



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département Hygiène et Sécurité Industrielle Et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle

Spécialité : Sécurité Prévention Intervention

Thème

La protection Cathodique par courant imposé

Présenté et soutenu publiquement par :

Bakhadra Nouar

et

Lalmi Rachid

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
SERAT ZAHIRA	MAB	IMSI / UNIV ORAN2	Président
TALBI ZAHERA	MCB.	IMSI / UNIV ORAN2	Encadreur
MECHKEN AMEL	MAA	IMSI / UNIV ORAN 2	Examineur

Année 2019/2020

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement à Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné pour terminer mon travail.

*Nous souhaitons tout d'abord remercier l'administration et les professeurs du l'institut et tout qui nous donné le courage pour contenu notre étude. Nous remercions notre encadreur Madame **Talbi zahera** pour avoir accepté de diriger ce mémoire et de sa patiente durant la période de l'encadrement et Monsieur **Larbi Abd El Kader** ingénieur au niveau de la complexe GP1Z, qui a nous soutenue avec les données et les informations requises.*

Enfin, nous remercie aussi tous mes amis et tous mes collègues de l'IMSI pour leur sincère amitié et confiance.

Dédicace

D'abord, louange à Dieu qui nous avons guidé sur le droit chemin tout au long du travail et qui nous avons inspiré les bons pas et les justes réflexes, sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti.

A ma très chère mère, Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'Amour et d'affection que j'éprouve pour toi.

Tu m'a soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études.

Qu'ALLAH te protéger et te donner la santé, le bonheur et longue vie

Lalmi Rachid

Dédicaces

Je dédie se modeste travail :

*A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus
Pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu
Durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me
voir*

Devenir ce que je suis, merci beaucoup mes parents.

A toutes personnes qui ma aider à poursuivre mes études.

A toute La famille, BAKHADRA

A tous mes amis (es)

Mes collègues de master en prévention intervention

Bakhadra Nouar

SOMMAIRE

Remerciment.....	
Dédicace.....	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Liste des équations.....	

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralité sur La Corrosion

I.1 Introduction	3
I.2 Définition de la Corrosion	3
I.3 Environnement corrosif	3
I.4 Conséquence de la corrosion.....	4
I.5 Coût de la corrosion	4
I.6 Processus de la corrosion électrochimique	5
I.7 Etude thermodynamique de la corrosion électrochimique (diagramme du pourbaix).....	6
I.8. Les formes du la Corrosion.....	8
I.8.1.La corrosion uniforme	8
I.8.2. La corrosion localisée	9
I.8.2.a. La corrosion par piqûres.....	9
I.8.2.b Corrosion caverneuse	10
I.8.2.c Corrosion galvanique.....	11
I.8.2.d Corrosion inter-granulaire	12
I.8.2.e Corrosion par érosion, abrasion, cavitation.....	12
I.8.2.f Corrosion sous contraintes	12
I.9. Modes de protection contre la corrosion.....	12
I.9.1. Protection par revêtements	13
I.9.1.a. Revêtements métalliques	13
I.9.1.b. Les revêtements organique	13
I.9.2 Protection par inhibiteur	14
I.9.3 Protection électrochimique	16
I.9.3.1 Protection cathodique	16

I.9.3.1.a	La protection par anode sacrificielle	16
I.9.3.1.b	La protection par courant imposé	17

Chapitre II : Protection Cathodique par Courant Imposé

II.1	Introduction	20
II .2	Corrosion par sol	20
II .2.1	Agressivité du sol	20
II .2.1.a	Méthode de mesure de la résistivité du sol	21
II .2.2.b	Principe de mesure de la résistivité du sol	21
II.3	Principe de la protection cathodique	22
II.4	Fonctionnement d'une installation de protection cathodique à courant imposé ICCP.....	24
II.4.1	Potentiel de protection	25
II.4.2	Le revêtement associé à la protection cathodique	25
II.4.3	Résistance du sol.....	25
II.4.4	Le déversoir (Anodes).....	26
II.4.5	Les câbles de jonction	27
II.4.6	Générateur de courant	28
II .5.	Avantages de l'utilisation de système de la protection cathodique par courant imposé ICCP.....	28
	Protection anticorrosion à plus long terme	28
	Contrôle et surveillance plus faciles	28
II.6	Dimensionnement d'un système de ICCP	29
II.6.2	Calcul de la résistance des déversoirs anodiques	30
II.6.2.a	Déversoirs verticaux	30
II.6.2.b	Déversoirs horizontaux.....	30
II.6.3	Calcul de la résistance d'isolement de revêtