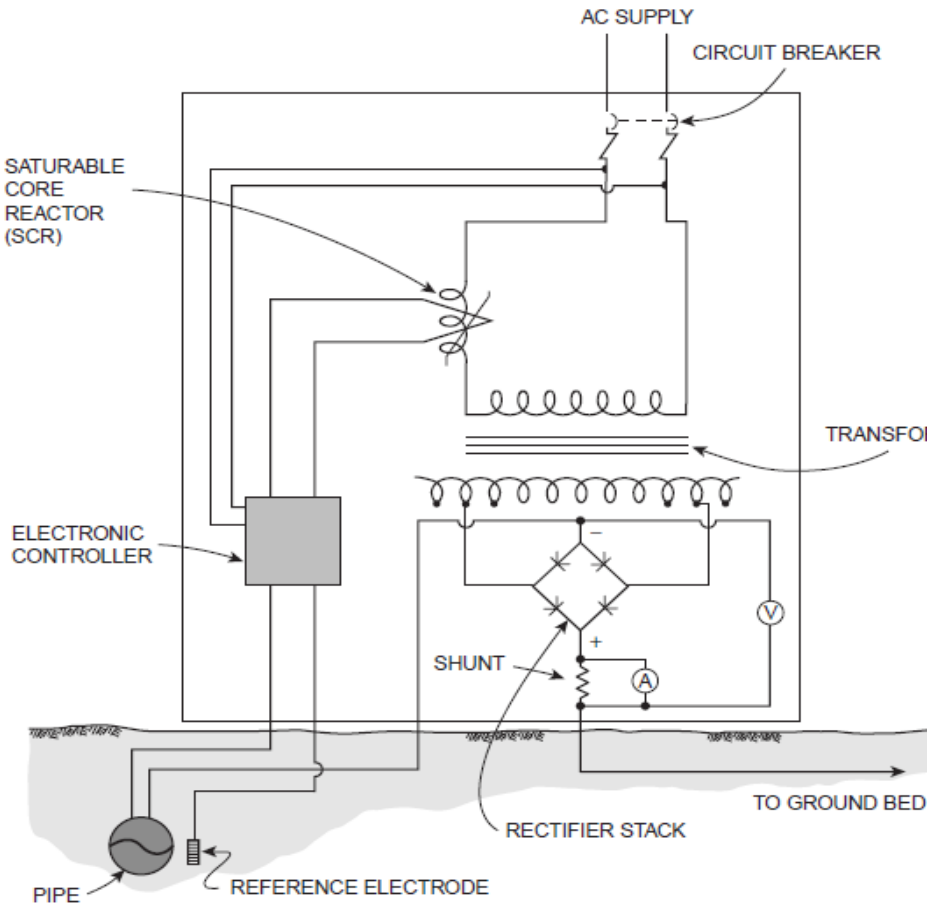


Figure 24: Schéma typique d'un redresseur à potentiel constant.

IV.6.1 Etude de redresseur

IV.6.1.1 Schéma de principe

Le montage redresseur PD2 mixte de deux thyristors et deux diodes connectés comme il suit:

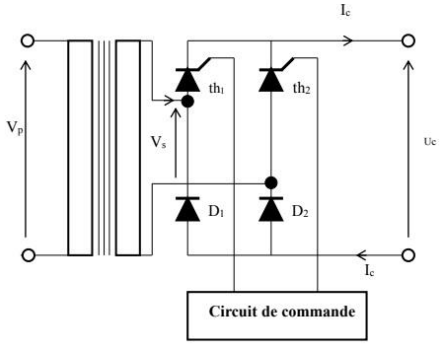


Figure 25 : Schéma de principe

Le transformateur d'alimentation n'est pas nécessaire en principe au fonctionnement, mais il sera en général présent pour modifier la tension à l'entrée du montage.
Prenons comme expression de la tension au secondaire du transformateur Vs:

$$Vs(t) = Vmsin\omega t$$

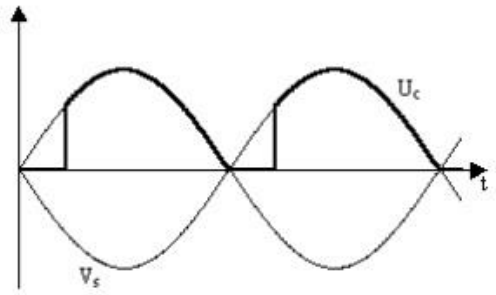
Les thyristors sont débloqués avec un retard en angle deω, c'est à dire que des impulsions de déblocage sont envoyées sur les gâchettes des thyristors respectivement aux angles

Pour th1:$\omega t = \alpha + 2k\pi$

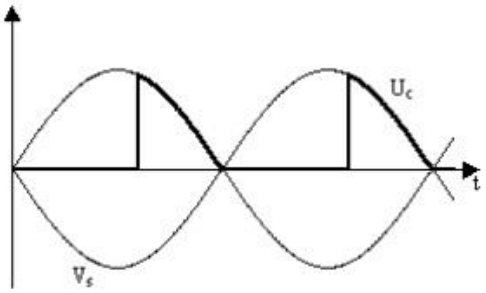
Pour th2:$\omega t = (\alpha + \pi) + 2k\pi$

Les différentes phases de fonctionnement du montage sont alors décrites par le tableau suivant:

Intervalle	Eléments passants	Tensions aux bornes des éléments bloqués	Tension redressés
$\alpha < \omega t < \pi$	th_1, D_2	$Vth2 = -Vs + Vth1 \approx -Vs$ $VD1 = -Vs + VD2 \approx -Vs$	$Uc = Vs - Vth1 - Vth'2 \approx Vs$ U_C= V
$\pi < \omega t < \pi + \alpha$	th_1, D_1	$Vth2 = -Vs + Vth1 \approx -Vs$ $VD1 = Vs + VD1 \approx Vs$	$Uc = -Vth1 - VD1 \approx 0$
$\pi + a < \omega t < 2\pi$	th_2, D_1	$Vth1 = Vs + Vth2 \approx Vs$ $VD2 = Vs + VD1 \approx Vs$	$Uc = -Vs - Vth2 - VD1 \approx -Vs$
$2\pi < \omega t < 2\pi + a$	th_2, D_2	$Vth1 = Vs + Vth2 \approx Vs$ $VD1 = -Vs + VD2 \approx -Vs$	$Uc = -Vth2 - VD2 \approx 0$



Pour $a \leq \pi/2$



Pour $a > \pi/2$

IV.6.2 Etude des tensions

IV.6.2.1 Valeur moyenne de la tension redressée

La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par:

$$U_{cmoy} = \frac{1}{T}\int_T U_c\,(t)dt = \frac{1}{\pi}\int_\alpha^\pi V_m \sin\omega t d\omega t = \frac{V_m}{\pi}[-\cos\omega t]_\alpha^\pi = \frac{V_m}{\pi}(1+\cos\alpha)$$

La valeur moyenne de la tension redressée varie de 0 à 2 $\frac{V_m}{\pi}$ lorsque α varie de π à 0. On a un réglage possible de la valeur moyenne de la tension de sortie, mais, contrairement au cas du PD2 à thyristors, le fonctionnement en onduleur non-autonome n'est pas possible. Au-delà de α = π, l'ordre de déclenchement parvient sur la gâchette des thyristors alors que ceux-ci sont polarisés négativement de telle sorte qu'ils restent bloqués.

IV.6.2.2 Le facteur d'ondulation

Le facteur d'ondulation est défini par:

$$K_0 = \frac{U_{cmax} - U_{cmin}}{2U_{cmoy}}$$

Deux cas sont à considérer:

$-\alpha \leq \frac{\pi}{2}$, dans ce cas il est facile de constater sur le graphe de la tension redressée que:

$$U_{cmax} = V_m \text{ et } U_{cmin} = 0$$

$$K_0 = \frac{\pi}{2(1+\cos\alpha)}$$

$-\pi > \alpha > \frac{\pi}{2}$, le déclenchement des thyristors a lieu après le passage par son maximum de la tension redressée, d'où

$$U_{cmax} = V_m \sin\alpha \text{ et } U_{cmin} = 0$$

$$K_0 = \frac{\pi}{2}\frac{\sin\alpha}{(1+\cos\alpha)}$$

Remarque: De façon plus rigoureuse, la valeur maximale U_{cmax} de tension redressée peut être calculée en déterminant la valeur de ωt qui annule la dérivée.
Dans l'intervalle $\alpha < \omega t < \pi + \alpha$, la tension redressée a pour expression :

$$U_c \approx Vs = V_m \sin\omega t$$

La dérivée $(\frac{dUc}{d\omega t}) = V_m \cos\omega t = 0$ pour $\omega t = \frac{\pi}{2} + k\pi$ avec k entier. Dans le cas $\alpha \leq \frac{\pi}{2}$, seule la valeur $\omega t = \frac{\pi}{2}$ appartient à l'intervalle considéré, la valeur maximale de tension étant alors de :

$$U_{cmax} = Uc\ (\omega t = \frac{\pi}{2}) \approx V1\ (\omega t = \frac{\pi}{2}) = Vm$$

Pour $\pi > \alpha > \frac{\pi}{2}$, la valeur $\omega t = \frac{\pi}{2}$ n'appartient pas à l'intervalle, on doit donc prendre celle correspondant à $\omega t = \alpha$, pour laquelle, comme le montre la courbe la tension redressée, Uc(t) est maximale.

La valeur minimale U_{cmin} est toujours, en ce qui concerne de montage, toujours nulle comme en témoigne les courbes de la tension redressée $U_c(t)$.
- Tensions maximales aux bornes des diodes et des thyristors bloqués
Si on considère l'intervalle $[\alpha, \pi + \alpha[$ la tension aux bornes de th_2 est:

$$V_{th2} = -Vs + V_{th1} \approx -Vs$$

Les tensions maximales aux bornes des thyristors sont obtenues en déterminant les valeurs de ωt qui annulent la dérivée de la tension à leurs bornes.

Pour V_{th2}

$$(\frac{dV_{th2}}{d\omega t}) = -V_m \cos\omega t = 0 \text{ pour } \omega t = \frac{\pi}{2} + k\pi \text{ avec k entier}$$

L'angle α pouvant varié de 0 à π, les 2 premières racines, à savoir $\frac{\pi}{2}$ et $\frac{3\pi}{2}$, peuvent être atteintes durant l'intervalle de blocage de th2. Elles correspondent respectivement à des tensions aux bornes du thyristor de -Vm et Vm.

$$\alpha \leq \frac{\pi}{2} V_{thmax} = V_{th2}\left(\omega t = \frac{\pi}{2}\right) = -V_m$$

$$\alpha > \frac{\pi}{2} V_{thmax} = V_{th2}\left(\omega t = \frac{3\pi}{2}\right) = V_m$$

$$V_{thmax} = \pm V_m$$

La première valeur doit être respectée pour éviter le claquage du thyristor, la seconde pour éviter sa mise en conduction intempestive par dépassement de la tension de retournement.

Pour ce qui est des diodes, on peut par exemple considérer l'intervalle$[0, \pi[$durant lequel la diode D2 est bloquée, avec à ses bornes la tension

$$V_{D2} = -Vs + VD1 \approx -Vs$$

La tension maximale à supporter par les diodes en inverse est obtenue en déterminant les valeurs de ωt qui annulent la dérivée de la tension à leurs bornes, soit.

$$(\frac{dV_{D2}}{d\omega t}) = -V_m \cos\omega t = 0 \text{ pour } \omega t = \frac{\pi}{2} + k\pi \text{ avec k entier}$$

Seule la première racine $\frac{\pi}{2}$ appartient à l'intervalle dans lequel D_2 est bloquée.
Elle correspond à une tension maximale de

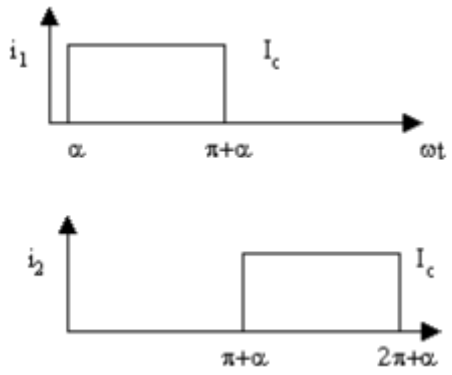
$$V_{Dmax} = V_{D2}\,(\omega t = \frac{\pi}{2}) = -V_m$$

On obtiendrait bien sûr, par un calcul similaire, les mêmes valeurs maximales de tension aux bornes des autres diodes et thyristors.

IV.6.3 Etude des courants

IV.6.3.1 COURANTS DANS LES DIODES ET LES THYRISTORS

Le courant de sortie étant considéré comme constant, les diodes et thyristors parfaits, on déduit de l'étude du fonctionnement les formes d'ondes des courants dans ceux-ci:



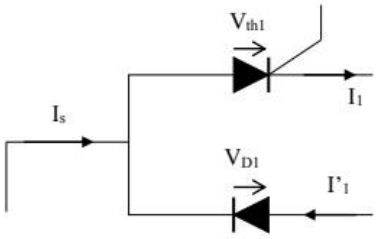
i1, i2, i'1, i'2 sont respectivement les courants dans les thyristors th1, th2, et les diodes D1, D2.
On en tire i_{max}, i_{moy} et i_{eff}, les valeurs maximale, moyenne et efficace de ces courants:

$$i_{max} = I_c$$

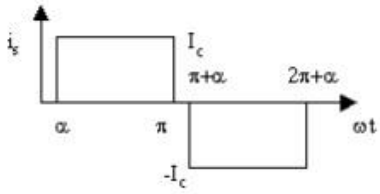
$$i_{moy} = \frac{1}{T}\int i_i(t)dt = \frac{I_c}{2}$$

$$i_{moy} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_T {i_i}^2(t)dt} = \frac{I_c}{\sqrt{2}}$$

IV.6.3.2 Courant et facteur de puissance au secondaire du transformateur



On en déduit la forme d'onde du courant dans le secondaire:



Ainsi que les valeurs moyenne et efficace du courant au secondaire:

$$I_{smoy} = 0$$

$$I_{seff} = \frac{1}{T}\int_T I_s^2(t)dt = I_c\sqrt{1-\frac{\alpha}{\pi}}$$

Le facteur de puissance est par définition le rapport de la puissance active sur lapuissance apparente. Les diodes et les thyristors étant supposés parfaits, ils ne dissipent pas de puissance. Par conséquent la puissance fournie par le secondaire du transformateur est aussi la puissance reçue par la charge, soit

$$P = \frac{1}{T}\int_T I_c(t)I_c dt = \frac{I_c}{T}\int_T U_c(t)dt = U_{cmoy}.I_c$$

La puissance apparente au secondaire est quant à elle

$$S_s = V_{seff}.I_{seff} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}I_c\sqrt{1-\frac{\alpha}{\pi}}$$

d'où

$$F_s = \frac{\sqrt{2}}{\pi}.\frac{1+\cos\alpha}{\sqrt{1-\frac{\alpha}{\pi}}}$$

IV.6.4Circuit de commande

L'objectif de notre travail est de réaliser un circuit de commande électronique qui permet l'obtention d'une tension de sortie réglable. Pour cela, nous avons fait notre réalisation en suivant le bloc diagramme de l'instrumentation électronique illustré dans la figure ci-dessous.

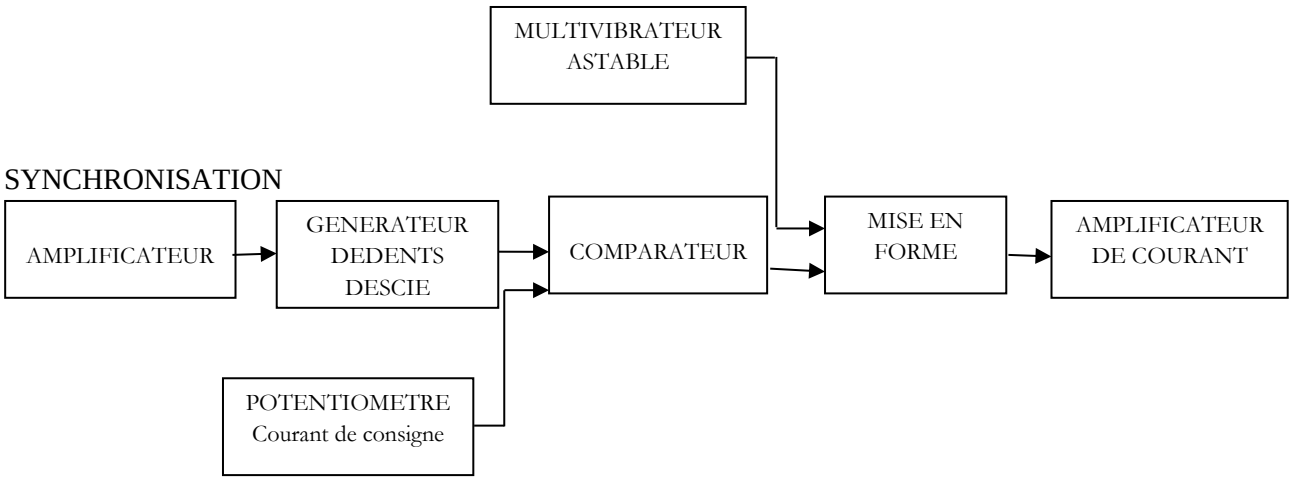


Figure 26:Schémas synoptique de la commande

IV.6.4.1 Générateur de dents de scie

Elle est réalisée par deux transistors T_1 et T_2 (type 2N1711) et un amplificateur opérationnel (µA741) Le signal de sortie du pont redresseur attaque le transistor T_1 à la base, celui- ci sera saturé pour une tension supérieure à 0.7V. Le collecteur de T_1 attaque la base du deuxième transistor T_2 de même type, les deux transistors travaillent en commutation, quand T_1 est bloqué, T_2 sera saturé et vice - versa.
Le signal obtenu à la sortie de T_2, sera donc rectangulaire. A l'aide d'un amplificateur opérationnel. Le signal continu d'entrée est intégré, on obtient un signal sous forme de dent de scie.

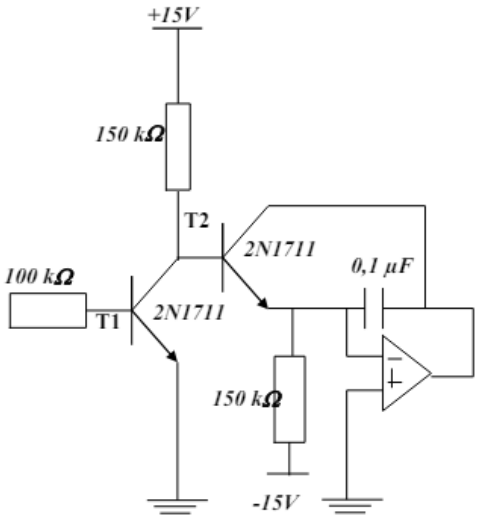


Figure 27: schéma de générateur de dent de scie

IV.6.4.2 La mise en forme

C'est le produit du créneau obtenu à la sortie du comparateur par le signal délivré par le multivibrateur l'aide d'une fonction AND .réalisée par des diodes montées en parallèle et une résistance ; la sortie étant à la masse .quand l'une des diodes conduit, elle est au potentiel +15V.quand les 2 diodes sont bloquées, par des signaux d'entrée d'amplitude +15V .on obtient à la sortie le signal de l'astable modulé par le créneau

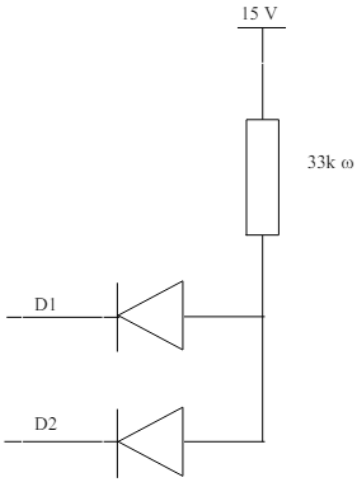


Figure 28: Circuit de la mise en forme

IV.6.4.3 Amplificateur de courant

L'impulsion délivrée par le comparateur a une amplitude en tension suffisante, mais sa puissance est faible, car l'amplificateur opérationnel (µA741), ne peut délivrer un grand courant suffisant pour amorcer le thyristor, d'où la nécessité d'amplifier ce courant. Les éléments de base de notre étage amplificateur sont :

- deux transistors de type 2N2219 de jonction (NPN).
- deux transistors de type 2N2905 de jonction (PNP).

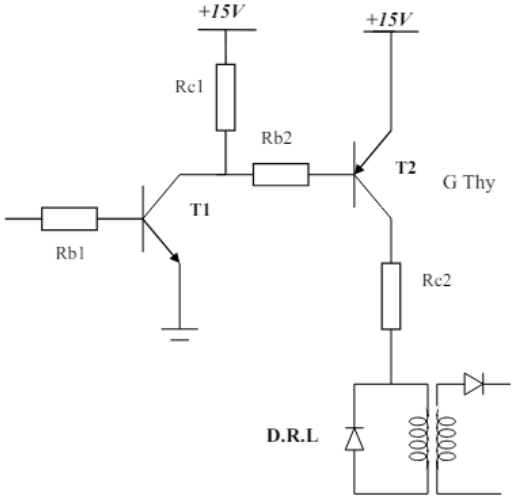


Figure 29: Schéma de l'amplificateur de courant d'amorçage de thyristor

IV.6.4.4 Transformateur d'impulsion

C'est un tore de ferrites, dont l'encombrement est de l'ordre de cm3, et qui porte deux (02) enroulements de nombre de spires voisins.

Son utilisation dans les déclencheurs de thyristors est justifiée par l'isolement galvanique qu'il procure en sortie du déclencheur et par sa capacité à transmettre des impulsions rectangulaires de hauteur et de durée suffisante pour produire un amorçage faible.

IV.6.4.5 Diode de roue libre

Elle est installée en parallèle inverse sur la charge, de nature inductive, elle a le double rôle :

- d'imposer un signe constant à la tension, quand la diode D0 est bloquée, V(t) >0, la charge est alimentée par la source et les redresseurs ;
- Quand D0 est passante, V(t) = 0 (on néglige sa tension de seuil), le courant dans la charge se boucle par la diode. La charge est autoalimentée au dépend de son énergie électromagnétique.

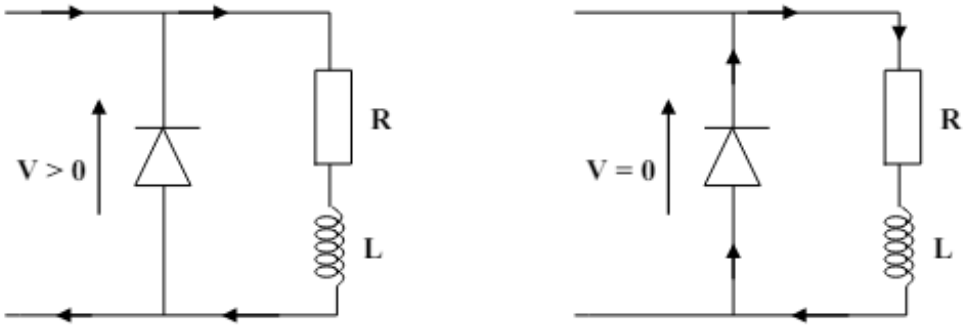


Figure 30: La diode de roue libre.

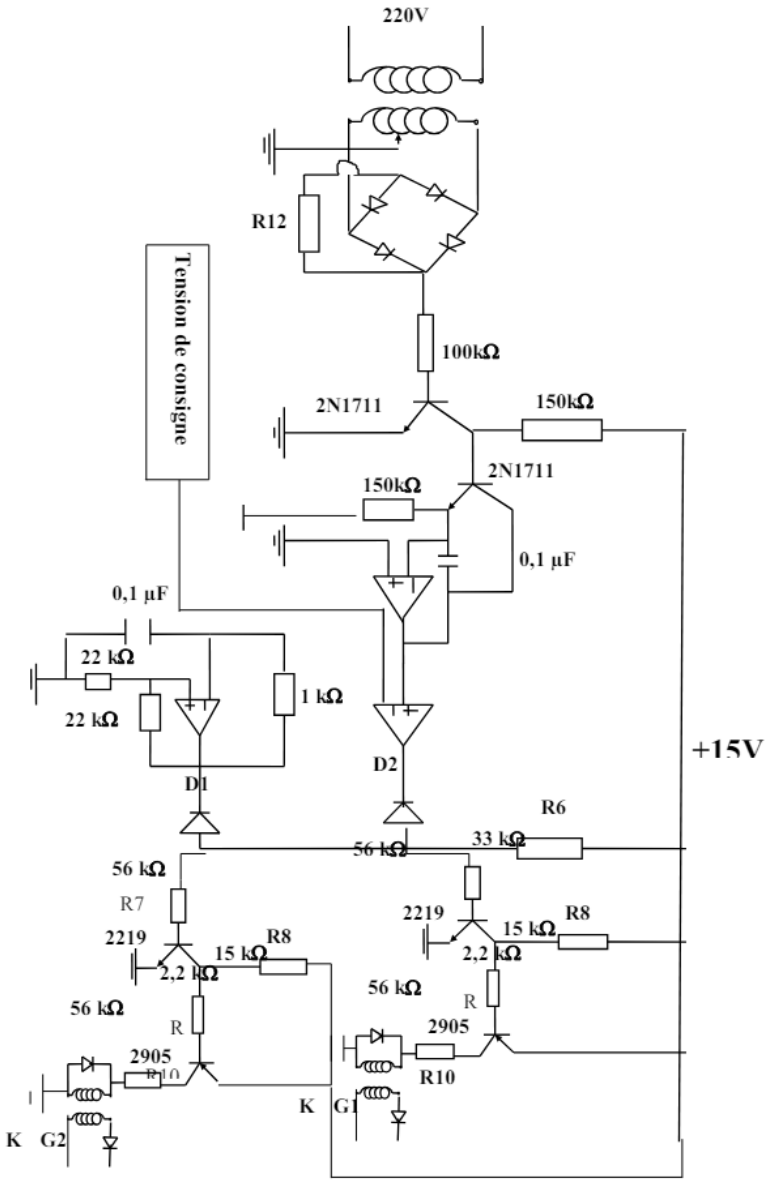


Figure 31: Circuit de commande

IV.7 Déversoir anodique

Les déversoirs anodiques (vertical ou horizontal) seront composés d'anodes baignant dans une matrice faitede poussière de coke. Les anodes seront installées à la profondeur appropriée suite à la connaissance duprofil du sol et ce, en nombre et en positionoptimisée. La position des déversoirs anodiques sera réalisée deconcert avec lesgénérateurs de courant continu. Le besoin exact en termes de quantité d'anodes pardéversoir et la taille des générateurs de courant continu sera calculé et défini lors de l'ingénierie de détail.

IV.8 Anode à courant imposé

Selon les cas, cette anode peut être constituée de matériau consommable (acier de rebut), semi-inerte (ferro-silicium, graphite, magnétite, oxyde de plomb) ou inerte (titane platiné, niobium platiné, tantale platin; titane recouvert d'oxydes mixtes "Ti/MMO", polymères conducteurs).

IV.9 Mode d'installation

Une fois la pose des anodes terminée, La sortie positive du poste de protection cathodique sera connectée aux chapelets d'anodes par l'intermédiaire d'un coffret d'alimentation anodique BJP. La sortie négative duposte de protection cathodique sera connectée au pipeline via un coffret de soutirage de courant BJN.

Chaque boitier de contrôle positif BJP et négatif BJN seront dotés de shunts et de résistances, dans chaque circuit, afin de mesurer et de contrôler le potentiel et l'intensité du courant injecté.

IV.10 Electrode de référence Fixe

Des électrodes de référence permanentes fixe ERF seront installées à des emplacements choisis, environ300mm de la conduite. Les électrodes de référence seront du type cuivre / sulfate de cuivre (Cu/CuSO4) etseront connectées directement au poste de protection cathodique afin de contrôler le niveau de protectioncathodique.

IV.11 Configuration du système de la protection

Le raccordement de 14 puits de gaz brut vers l'usine existante de Hamra

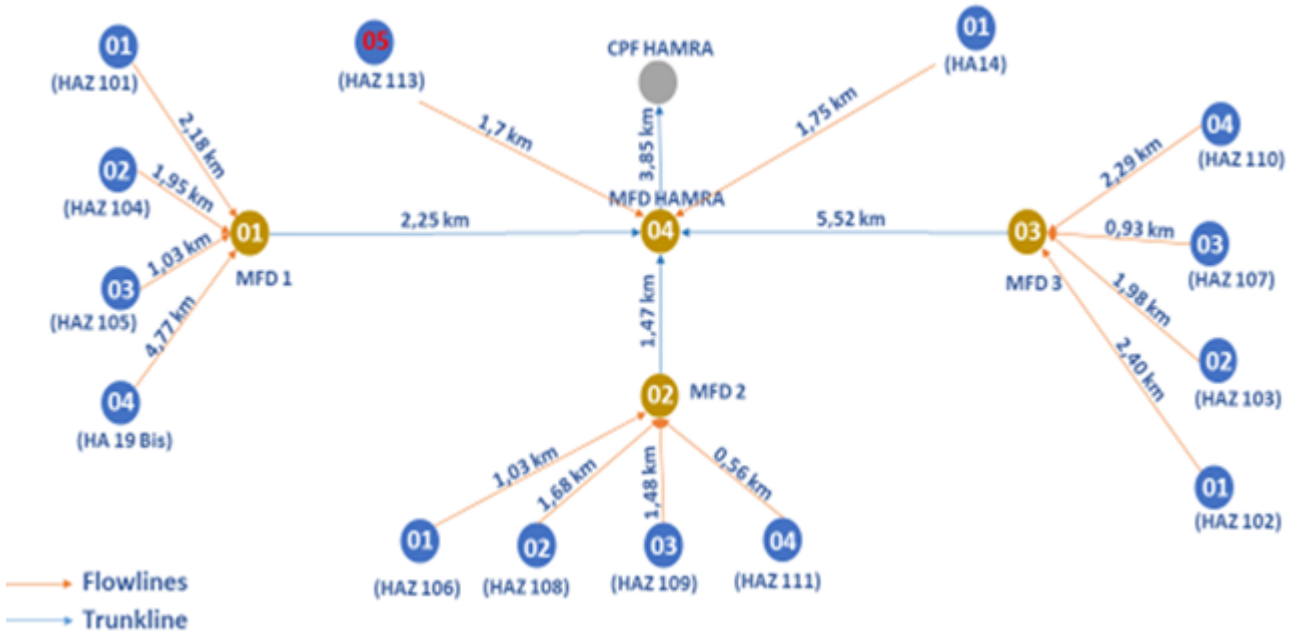


Figure 32: Configuration générale du projet

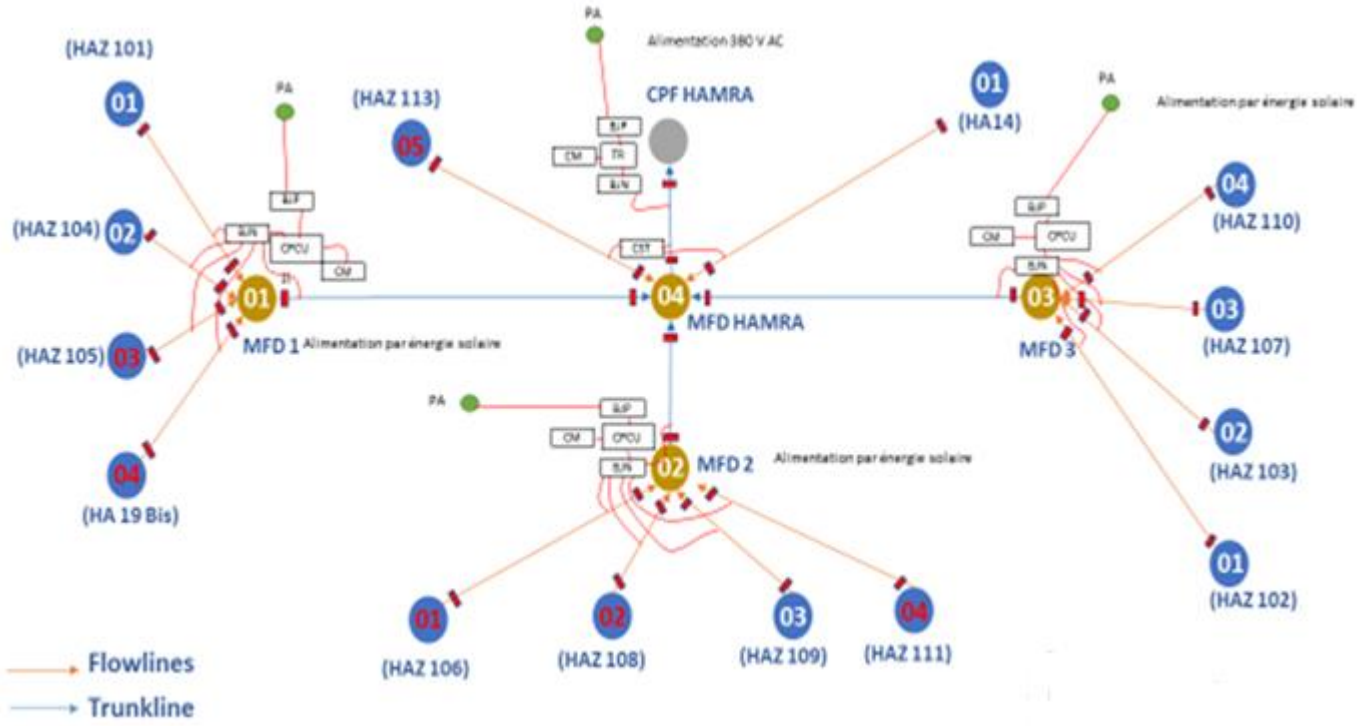


Figure 33: Configuration du système de la protection cathodique définitif (schéma illustratif et non contractuel)

IV.12 Dimensionnement du système de la protection cathodique

IV.12.1 Collecte de données

Conditions préalables à l'application de la protection cathodique ;
-Données de base pour l'étude (rapport géophysique) ;
-Préalables à l'étude (caractéristique de la structure à protéger) ;
-Disponibilité d'une source d'électricité basse tension ;
-Niveau de courant de protection nécessaire ;
-Résistivité de sol la plus faible possible dans la zone du déversoir ;
-Impact minimal sur les ouvrages tiers ;
-Facilité d'accès aux installations ;
-Distance entre déversoirs et installations étrangères, qui doivent être suffisante pour minimiser les interférences ;
-Distance minimale à respecter entre déversoirs et structure à protéger ;
-Zonesà risque.

IV.12.2 Etude

La note de calcul comprendra d'une manière générale le détail qui porte sur l'étude détaillée avec émission des spécifications, des plans d'implantations et schémas types de montage et raccordement.

Dans cette partie, l'étude apportera les explications sur l'approche de la conception du système de protection cathodique envisagé ainsi que sur les choix qui seront opérés tels que :

- La taille et le nombre de générateurs de courant ;

- Le choix des sites d'implantation des déversoirs ;
- Le choix du type de déversoir anodique à installer au niveau des sites choisis ;
- Le choix des anodes ;
- Les critères de conception et l'étude générale des systèmes de protection cathodique définitifs des ouvrages complexes seront influencés par des conditions particulières indispensables à considérer, soit :
- L'agencement général de tous les éléments des ouvrages complexes (plans de tuyauterie) ;
- La résistivité du sol ;
- Les risques d'interférence par des systèmes de protection cathodique installés sur des canalisations avoisinantes, des lignes électriques ou par toutes autres sources de courants pouvant interférer avec le système de protection cathodique ;
- L'isolation électrique des éléments des ouvrages complexes avec les éléments extérieurs ;
- La présence d'un lien électrique avec la mise à la terre ;

IV.12.3 Design de détail

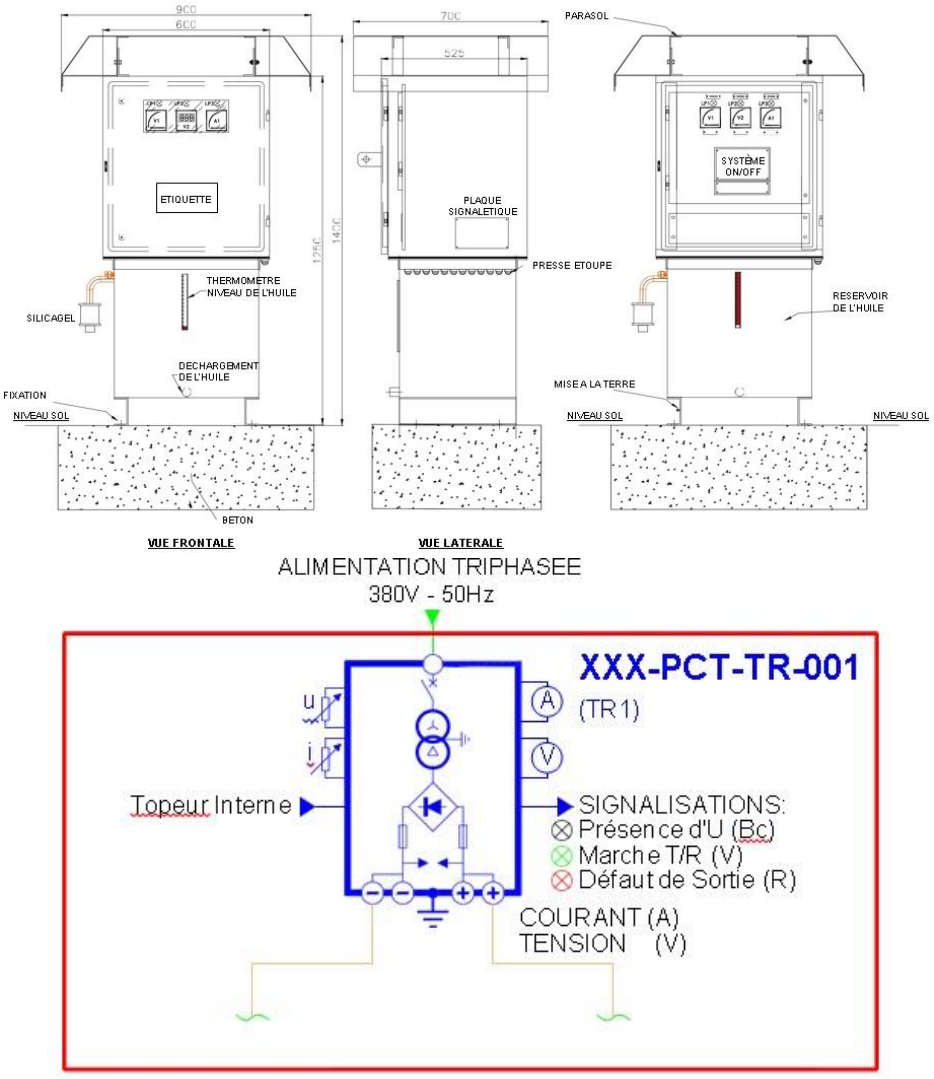
Cette partie traite l'étude détaillée du système de protection cathodique. Elle comportera une note de calcul ainsi que des spécifications et des plans dont nous citerons :

- Calcul et dimensionnement du système de protection cathodique ;
- Spécification du matériel et équipements de la protection cathodique ;
- Procédure pour l'installation du système de protection cathodique ;
- Spécification pour les essais, pré démarrage et mise en service ;
- Diagrammes schématiques des systèmes de la protection cathodique ;
- Plans d'implantation des équipements de la protection cathodique ;
- Plans de cheminement des câbles de la protection cathodique

IV.13 Equipements du système de la protection cathodique

IV.13.1 Transformateur redresseur

Le transformateur redresseur est un générateur de courant continu, il est destiné pour les régions oùl'énergie électrique BT est disponible. Il est composé essentiellement de :



IV.13.1.1 Générale

Lieud'installation : Extérieur
Protection solaire : Parasoleil
Dimensions extérieurs : W×L×H (1)
Service : En continu
Indice de protection : IP65
Tenue aux impacts mécaniques IK10

IV.13.1.2 Conditions électriques

Tensiond'alimentation Triphasé 380 VAC
La variation admise de tension +/-5%
Fréquence 50Hz+/- 2%
Equipement d'alimentation Sectionneur fusibles

IV.13.1.3 Condition d'exploitation

Températuremaximale ambiante +55°C
Températureminimale ambiante -10°C
Tauxd'humidité 95%

IV.13.1.4 Caractéristiques de sortie

Intensitémaximale 100A.
Tensionmaximale 100V.
Protection Eclateurentrelesbornesdela sortie
DCRIPPLE <5%(de5%à100%delasortie DC)

IV.13.1.5 Compartiment contrôle

Refroidissement Parventilationpourlecircuitdecommande(filtrage,cartesélectroniques,...etc.)
Appareilsdemesure

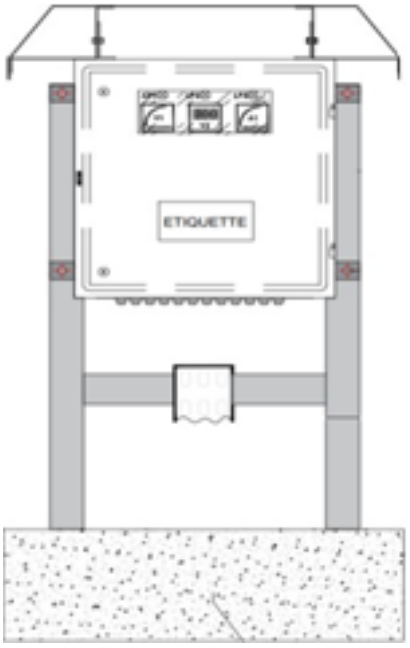
Voltmètre	Analogique	Tension d'entrée (avec bornes de mesures et sélectionneur de phase)
Voltmètre	Analogique	Tension de sortie (avec bornes de mesures)
Ampèremètre	Analogique	Courant de sortie (avec bornes de mesures)
Millivoltmètre	Analogique	Potentiel de l'électrode de référence (avec bornes de mesures) Echelle : de +2V à -3V

Interrupteur

Relais cyclique ON/OFFMunideGPS

- Cycle de coupure[ON] Réglablede1à1000secondes au pas de 0.1 sec.
- Cycle de coupure[OFF] Réglablede1à1000secondesau pas de 0.1 sec.

IV.13.2 Unité de contrôle de la protection cathodique (CPCU)



Le CPCU est un générateur de courant continu, il est destiné pour les régions où l'énergie électrique n'estpas disponible, dont l'alimentation sera prise en charge par un système à énergie solaire. Il est composé essentiellement de :

- Convertisseur DC/DC ;
- Unité de réglage de la tension de sortie (réglable selon le besoin avec un pas de 0,1 Volt) ;
- Appareils de mesure : Ampèremètre - voltmetre ;
- Protection contre les surtensions, les surintensités ;
- atterie en Nickel-Cadmium ;
- Panneau solaire ;
- Shelter

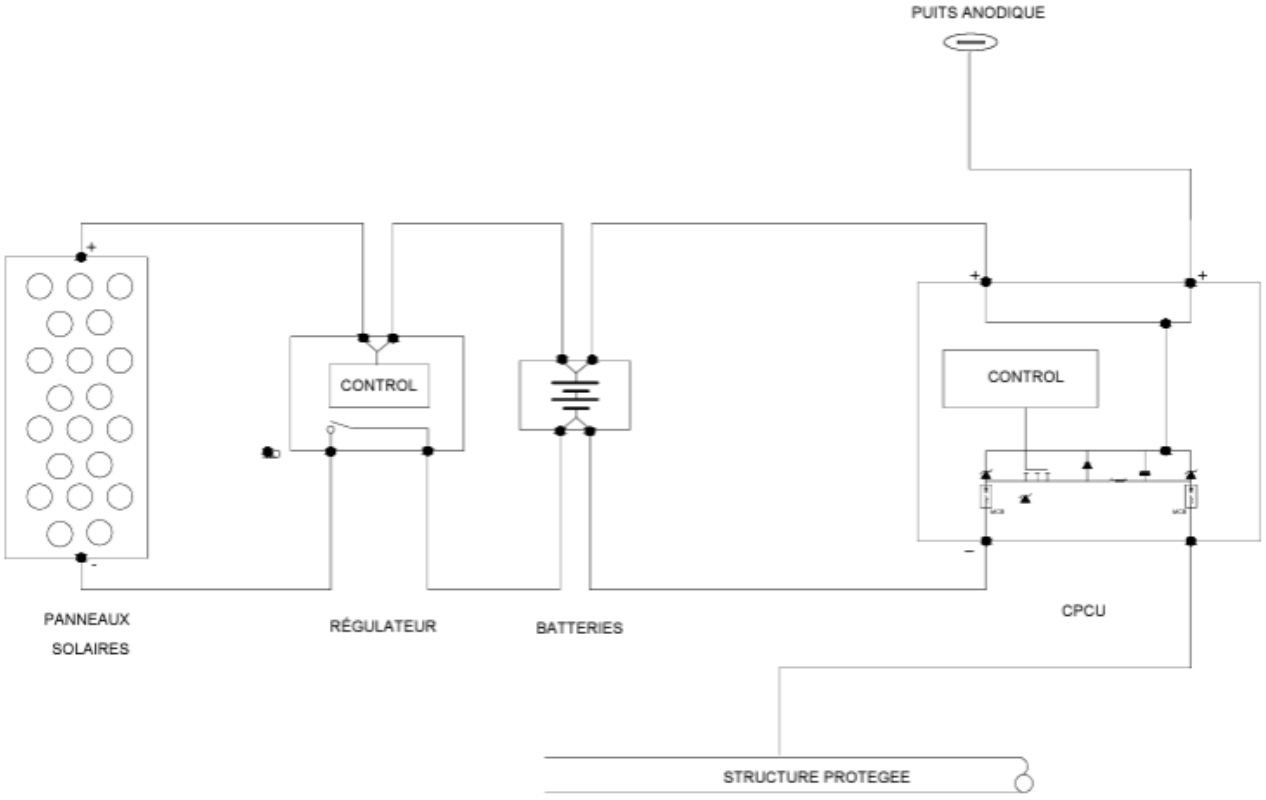


Figure 34: Schéma CPCU

IV.13.2.1 Générale

Lieu d'installation : Extérieur
Protection solaire : Parasoleil
Dimensions extérieurs : W × L × H
Service : En continu

Indice de protection : IP65
Tenue aux impacts mécaniques IK10

IV.13.2.2 Conditions électriques

Tension d'alimentation 48V DC
La variation admise de tension +/-5%
Equipement d'alimentation Disjoncteur

IV.13.2.3 Condition d'exploitation

Température maximale ambiante +80°C
Température minimale ambiante -15°C
Taux d'humidité 95%

IV.13.2.4 Caractéristiques de sortie

Intensité maximale 20A.
Tension maximale 48V.
Protection Eclateur entre les bornes de la sortie

IV.13.2.5 Réglage

Tension de sortie Ajustable par potentiomètre
Courant de sortie variable
Echelle de0à100%.
Refroidissement à Air
Appareils de mesure

Voltmètre	Analogique	Tension d'entrée (avec bornes de mesures et sélectionneur de phase)
Voltmètre	Analogique	Tension de sortie (avec bornes de mesures)
Ampèremètre	Analogique	Courant de sortie (avec bornes de mesures)
Millivoltmètre	Analogique	Potentiel de l'électrode de référence (avec bornes de mesures) Echelle : de +2Và-3V

IV.13.2.6 Interrupteur

Relais cyclique ON/OFF Muni de GPS

- Cycle de coupure [ON] Réglable de 1 à 1000 secondes au pas de 0.1 sec.
- Cycle de coupure [OFF] Réglable de 1 à 1000 secondes au pas de 0.1 sec.

IV.13.3 Anodes tubulaires en Ti/MMO (Titanium / mixed Metal Oxide anodes)

Ce type d'anode comprend un substrat tubulaire, généralement en titane, avec un revêtement en oxyde demétal mélangé (MMO), qui permet au composite de fonctionner comme une anode.

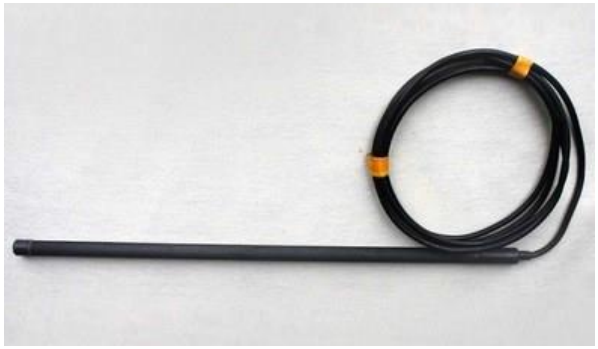


Figure 35: image illustrative Anode Tubulaire Mixed Métal Oxyde (MMO)

IV.13.3.1 Générale

Application Anode à courant imposé
Lieu d'installation Sol / Sable / Eau

IV.13.3.2 Anode

Type de matériau Oxydes de Métal Mixte - MMO
Type d'anode Tubulaire
Substrat Titanium ASTM-B-338 grade 1 ou équivalent

IV.13.3.3 Dimension

- Longueur : 1000 mm
- Largeur : 25 mm

Connexion câble/anode 10 % de l'anode au centre
Sortie de Courant par mètre carré 50A/m²
Taux de consommation1mg/A-an
poids (Kg) 0,35 kg

IV.13.3.4 Câble

TypeU1000 RO2V XLPE/PVC
Section 1x16 mm²
Langueur120ml

IV.13.4 Anodes de magnésium

Les anodes en magnésium pour la protection cathodique temporaire des tuyauteries seront de type standardet pré-emballé dans un sac en coton contenant un remblai retenant l'humidité. Chaque anode sera connectée à un câbleélectrique de section 1x16mm², double isolation de type XLPE/PVC.
Les anodes en magnésium sont constituées principalement de Mg à 99% et des faibles teneurs en Cu, Al, Si, Fe, Mn, Zn.

IV.13.5 Coke de pétrole calcine (poussier de coke)

Le poussier de coke est utilisé comme mélangerégulateur afin d'avoir un milieu conducteur autour desanodes pour assurer une bonne diffusion de courant dans le sol pour améliorer le rendement des déversoirsanodique en diminuant considérablement la résistivité de sol.
La poussière de coke est obtenue à partir du coke de pétrole calciné, et constitué essentiellement de charbon à 85%, et de faibles teneurs en fer, silicium et le soufre.

Figure 36:Poussier De Coke

IV.13.5.1 Général

Application Diminue la résistance
Lieu d'installation Déversoir Anodique

IV.13.5.2 Poussier

Charbon 85 % (min)
Teneur minimum en charbon 90 %
Teneur maximum en humidité ≤16.5 %
Teneur en chaux éteinte 10%
Densité (kg/dm3) 0.9 a 1.1
Charbon 90 %

IV.13.5.3 Dimensions granulométriques

Pourcentage passant à travers :
Une Ouverture De 16 mm100 % (en poids)
Une Ouverture De 8 mm 90 % (en poids)
Une Ouverture De 1 mm 70 % (en poids)

IV.13.6 Boites de contrôle et de test

Les prises de potentiel et les boites de jonction négatives et positives seront fabriquées en matériaux résistants aux intempéries et scellées contre la pénétration de poussière et d'humidité.

IV.13.6.1 Boite de jonction négative (BJN)

Le coffret de soutirage de courant est utilisé pour assurer la liaison entre les structures (conduites) à protéger et le pôle négatif du générateur de courant continu. Et sera équipé de shunt et de résistance variable afin de pouvoir contrôler les paramètres de courant et de tension au point d'injection.

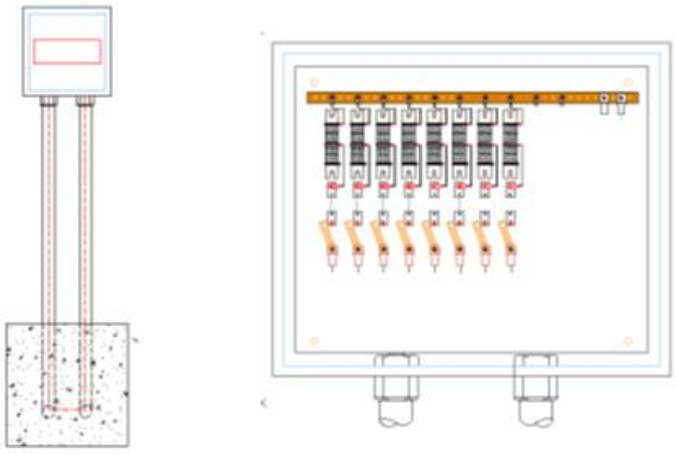


Figure 37: image illustrative Boite De Jonction Négative (BJN) Ou Négative Jonction box (NJB)

IV.13.6.2 General

Application	Jonction cathodique**«-»**
Lieu d'installation	Extérieur
Indice de protection	IP55
Tenue aux impacts mécaniques	IK10

IV.13.6.3 Coffret

Type de matériau Acier revêtu d'époxy RAL 7033
Dimensions

- **Longueur** L mm
- **Largeur** W mm
- **Epaisseur** H mm

Ouverture Porte
Verrouillage par clé

Équipement	Type	Quantité
Plaque isolante	Bakélite	01
Résistance Variable	20 Ω / 100 W	08
Shunt ampérométrique	10 A / 100 mV	08
Barrettes de liaison de sectionnement	cuivre	08
Barrette de distribution	cuivre	01
Cosses tubulaires	50 mm²	02
	35 mm²	08

IV.13.6.4 Support

- 02 Tubes en acier galvanisé Ø 2'' L=2m, coudés à 120°
- 02 Raccords filtré Ø 2''
- Le support sera installé dans le sol et sera ancré dans un massif en béton

IV.13.6.5 Boite jonction positif (BJP)

Le coffret d'alimentation anodique sera installé au niveau de chaque poste de protection, il est utilisé pour raccorder les câbles de liaison des anodes à la borne positive du générateur de courant continu. Et sera équipé de shunt et de résistance variable pour permettre de réaliser des mesures de courant afin d'effectuerune bonne répartition du courant pour l'ensemble des anodes.

IV.13.6.6 General

Application Jonction cathodique **«+»**
Lieu d'installation Extérieur
Indice de protection IP55
Tenue aux impacts mécaniques IK10

IV.13.6.7 Coffret

Type de matériau Acier revêtu d'époxy RAL 7033
Dimensions

- **Longueur** L mm
- **Largeur** W mm
- **Epaisseur** H mm

OuverturePorte
Verrouillage par clé

Équipement	Type	Quantité
Plaque isolante	Bakélite	01
Résistance Variable	20 Ω / 100 W	10

Shunt ampérométrique	10 A / 100 mV	10
Barrettes de liaison de sectionnement	cuivre	10
Barrette de distribution	cuivre	01
Cosses tubulaires	50 mm²	02
	16 mm²	10

IV.13.6.8 Support

- 02 Tubes en acier galvanisé Ø 2'' L=2m, coudés à 120°
- 02 Raccords filtré Ø 2''
- Le support sera installé dans le sol et sera ancré dans un massif en béton

IV.13.7 Cellule de polarisation PCR

Les cellules de polarisation sont utilisées pour isoler les structures protégées et le système de mise à la terre. Elles seront aussi utilisées au niveau des croisements avec les lignes électriques à haute tension.

IV.13.8 Prises de potentiel simple (PPS)

Les prises de potentiel simple PPS seront installées tout le long de la ligne à une distance ne dépassant pas 2 km entre prise. Elle permet de mesurer le potentiel de la canalisation. Elles sont équipées de cosses pour recevoir des câbles électriques venant de la canalisation.

IV.13.9 Coffret de mesure (C.M)

Le coffret de mesure CM sera installé au niveau de chaque BVS et poste de protection recevant des câbles provenant des électrodes de références, coupons et mesure négative, il est utilisé pour mesurer le potentiel de la structure ainsi que les test ON/OFF au niveau des coupons de corrosion, et sera équipé de points de mesure ''jack femelle'' pouvant recevoir les fiche jack male de multimètre.

IV.13.10 Prises de potentiel tube - gaine (PTG)

La prise de potentiel PTG sera installée au niveau des croisements de route. Elle permet de mesurer le potentiel de la conduite et celui de la gaine au même temps. Et savoir s'il n'y a pas de contact direct entre le pipe et la gaine. Elle équipée de cosses pour recevoir des câbles électriques venant de la canalisation.

IV.13.11 Prises Ampérométrique (PMA)

La prise de mesure Ampérométrique (PMA) sera installée tout le long de la ligne à chaque 8km et à 250m en amont et en aval du point de soutirage, elle permet d'évaluer l'état de revêtement du pipe et la direction du courant injecté par les générateurs de courant continu et de mesurer le potentiel de la canalisation. Elle est équipée de cosses pour recevoir des câbles électriques venant de la canalisation.

IV.13.12 Prises de croisement de tube étranger (PCTE)

La prise PCTE sera installée au niveau des croisements et parallélisme du pipe à protéger avec d'autres ouvrages existants. Elle permet de réguler la différence de potentiels afin d'éviter la création

de pile électrochimique (anode/cathode) entre ces ouvrages métalliques, à l'aide des résistances variables.

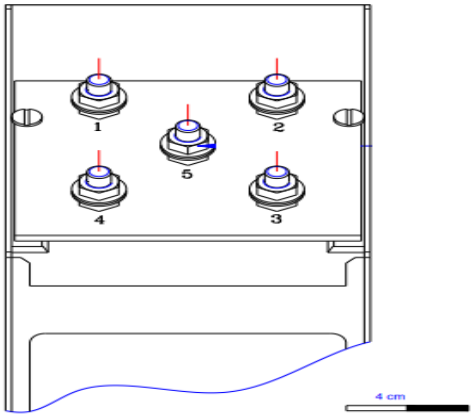


Figure 38: image illustrative Prise de Potentiel PPS-PTG-PJI-CM

IV.13.12.1 Generale

ApplicationMesure de potentiel
Lieu d'installation Extérieur
Indice de protectionIP54

IV.13.12.2 Prise

Type de matériau Acier revêtu d'époxy RAL 7033

Dimensions

- Langueur 2000 mm
- Largeur 120 mm
- Épaisseur 120 mm

Couvercleamovible
Verrouillage par clé allen (1)

IV.13.12.3 Terminaux

Équipement	**Type**	**Quantité**
Plaque isolante	Bakélite	01
Boulon	M8 en laiton	05
Cosses tubulaires	16 mm²	05

IV.13.12.4 Support

- Le support sera installé dans le sol et sera ancré dans un massif en béton

IV.13.13 Joint isolant

Dans la plupart des cas, sauf s'il s'agit d'une protection globale, il est nécessaire d'isoler les réseaux àprotéger des ouvrages auxquels où ils sont raccordés, car ils sont susceptibles de créer des mises à la terre.
C'est essentiellement le cas en particulier pour notre ouvrage, et en général les branchements particuliersmétalliques non intégrés à la protection cathodique et les raccordements avec d'autres réseaux.
Deux types de joint isolant sont généralement utilisés :

IV.13.13.1 Monobloc

Seront installés au niveau des puits et des manifolds, pour isoler électriquement l'ouvrage à protéger et lapartie aérienne qui constitue l'ouvrage concentré ou des sites extérieurs.
Le joint monobloc est constitué de :
- Pièces en aciertrempé (hub) soudées à chacune des manchettes avec un matériel compatible à celuidu gazoduc.
- Matériaux d'isolation (insulating ring) et résine d'isolation (insulatingépoxy) pour remplissage detoutes les cavités afin d'assurer une barrière électrique supplémentaire.
- Enveloppe (retainerflange) pour la connexion des deux manchettes.
- Double set de joints circulaires (O-ring seals) pour contenir la pression interne du gazoduc.

IV.13.13.2 Kits isolants à bride

Les kits isolants à bride peuvent également être utilisees au niveau des puits et des manifolds, pour isoler leslignes enterrées et les ouvrages concentrés, auxquels ils sont raccordés, car la partie aérienne est reliéedirectement au réseau de mise à la terre, qui est susceptible de créer des insuffisances pour les systèmes dela protection cathodique.
Le kit comprendra un joint isolant, des manchons isolants et des rondelles (jeu de deux rondelles), un goujonen acier, des écrous et des rondelles.
Note : Tous les matériaux seront adaptés à la température de service et à la pression spécifiée, ainsi qu'àune installation en extérieur dans les conditions environnementales du projet.
La résistance électrique des joints isolants devra être au minimum égale à 25 MΩ pour une tension continuede 1000 V. La fuite de courant maximale devra être égale à 5 mA pour une tension alternative de 5000 V (50Hz).
Les joints isolants seront conçus, fabriqués et testés conformément aux spécifications du joint isolant duprojet.

IV.13.14 Cellule de polarisation PCR

Le dispositif de remplacement des cellules de polarisation (PCR) est conçu pour assurer simultanément undécouplage du courant continu et la continuité/mise à la terre du courant alternatif, lorsqu''il est utilisé avec des structures avec protection cathodique comme les pipelines, les réservoirs, les systèmes de mise à laterre ou les enveloppes de câbles.

IV.13.15 Eclateur antidéflagrant (spark gap)

Le Spark gap est un dispositif d'isolation de tension continue destiné à être utilisé pour le découplage despièces métalliques placées sous protection cathodique (PC). Le Spark gap convient pour la protection contreles surtensions des joints ou raccords isolants de canalisation ou structure analogue, réservoirs, et à découplage de pièces métalliques de natures différentes qui devraient être connectées pour des raisons desécurité.

IV.13.15.1 General

ApplicationProtection des joints isolants
Lieu d'installation Extérieur Sur joint isolant
Indice de protectionIP65
Tenue aux impacts mécaniquesIK10

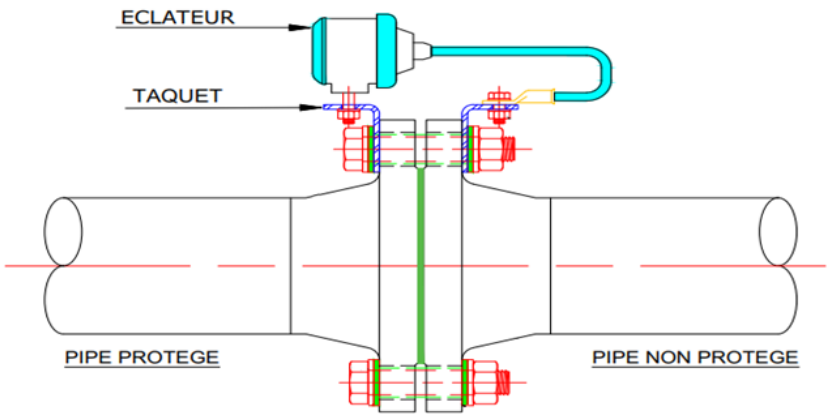


Figure 39: image illustrative de éclateur anti déflagrant (Spark gap)

IV.13.15.2 Parasurtenseur

Matériau du corps Zinc moulé sous pression, plastique
Dimensions

- Langueur L mm
- Largeur W mm
- Epaisseur H mm

Tension d'amorçage (50Hz) < 1.2 KV
Tension d'amorçage aux impulsions 2.2 KV
Courant de décharge 8/20 µs 100 KA
Homologation selon directives ATEX 94/9 / CE et IEC Ex
Classe (capacité de transport de courant de foudre) N
Température opératoire -20°C à +80 °C

IV.13.15.3 Câble

Type H01N2-D
Section 1x25 mm²

Longueur 200 mm

IV.13.15.4 Support

- Supports d'éloignement ou équerres en acier galvanisé fixées sur un goujon métallique de la bride

IV.13.16 Electrodes de référence

L'électrode de référence cuivre-sulfate de cuivre (Cu/CuSO4) est constituée par un fil ou un barreau de cuivre plongé dans une solution aqueuse de sulfate de cuivre saturée. Le potentiel de cette électrode de référence est, à 25°C, égal a+316 mV par rapport à l'électrode normale à hydrogène (ENH). Comme toutes les électrodes de référence, la jonction électrolytique avec le milieu aqueux est réalisée au moyen d'une paroi poreuse (fritté).
Deux types d'électrode de références en Cu/CuSO4 seront utilisés :
- Electrodes de référence fixe : seront enterrées aux points d'injections de courant à proximité de la structure, leur situation par rapport à la tuyauterie sera à 30 cm, au maximum, de la génératrice latérale.
- Electrodes de référence portable : seront utilisé par le superviseur afin d'obtenir des mesures de potentiel précises sur toute la ligne enfouie.

Figure 40:Electrodes de Référence portable en Cu/CuSO4

IV.13.16.1 Generale

Application Contrôle du Potentiel dans différents points

IV.13.16.2 Electrodes

Matériau Cuivre / sulfate de cuivre (Cu/CuSO4)
Dimensions
- **Langueur** L mm
- **Diamètre** W mm

Enveloppe Extérieure
- Tube en UPVC
- Partiellement transparent avec fenêtre de vérification du niveau de l'électrolyte

Matière de la tige	Cuivre De Haute Pureté 99,99%
Electrolyte	Solution de sulfate de cuivre, gélifiée et saturée
Précision	± 5mV
Contact avec le sol	Membrane échangeuse d'ions
Borne de mesure	Fiches femelles afin de mesurer le potentiel avec une appareil portable

IV.13.17 Cable

Le choix du type de câble se ramène essentiellement au calcul de la section et au choix du degré d'isolation en fonction des conditions d'utilisation telles que :

- L'intensité du courant transporté
- La longueur de la liaison (chute de tension)
- La temperature d'utilisation (échauffement de l'âme)
- La nature de la pose

Tous les câbles pour les circuits anodiques, cathodiques et de contrôle auront les caractéristiques suivantes :

- Conducteur en cuivre de type multibrins rigides avec isolement en PE et d'un revêtement extérieur en PVC, tandis que les câbles qui seront en contact avec l'eau seront de type PVC/XLPE une tension de test nominale 1000V. (Type U1000R02V).
- La section des câbles va être déterminée selon le type de prise dans lequel sera utilisé.
- La liste et la spécification du matériel et équipements de la protection cathodique dépendent essentiellement de diagnostic et de l'ingénierie de détail.

Figure 41:Câble de la Protection Cathodique

IV.13.17.1 General

Application Connexion entre les différents Equipements

Lieu d'installation

- Enterrés
- Dans chemin de câble

IV.13.17.2 Câble

Type de conducteur multibrins torsadé

Type de matériau Cuivre
Tension nominale 600/1000V
Caractéristiques Spéciaux

- Câble simple non propagateur de flamme
- Basse émission de gaz corrosif (<=0,3% HCI)
- Basse émission de gaz toxiques (index T<=2)
- Basse émission de fumée (Densité Optique D <=1,5)

Section du câble (mm²)	10	16	25	35	50
Nombre de Conducteurs	1	1	1	1	1
Diamètre Nominal (mm)	9	9,5	10,4	12	13.6
Résistance du Conducteur (Ω/Km)	1,83	1,15	0,727	0,524	0,387
Poids Approximatif (Kg\Km)	155	215	304	415	525
Type d'Isolation (ASTM D1248)	-XLPE / PVC	-XLPE / PVC	-XLPE / PVC	-XLPE / PVC	-XLPE /PVC

IV.14 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les équipements choisis pour la protection cathodique par courant imposé. On peut lister essentiellement : le générateur de courant qui peut être alimenté soit par une source sous-tirée de réseau nationale ou des panneaux photovoltaïque, les anodes, poussier de coke, les coffres de mesures, électrode de référence et les câbles électriques

Chapitre 4

V. Partie calcul

V.1 Introduction

V.2 Modelé de calcul du dimensionnement du système de protection cathodique :

Les étapes de calculs :

V.2.1 Résistance longitudinale de lapipe :

$$R_L = \frac{\rho_a}{\pi(D_{ext}-\delta)\delta} \quad (11)$$

ρa = Résistivité de l'acier = 1.8*10⁻7 Ω.m
Dext = Diamètre extérieur du pipeline, (m)
δ = Epaisseur moyen de la conduite, (m).

V.2.2 La résistance d'isolement à la fin de la durée d'exploitation(t)

$$R_{it} = \frac{R_i}{\beta \times t} \times \left(1 - e^{(-\beta \times t)}\right) \quad (11)$$

Ri = Résistance d'isolement initiale pour un revêtement neuf (Ω.m2).
β = Coefficient tenant compte du vieillissement du revêtement : 0,124 (1/an).
t = Durée d'exploitation (ans).

V.2.3 Résistance transversale du revêtement

$$R_T = \frac{R_{it}}{D \times \pi} \quad (11)$$

Rit = résistance d'isolement après vieillissement
D = diamètre du pipe

V.2.4 Résistance caractéristique du pipe

$$R_C = \sqrt{R_L \times R_T} \quad (11)$$

RT = Résistance transversale du revêtement

RL = Résistance longitudinale

V.2.5 Facteur d'atténuation

$$a = \sqrt{\frac{R_L}{R_T}} \quad (11)$$

RT = Résistance transversale du revêtement
RL = Résistance longitudinale

V.2.6 Abaissement de potentiel max. permis

$$dEo = E_{max} - E_n \quad (11)$$

V.2.7 Abaissement de potentiel à minimum

$$dEt = E_{min} - E_n \quad (11)$$

V.2.8 Atténuation le long du pipe

$$dEt = \frac{dE_0}{cosh(a.L)} \quad (11)$$

dEo = Abaissement de potentiel au point de soutirage
dEt = Abaissement de potentiel à une distance maximale
E_{min} = Potentiel naturel : -500 mV
E_{max} = Potentiel de protection au point de soutirage
dEt = Potentiel de protection a une distance maximale
a = Constante d'atténuation
L = Longueur du bras du

V.2.9 Surface à protéger

$$S = \pi \times D \times L \quad (11)$$

D = diamètre du pipeline en m.
L = longueur du pipeline en m.

V.2.10 Densité de courant

$$i = i_0 + \frac{25}{100} \times \frac{(T-30)}{10} \times i_0 \quad (11)$$

i_0 = densité de courant en mA/m² à 30°C et t=30 ans = 0.4 mA/m²
T = température opératoire du pipeline

V.2.11 Courant total calculé

$$I_T = \frac{i \times S}{1000} \quad (11)$$

i = densité de courant en mA/m² à la température opératoire maximale (75 °C)
S = surface à protéger en m²

V.2.12 Courant minimal

$$I_m = I_T + 30\% \quad (11)$$

I_T = courant total requis

V.2.13 Nombre d'anode calculé

$$N = \frac{I_m}{I_a} \quad (11)$$

I_m = Courant minimal
I_a = Courant débité par anode

V.2.14 Résistance d'une anode verticale (Dwight)

$$R_{VG} = \frac{\rho}{2 \times \pi \times L}\left(Ln\frac{8 \times L}{d} - 1\right) \quad \textbf{(11)}$$

V.2.15 Résistance du déversoir vertical (Dwight)

$$R_{VG} = \frac{\rho}{2 \times \pi \times L_{VG}}\left(Ln\frac{8 \times L_{VG}}{d_{VG}} - 1\right) \quad (11)$$

ρ = résistivité du sol environnant
L = Longueur D'anode
d = diamètre de l'anode
L_{VG} = longueur active du déversoir
d_{VG} = diamètre de la partie active du déversoir
S = espacement entre chaque anode (end to end)

V.2.16 Tension nominale

$$U_n = I_t(R_{GB} + R_{cable}) + FCE \ (11)$$

I_t = courant total requis en Amp

R_{GB}= Résistance du déversoir anodique en (Ω)

R_{Cable}= Résistance totale des câbles en (Ω)

FCE = Force Contre électromotrice (10)

V.3 Les résultats de calcul

Les résultats retrouvées ci-dessous concernent les quatre zones à protéger : la zone 100, 200, 300 et 400

ZONE 100

Symbole	Légende	HAZ 101	HAZ 104	HAZ 105	HA 19 BIS	MFD1
ρa	Résistivité de l'acier	0.00000018	0.00000018	0.00000018	0.00000018	1.8E-07
Dext	Diametre exterieure	0.1683	0.1683	0.1683	0.1683	0.2191
δ	Epaisseur moyen de la conduite	0.01588	0.01588	0.01588	0.01588	0.01427
Ri	Résistance d'isolement initiale pour un revêtement neuf	40000	40000	40000	40000	40000
β	Coefficient tenant compte du vieillissement du revêtement	0.124	0.124	0.124	0.124	0.124
t	Durée d'exploitation	30	30	30	30	30
D	diamètre du pipeline	0.136	0.136	0.136	0.136	0.19056
Emin	Potentiel minimal	-0.85	-0.85	-0.85	-0.85	-0.85
Emax	Potentiel de protection au point de soutirage	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2
En	Potentiel naturel	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
L	Longueur du bras du PPC	28308.80114	28308.8011	28308.8011	28308.8011	28308.801
Lp	longueur du pipeline	2180	1950	1030	4770	2250
io	densité de courant en mA/m² à 30°C et t=30 ans = 0.4 mA/m²	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
T	température opératoire du pipeline	55	55	55	55	55
Ia	Courant débité par anode	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
Rback	RESISTIVITé de backfil	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ρ	résistivité du sol environnant	50	50	50	50	50
La	Longueur D'anode	1	1	1	1	1
d	diamètre de l'anode	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
LVG	longueur active du déversoir	2	2	2	2	2
dVG	diamètre de la partie active du déversoir	0.254	0.254	0.254	0.254	0.254
Sa	espacement entre chaque anode	2	2	2	2	2
RGB	Résistance du déversoir anodique	20	20	20	20	20
Rcable	Résistance totale des câbles	0.0222222	0.02284	0.0223232	0.02152	0.02074
FCE	Force Contre Electromotrice	2	2	2	2	2

Calculs					
Rit	résistance d'isolement après vieillissement	10492,10787	10492,1079	10492,1079	10492,1079
RL	Résistance longitudinale	2,36717E-05	2,3672E-05	2,3672E-05	2,3672E-05
RT	Résistance transversale du revêtement	24556,92399	24556,924	24556,924	24556,924
Rc	Résistance caractéristique du pipe	0,762433678	0,76243368	0,76243368	0,76243368
Rct	Resistance caracteristique des pipes	0,147082541			
dEo	Abaissement de potentiel au point de soutirage	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7
dEt	Abaissement de potentiel à une distance maximale	-0,35	-0,35	-0,35	-0,35
a	Constante d'atténuation	3,10476E-05	3,1048E-05	3,1048E-05	3,1048E-05
dET	Potentiel de protection a une distance maximale	-0,495833333	-0,49583333	-0,49583333	-0,49583333
S	surface à protéger	931,4193899	833,150372	440,074299	2038,01399
St	Surface totale à protéger	**5589,647313**			
i	densité de courant en mA/m² à la température opératoire maximale	0,325	0,325	0,325	0,325
It	courant requis par pipe	0,302711302	0,27077387	0,14302415	0,66235455
IT	courant total requis	**1,816635377**			
Im	Courant minimal par pipe	0,393524692	0,35200603	0,18593139	0,86106091
IM	Courant minimal	**2,36162599**			
Nc	Nombre d'anodes calculée	0,605545126			
On veut avoir la resistance de circuit au voisinage de 2,5 ohm pour assurer une protection optimale					
Ns	Nombre d'anodes calculée	2	2	2	2
Lact	LONGEUR ACTIVE	4	4	4	4
Ra	Résistance d'une anode verticale	0,379450928			
RVG	Résistance du déversoir vertical	7,631791693			
Nnv	nouveau Nombre d'anodes suggeste	**10**			
Lnv	nouvelle partie active	28			
RVGr	nouvelle resistance de deversoir	1,643293847			
R ct	Rcables totale	0,004380897			
R circuit	Résistivité de circuit	2,410108423			
Um	Tension nominal	**7,691774689**			

ZONE 200

Symbole	Légende	HAZ 106	HAZ 108	HAZ 109	HAZ 111	MFD2	Unité
ρa	Résistivité de l'acier	0.00000018	0.00000018	0.00000018	0.00000018	1.8E-07	Ω.m
Dext	Diametre exterieure	0.1683	0.1683	0.1683	0.1683	0.2191	m
δ	Epaisseur moyen de la conduite	0.01588	0.01588	0.01588	0.01588	0.01427	m
Ri	Résistance d'isolement initiale pour un revêtement neuf	40000	40000	40000	40000	40000	Ω.m²
β	Coefficient tenant compte du vieillissement du revêtement	0.124	0.124	0.124	0.124	0.124	
t	Durée d'exploitation	30	30	30	30	30	1/An
D	diamètre du pipeline	0.13654	0.136	0.136	0.136	0.19056	m
Emin	Potentiel minimal	-0.85	-0.85	-0.85	-0.85	-0.85	V
Emax	Potentiel de protection au point de soutirage	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	V
En	Potentiel naturel	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	V
L	Longueur du bras du PPC	28252.76665	28252.7667	28252.7667	28252.7667	28252.767	
Lp	longueur du pipeline	1030	1680	1480	560	1470	m
io	densité de courant en mA/m² à 30°C et t=30 ans = 0.4 mA/m²	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	A/m²
T	température opératoire du pipeline	55	55	55	55	55	°C
Ia	Courant débité par anode	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	A
Rback	RESISTIVITé de backfil	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	Ω
ρ	résistivité du sol environnant	50	50	50	50	50	Ω.m
La	Longueur D'anode	1	1	1	1	1	m
d	diamètre de l'anode	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	m
LVG	longueur active du déversoir	2	2	2	2	2	m
dVG	diamètre de la partie active du déversoir	0.254	0.254	0.254	0.254	0.254	m
Sa	espacement entre chaque anode	2	2	2	2	2	m
RGB	Résistance du déversoir anodique	20	20	20	20	20	Ω
Rcable	Résistance totale des câbles	0.0222222	0.02284	0.0223232	0.02152	0.02074	Ω
FCE	Force Contre Electromotrice	2	2	2	2	2	V

Calculs					
Rit	résistance d'isolement après vieillissement	10492,10787	10492,1079	10492,1079	10492,1079
RL	Résistance longitudinale	2,36717E-05	2,3672E-05	2,3672E-05	2,3672E-05
RT	Résistance transversale du revêtement	24459,80418	24556,924	24556,924	24556,924
Rc	Résistance caractéristique du pipe	0,760924515	0,76092452	0,76243368	0,76243368
Rct	Resistance caracteristique des pipes	0,143726275			
dEo	Abaissement de potentiel au point de soutirage	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7
a	Constante d'atténuation	3,11092E-05	3,1048E-05	3,1048E-05	3,1048E-05
a moyenne		3,15391E-05			
S	surface à protéger	441,8216527	720,641142	634,85053	240,213714
St	Surface totale à protéger	2917,560027			
i	densité de courant en mA/m² à la température opératoire maximale	0,325	0,325	0,325	0,325
It	courant requis par pipe	0,143592037	0,23420837	0,20632642	0,07806946
IT	courant total requis	0,948207009			
Im	Courant minimal par pipe	0,186669648	0,30447088	0,26822435	0,10149029
IM	Courant minimal	1,232669111			
Nc	Nombre d'anodes calculée	0,316069003			
On veut avoir la resistance de circuit au voisinage de 2,5 ohm pour assurer une protection optimale					
Ns	Nombre d'anodes calculée	2	2	2	2
Lact	LONGEUR ACTIVE	4	4	4	4
Ra	Résistance d'une anode verticale	0,379450928			
RVG	Résistance du déversoir vertical	7,631791693			
Nnv	nouveau Nombre d'anodes suggeste	10			
Lnv	nouvelle partie active	28			
RVGr	nouvelle resistance de deversoir	1,643293847			
R ct	Rcables totale	0,004380897			
R circuit	Résistivité de circuit	2,40859926			
Um	Tension nominal	4,969005909			

ZONE 300

Symbole	Légende	HAZ 102	HAZ 103	HAZ 107	HAZ 110	MFD3
ρa	Résistivité de l'acier	0.00000018	0.00000018	0.00000018	0.00000018	1.8E-07
Dext	Diametre exterieure	0.1683	0.1683	0.1683	0.1683	0.2191
δ	Epaisseur moyen de la conduite	0.01588	0.01588	0.01588	0.01588	0.01427
Ri	Résistance d'isolement initiale pour un revêtement neuf	40000	40000	40000	40000	40000
β	Coefficient tenant compte du vieillissement du revêtement	0.124	0.124	0.124	0.124	0.124
t	Durée d'exploitation	30	30	30	30	30
D	diamètre du pipeline	0.136	0.136	0.136	0.136	0.19056
Emin	Potentiel minimal	-0.85	-0.85	-0.85	-0.85	-0.85
Emax	Potentiel de protection au point de soutirage	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2
En	Potentiel naturel	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
L	Longueur du bras du PPC	28308.80114	28308.8011	28308.8011	28308.8011	28308.801
Lp	longueur du pipeline	2400	1980	930	2290	5520
io	densité de courant en mA/m² à 30°C et t=30 ans = 0.4 mA/m²	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
T	température opératoire du pipeline	55	55	55	55	55
Ia	Courant débité par anode	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
Rback	RESISTIVITé de backfil	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ρ	résistivité du sol environnant	50	50	50	50	50
La	Longueur D'anode	1	1	1	1	1
d	diamètre de l'anode	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
LVG	longueur active du déversoir	2	2	2	2	2
dVG	diamètre de la partie active du déversoir	0.254	0.254	0.254	0.254	0.254
Sa	espacement entre chaque anode	2	2	2	2	2
RGB	Résistance du déversoir anodique	20	20	20	20	20
Rcable	Résistance totale des câbles	0.0222222	0.02284	0.0223232	0.02152	0.02074
FCE	Force Contre Electromotrice	2	2	2	2	2

Calculs					
Rit	résistance d'isolement après vieillissement	10492,10787	10492,1079	10492,1079	10492,1079
RL	Résistance longitudinale	2,36717E-05	2,3672E-05	2,3672E-05	2,3672E-05
RT	Résistance transversale du revêtement	24556,92399	24556,924	24556,924	24556,924
Rc	Résistance caractéristique du pipe	0,762433678	0,76243368	0,76243368	0,76243368
Rct	Resistance caracteristique des pipes	0,143833828			
dEo	Abaissement de potentiel au point de soutirage	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7
dEt	Abaissement de potentiel à une distance maximale	-0,35	-0,35	-0,35	-0,35
a	Constante d'atténuation	3,10476E-05	3,1048E-05	3,1048E-05	3,1048E-05
dET	Potentiel de protection a une distance maximale	-0,495833333	-0,49583333	-0,49583333	-0,49583333
S	surface à protéger	1025,415842	845,96807	397,348639	978,417616
St	Surface totale à protéger	6551,763833			
i	densité de courant en mA/m² à la température opératoire maximale (75 °C)	0,325	0,325	0,325	0,325
It	courant requis par pipe	0,333260149	0,27493962	0,12913831	0,31798573
IT	courant total requis	2,129323246			
Im	Courant minimal par pipe	0,433238193	0,35742151	0,1678798	0,41338144
IM	Courant minimal	2,768120219			
Nc	Nombre d'anodes calculée	0,709774415			
On veut avoir la resistance de circuit au voisinage de 2,5 ohm pour assurer une protection optimale					
Ns	Nombre d'anodes calculée	2	2	2	2
Lact	LONGEUR ACTIVE	4	4	4	4
Ra	Résistance d'une anode verticale	0,379450928			
RVG	Résistance du déversoir vertical	7,631791693			
Nnv	nouveau Nombre d'anodes suggeste	10			
Lnv	nouvelle partie active	28			
RVGr	nouvelle resistance de deversoir	1,643293847			
R ct	Rcables totale	0,004380897			
R circuit	Résistivité de circuit	2,410108423			
Um	Tension nominal	8,671469856			

ZONE 400

Symbole	Légende	HA 14	HAZ 113	MFD4
ρa	Résistivité de l'acier	0.00000018	0.00000018	0.00000018
Dext	Diametre exterieure	0.1683	0.1683	0.3238
δ	Epaisseur moyen de la conduite	0.01588	0.01588	0.01748
Ri	Résistance d'isolement initiale pour un revêtement neuf	40000	40000	40000
β	Coefficient tenant compte du vieillissement du revêtement	0.124	0.124	0.124
t	Durée d'exploitation	30	30	30
D	diamètre du pipeline	0.136	0.136	0.28884
Emin	Potentiel minimal	-0.85	-0.85	-0.85
Emax	Potentiel de protection au point de soutirage	-1.2	-1.2	-1.2
En	Potentiel naturel	-0.5	-0.5	-0.5
L	Longueur du bras du PPC	28308.80114	28308.8011	28308.8011
Lp	longueur du pipeline	1750	1700	3350
io	densité de courant en mA/m² à 30°C et t=30 ans = 0.4 mA/m²	0.2	0.2	0.2
T	température opératoire du pipeline	55	55	55
Ia	Courant débité par anode	3.9	3.9	3.9
Rback	RESISTIVITé de backfil	0.5	0.5	0.5
ρ	résistivité du sol environnant	50	50	50
La	Longueur D'anode	1	1	1
d	diamètre de l'anode	0.025	0.025	0.025
LVG	longueur active du déversoir	2	2	2
dVG	diamètre de la partie active du déversoir	0.254	0.254	0.254
Sa	espacement entre chaque anode	2	2	2
RGB	Résistance du déversoir anodique	20	20	20
Rcable	Résistance totale des câbles	0.0222222	0.02284	0.02074
FCE	Force Contre Electromotrice	2	2	2

Calculs				
Rit	résistance d'isolement après vieillissement	10492,10787	10492,1079	10492,1079
RL	Résistance longitudinale	2,36717E-05	2,3672E-05	1,0701E-05
RT	Résistance transversale du revêtement	24556,92399	24556,924	11562,601
Rc	Résistance caractéristique du pipe	0,762433678	0,76243368	0,52317003
Rct	Resistance caracteristique des pipes	0,220526449		
dEo	Abaissement de potentiel au point de soutirage	-0,7	-0,7	-0,7
dEt	Abaissement de potentiel à une distance maximale	-0,35	-0,35	-0,35
a	Constante d'atténuation	3,10476E-05	3,1048E-05	3,0421E-05
dET	Potentiel de protection a une distance maximale	-0,495833333	-0,49583333	-0,50203966
S	surface à protéger	747,6990516	726,336222	3039,84903
St	Surface totale à protéger	4513,884307		
i	densité de courant en mA/m² à la température opératoire maximale (75 °C)	0,325	0,325	0,325
It	courant requis par pipe	0,243002192	0,23605927	0,98795094
IT	courant total requis	1,4670124		
Im	Courant minimal par pipe	0,315902849	0,30687705	1,28433622
IM	Courant minimal	1,90711612		
Nc	Nombre d'anodes calculée	0,489004133		
On veut avoir la resistance de circuit au voisinage de 2,5 ohm pour assurer une protection optimale				
Ns	Nombre d'anodes calculée	2	2	2
Lact	LONGEUR ACTIVE	4	4	4
Ra	Résistance d'une anode verticale	0,379450928		
RVG	Résistance du déversoir vertical	7,631791693		
Nnv	nouveau Nombre d'anodes suggeste	7		
Lnv	nouvelle partie active	19		
RVGr	nouvelle resistance de deversoir	2,259288825		
R ct	Rcables totale	0,007299329		
R circuit	Résistivité de circuit	2,487114604		
Um	Tension nominal	6,743216352		

V.3.1 Relation entre le nombre d'anode et la résistance de déversoir

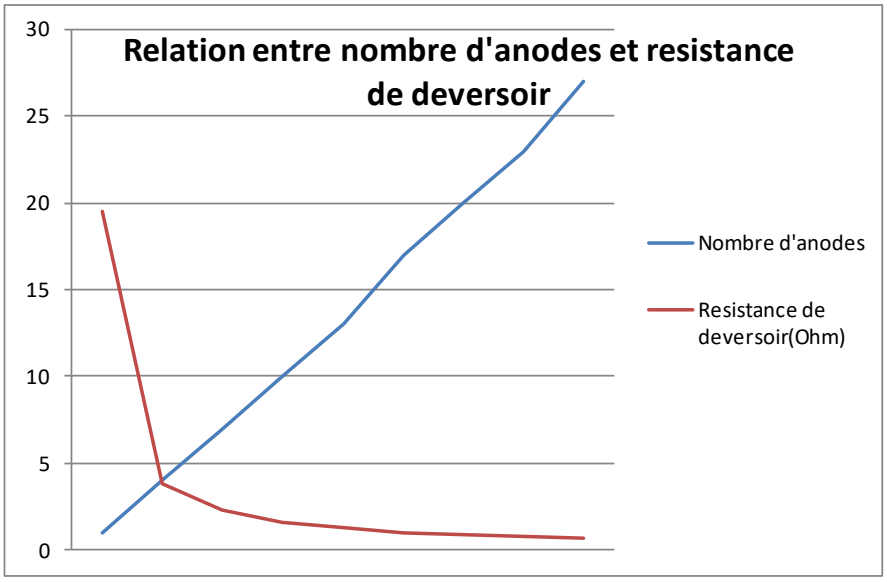


Figure 42:Relation entre nombre d'anodes et resistance de deversoir

L'analyse du graphe montre une corrélation directe entre l'augmentation du nombre d'anodes et la diminution de la résistance de déversoir. A mesure que le nombre d'anodes croit, la surface de contact active augmente, ce qui favorise une meilleure distribution du courant électrique. Cette augmentation de la partie active contribue à une réduction notable de la résistance de déversoir.

V.3.2 Présentation de l'atténuation de potentiel

On procède à la présentation de l'atténuation de potentiel pour les quatre zones.
Le potentiel en volt (V) en fonction de la longueur en mètre (m).

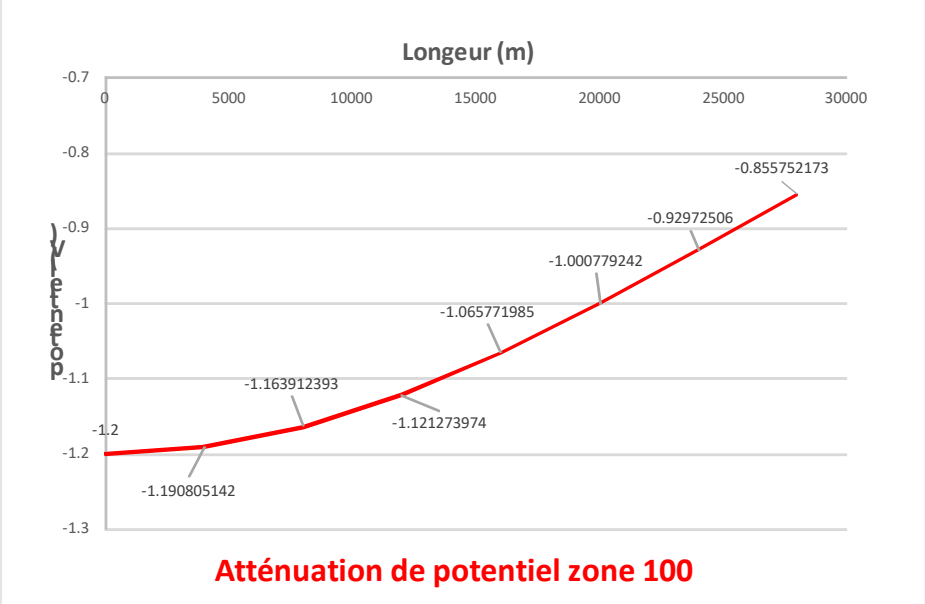


Figure 43:Atténuation de potentiel zone100

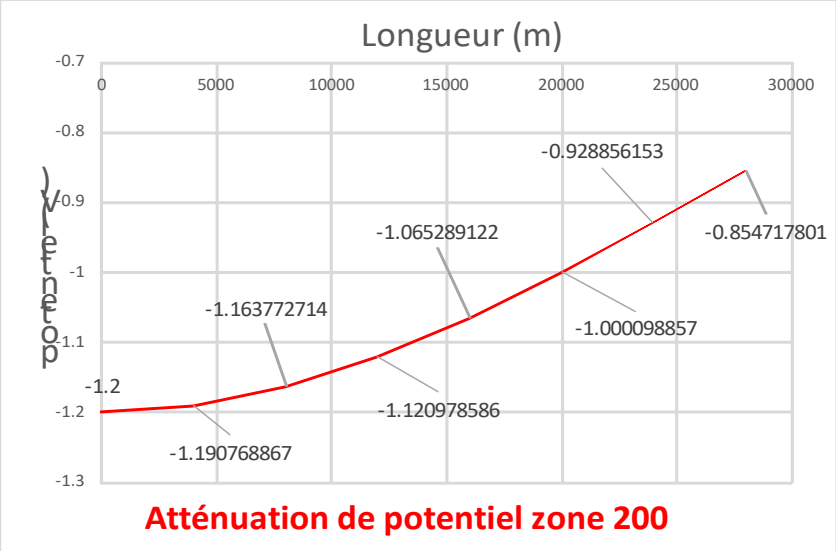


Figure 44:Attenuation de potentiel zone200

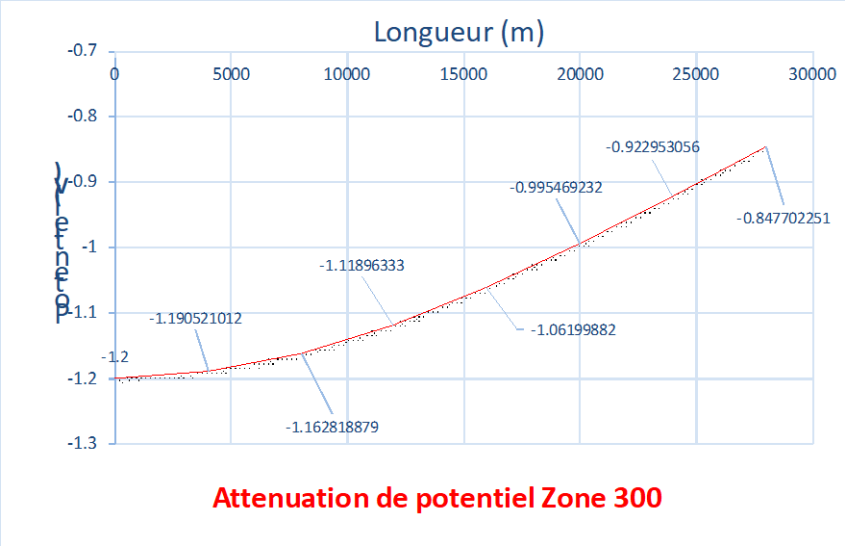


Figure 45:Attenuation de potentiel zone300

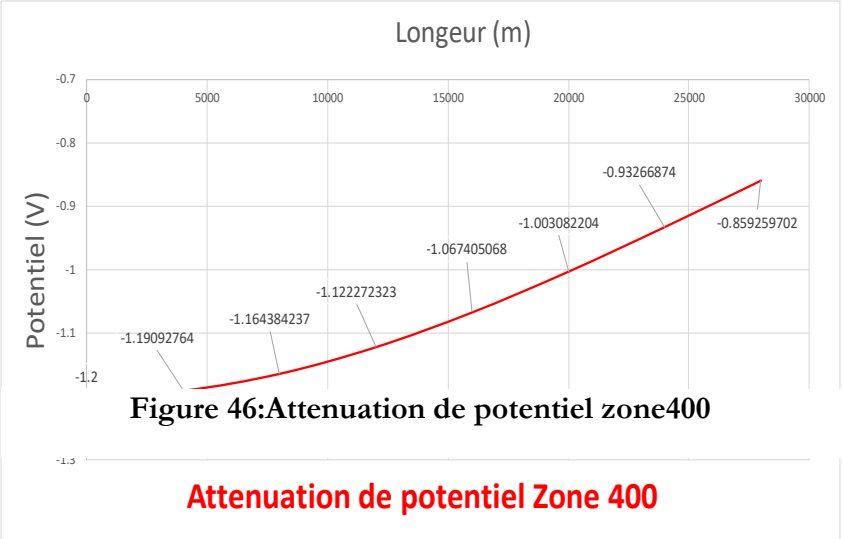


Figure 46:Attenuation de potentiel zone400

A l'origine du pipeline, le potentiel est élevé, ce qui reflète une protection cathodique optimale. Cependant, à mesure que nous déplaçons le long du pipe on observe une diminution progressive du potentiel. Cette baisse est attribuée à l'ensemble des résistances de circuit.

V.3.1 Courant requis pour chaque zone

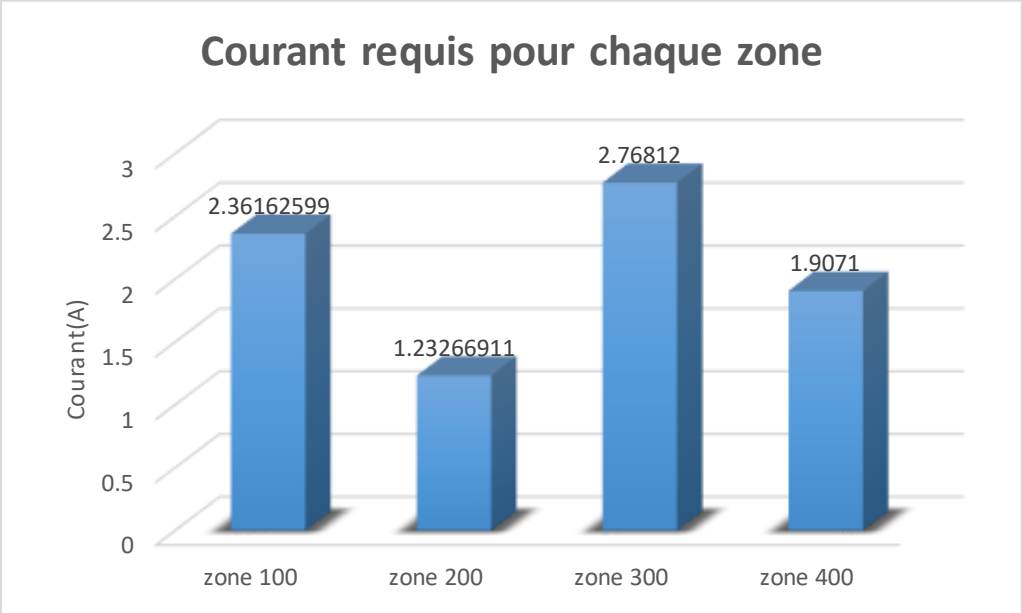


Figure 47:Courant requis pour chaque zone

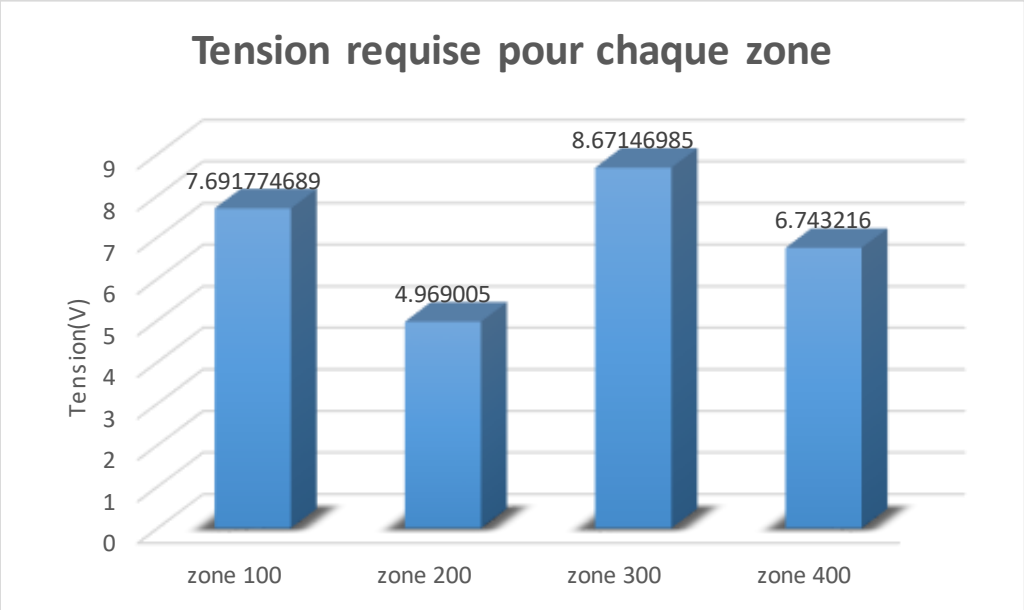


Figure 48:Tension requise pour chaque zone

Les 2 graphes présentent la demande de courant requis et la tension nécessaire pour quatre zones distinctes, fournissant un aperçu comparative de la consommation électrique dans chaque zone, ces informations sont indispensables pour la planification des infrastructures électriques pour assurer une distribution efficace et fiable de l'électricité en fonction des besoins spécifiques de chaque zone.

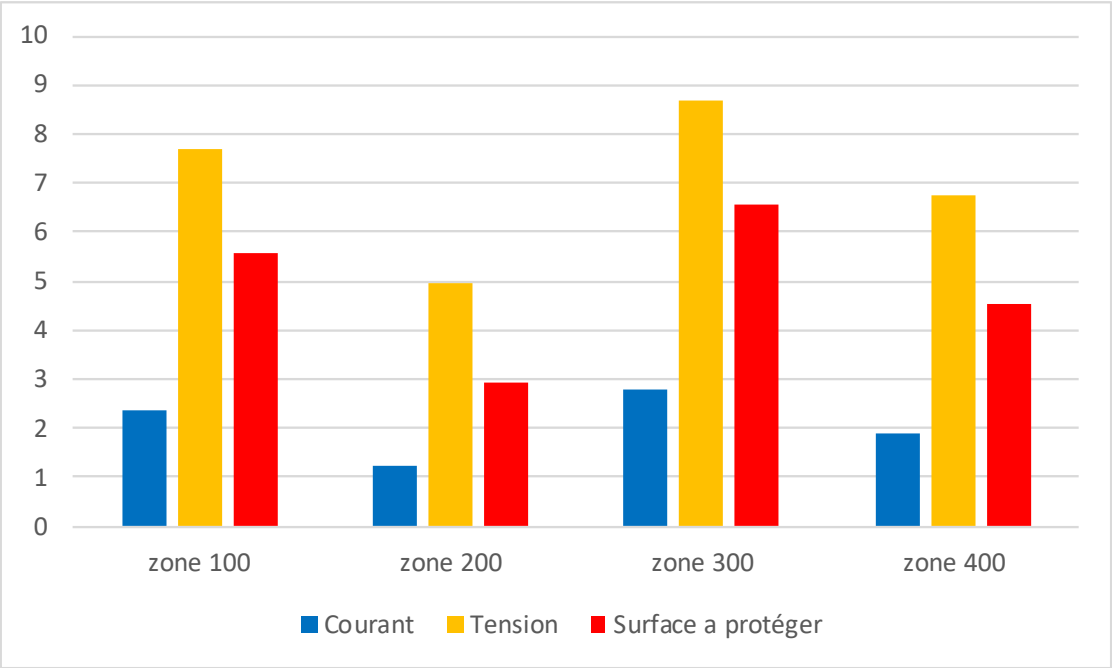


Figure 49: Besoins de chaque zone

V.4 Conclusion

L'analyse des résultats obtenus pour les quatre zones à protéger met en lumière plusieurs points clés l'augmentation du nombre d'anodes est corrélée à une diminution de la résistance de déversoir, indiquant qu'une surface de contact active plus grande améliore la distribution du courant électrique et réduit la résistance globale. Les graphiques d'atténuation de potentiel montrent un potentiel élevé au début du pipeline, reflétant une protection cathodique optimale, mais une diminution progressive le long du pipeline due aux résistances cumulées, soulignant l'importance de la surveillance continue pour maintenir une protection adéquate. Les graphiques des courants et tensions requis pour chaque zone fournissent un aperçu des besoins en énergie pour une protection cathodique efficace, montrant des variations selon les spécificités de chaque zone, cruciales pour planifier les infrastructures électriques nécessaires pour assurer une distribution efficace et fiable de l'électricité.

VI. Conclusion générale

Notre travail porte sur l'étude de la protection cathodique pour le système de raccordement de 14 puits de gaz brut vers l'usine existante de HAMRA à Hassi Messaoud. La protection cathodique est une technique de protection active contre la corrosion des matériaux métalliques en contact avec un électrolyte, tel qu'une solution aqueuse conductrice comme l'eau, les sols ou le béton. Cette méthode de protection électrochimique réduit le potentiel de corrosion à un niveau où la vitesse de corrosion du métal est significativement diminuée.

Les structures en acier enterrées ou immergées peuvent bénéficier d'une protection anticorrosion efficace grâce à cette technique. En raison de son efficacité, les coûts d'installation et de maintenance de la protection cathodique sont faibles comparés aux coûts d'investissement et de fonctionnement. La protection cathodique permet de réduire la vitesse de corrosion des structures et d'augmenter considérablement leur durée de vie.

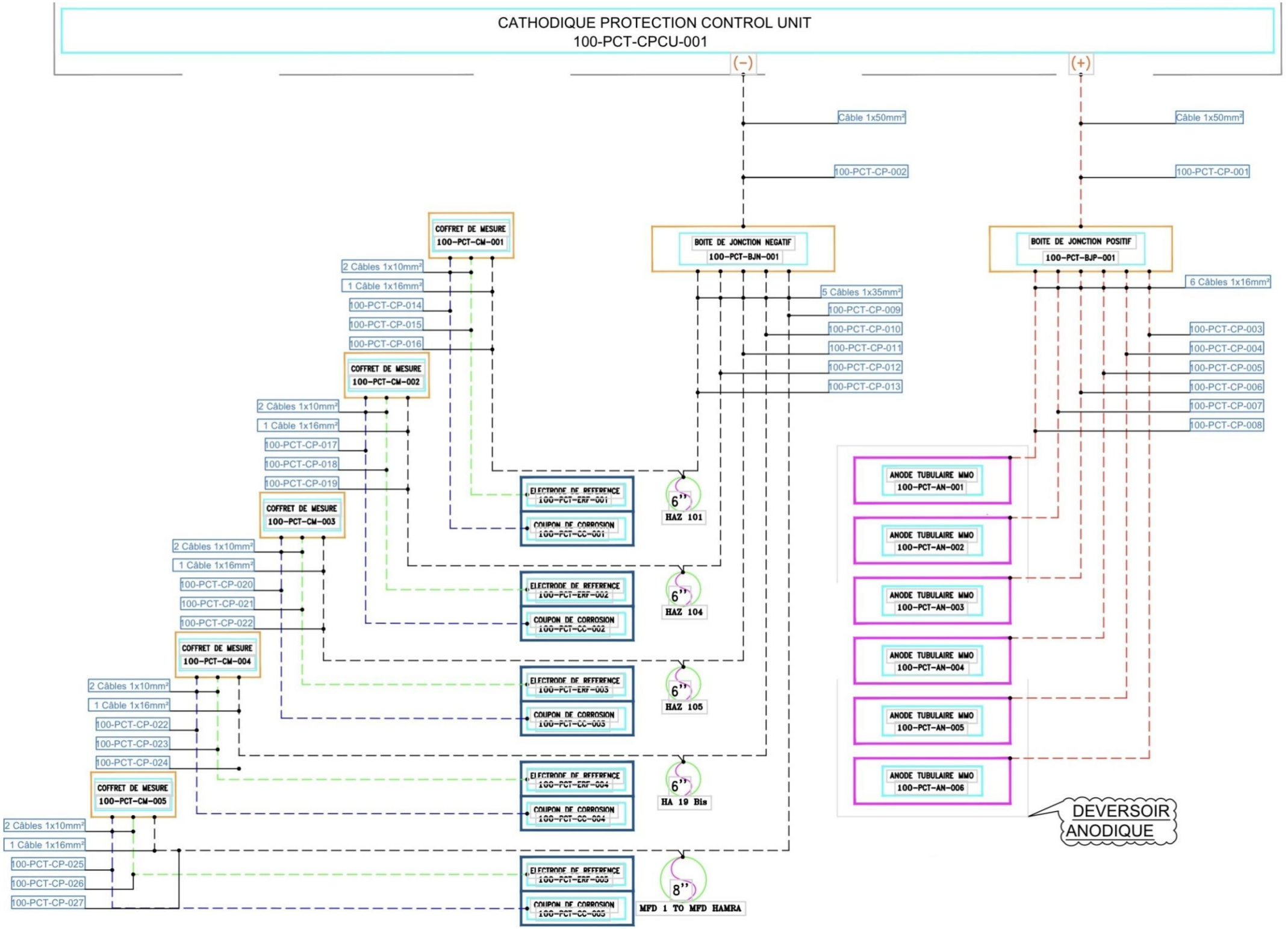
Pour cette raison, nous avons choisi d'explorer cette application dans notre mémoire afin de réduire les problèmes de corrosion couramment rencontrés dans la pratique. La protection cathodique par courant imposé (soutirage de courant électrique) à l'aide de grilles est une méthode particulièrement éfficace, avec une durée de vie d'environ 30 ans. Le dimensionnement du système pour cette application se base sur des données de paramètres de conception afin d'assurer l'efficacité de la protection contre la corrosion externe des pipelines

Cette méthode a prouvé son efficacité dans la protection des pipelines dans l'industrie des hydrocarbures, étant économiquement avantageuse et largement utilisée avec des résultats satisfaisants en termes de prévision de la durée de vie des pipelines. La protection cathodique nécessite des connaissances en électrochimie, corrosion, électricité, maintenance, métrologie et réglementation.

Annexes

Annexe A

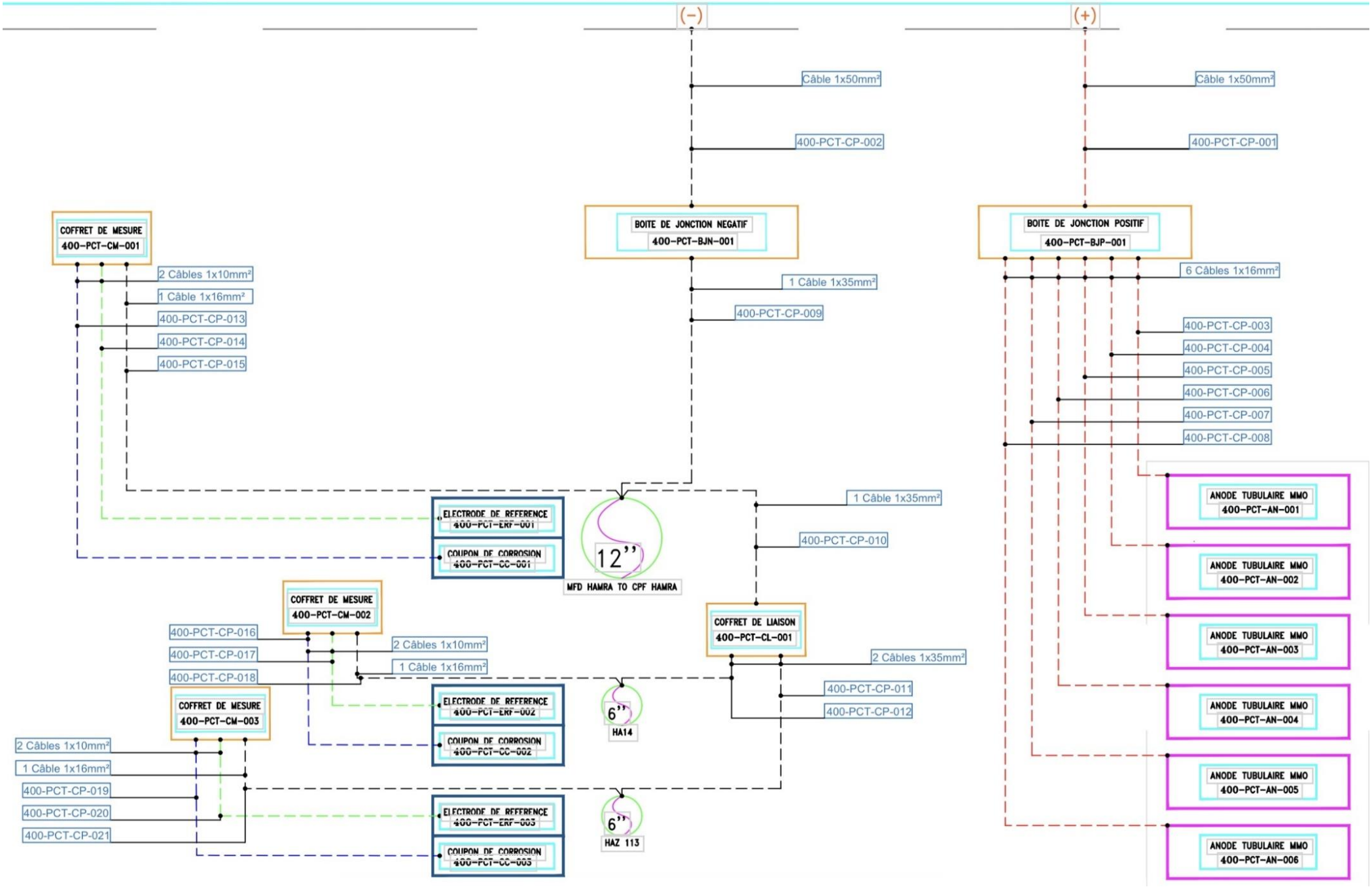
Diagramme schématique système protection cathodique permanent (ZONE 100)


CATHODIQUE PROTECTION CONTROL UNIT
100-PCT-CPCU-001
(-)
(+)
Câble 1x50mm²
100-PCT-CP-002
Câble 1x50mm²
100-PCT-CP-001
BOITE DE JONCTION NEGATIF
100-PCT-BJN-001
BOITE DE JONCTION POSITIF
100-PCT-BJP-001
5 Câbles 1x35mm²
100-PCT-CP-009
100-PCT-CP-010
100-PCT-CP-011
100-PCT-CP-012
100-PCT-CP-013
6 Câbles 1x16mm²
100-PCT-CP-003
100-PCT-CP-004
100-PCT-CP-005
100-PCT-CP-006
100-PCT-CP-007
100-PCT-CP-008
COFFRET DE MESURE
100-PCT-CM-001
2 Câbles 1x10mm²
1 Câble 1x16mm²
100-PCT-CP-014
100-PCT-CP-015
100-PCT-CP-016
ELECTRODE DE REFERENCE
100-PCT-ERF-001
COUPON DE CORROSION
100-PCT-CC-001
6''
HAZ 101
COFFRET DE MESURE
100-PCT-CM-002
2 Câbles 1x10mm²
1 Câble 1x16mm²
100-PCT-CP-017
100-PCT-CP-018
100-PCT-CP-019
ELECTRODE DE REFERENCE
100-PCT-ERF-002
COUPON DE CORROSION
100-PCT-CC-002
6''
HAZ 104
COFFRET DE MESURE
100-PCT-CM-003
2 Câbles 1x10mm²
1 Câble 1x16mm²
100-PCT-CP-020
100-PCT-CP-021
100-PCT-CP-022
ELECTRODE DE REFERENCE
100-PCT-ERF-003
COUPON DE CORROSION
100-PCT-CC-003
6''
HAZ 105
COFFRET DE MESURE
100-PCT-CM-004
2 Câbles 1x10mm²
1 Câble 1x16mm²
100-PCT-CP-022
100-PCT-CP-023
100-PCT-CP-024
ELECTRODE DE REFERENCE
100-PCT-ERF-004
COUPON DE CORROSION
100-PCT-CC-004
6''
HA 19 Bis
COFFRET DE MESURE
100-PCT-CM-005
2 Câbles 1x10mm²
1 Câble 1x16mm²
100-PCT-CP-025
100-PCT-CP-026
100-PCT-CP-027
ELECTRODE DE REFERENCE
100-PCT-ERF-005
COUPON DE CORROSION
100-PCT-CC-005
8''
MFD 1 TO MFD HAMRA
ANODE TUBULAIRE MMO
100-PCT-AN-001
ANODE TUBULAIRE MMO
100-PCT-AN-002
ANODE TUBULAIRE MMO
100-PCT-AN-003
ANODE TUBULAIRE MMO
100-PCT-AN-004
ANODE TUBULAIRE MMO
100-PCT-AN-005
ANODE TUBULAIRE MMO
100-PCT-AN-006
DEVERSOIR
ANODIQUE

Annexe B

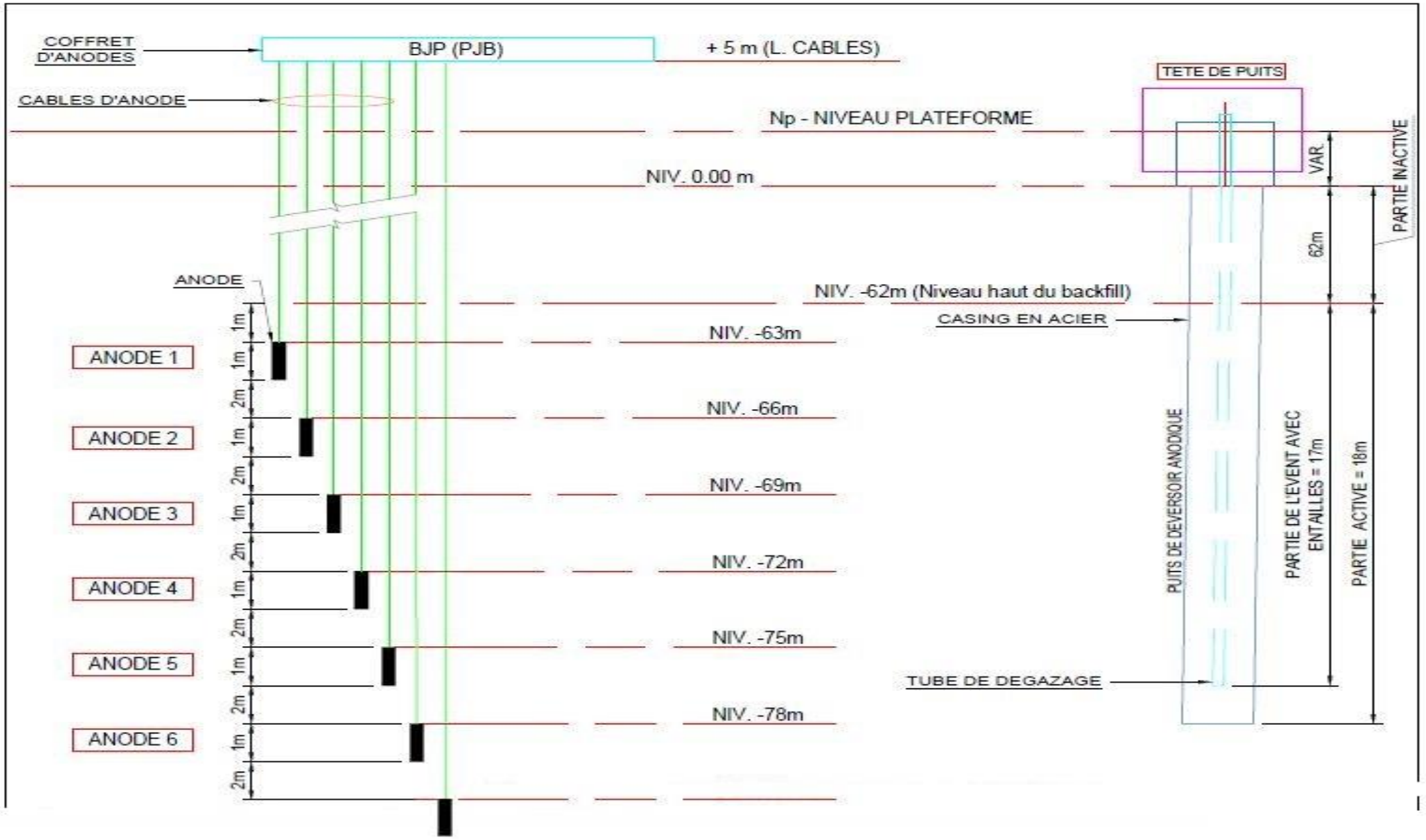
Diagramme schématique système protection cathodique permanent (ZONE 400)

TRANSFORMATEUR REDRESSEUR
400-PCT-TR-001



Annexe C

PLAN DU DETAIL D'INSTALLATION DU DEVERSOIR ANODIQUE


COFFRET D'ANODES
BJP (PJB)
+ 5 m (L. CABLES)
CABLES D'ANODE
TETE DE PUITS
Np - NIVEAU PLATEFORME
NIV. 0.00 m
VAR.
62m
PARTIE INACTIVE
ANODE
NIV. -62m (Niveau haut du backfill)
CASING EN ACIER
NIV. -63m
ANODE 1
NIV. -66m
ANODE 2
NIV. -69m
ANODE 3
NIV. -72m
ANODE 4
NIV. -75m
ANODE 5
NIV. -78m
ANODE 6
1m
2m
PUITS DE DEVERSOIR ANODIQUE
PARTIE DE L'EVENT AVEC ENTAILLES = 17m
PARTIE ACTIVE = 18m
TUBE DE DEGAZAGE

Bibliographie

(1). **Jones, D. A.** (1996). *Principles and Prevention of Corrosion(Principes et prévention de la corrosion)* . Prentice Hall

(2). **J. Paul Guyer**, An Introduction to Cathodic Protection Principles, P.E., R.A., Fellow ASCE, Fellow AEI

(3). **Bard, A. J., & Faulkner, L. R.** (2001). *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications.* Wiley.

(4). **Pourbaix, M.** (1974). *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*. NACE International

(5). **Bardel, E.** (2004). *Corrosion and protection* . Springer .

(6). **S.Audisio, M.Caillet, A.Gallerie et H.Mazille,***(Les Hauts de Marquay, Les Eyzies, 1998),Revêtement et traitements de surface — Fonctionnalités, durabilité, procédés,* Presse Polytechnique et Universitaires Romandes, Lausanne, 1999

(7). **Peaboy, A. W**. *Peaboy's control of pipeline corrosion*. NACE International

(8). **Morgan, J. H.** (1987). *Cathodic protection* . NACE Interntionl

(9). **SARPI SPA.** *Spécification générale de la protection cathodique*

(10). **Khelifi, M.** (2020). *Mémoire de master* :*Étude de la protection cathodique du gazo du cillizi / djanet.* Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

(11). *Cathodic protection specialist course manual* NACE CP4 »January 2010 /NACE International, 2000 (TRAINING & CERTIFICATION)

Corrosion des matériaux a haute temperature, G.Beranger, J.C.Colson et F.Dabosi,(Piau Engaly, 1985, Les Éditions de Physique, Les Ulis, 1987

Traitement de surface et protection contre la corrosion, S.Audisio, M.Caillet, A.Gallerie et H.Mazille,(Aussois, 1987), Les Éditions de Physique, Les Ulis, 1989

Corrosion et protection des métaux, G.Beranger et F.Dabosi,(Les Houches, 1981), Éditions du C.N.R.S, Toulouse, 1982

NACE Publication n°35108, report on the 100mV Cathodic Polarization Criterion

NACE Standard n°TM0108-2008, Testing of catalyzed titanium anodes for use in soils or natural waters

Ceocor recommendation (no reference), Isolating joints for gaz pipelines

NACE CORROSION ENGINEER'S REFERENCE BOOK. (3rd Edition), 2002 R. S. Treseder (Author)

ASTM B418-12, Standard Specification for Cast and Wrought Galvanic Zinc Anodes

ASTM B418-12, Standard Specification for Magnesium Alloy Anodes for Cathodic Protection

U.S.MIL-A-18001-K (1993), Anodes, Sacrificial zinc alloy

Gummow R.A Performance efficiency of high potential magnesium anodes for cathodically protection iron watermains', Proceedings of North Area Eastern Conference (Houston, TX/ NACE, Sept. 15-17, 2003)

EN 13509, Technique de mesures applicables en protection cathodique

ISO 155589-2, Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel — Protection cathodique des systèmes de transport par conduites — Partie 2: Conduites en mer

IEC 62305-4, Protection contre la foudre — Partie 4: Réseaux de puissance et de communication dans les structures

[EN 10329, Tubes et raccords en acier pour canalisations enterrées et immergées — Revêtements externes des assemblages réalisés sur site

EN 12007-1 Infrastructures gazières — Canalisations pour pression maximale de service inférieure ou égale a 16 bar — Partie 1: Exigences fonctionnelles générales

EN 12732, Infrastructures gazières — Soudage des tuyauteries en acier — Prescriptions fonctionnelles

EN 15257, Protection cathodique — Niveaux de compétence et certification du personnel en protection cathodique

NACE SP0572, Standard Recommended Practice — Design, Installation, Operation, and Maintenance of Impressed Current Deep Anode Beds

EN 14505, Protection cathodique des structures complexes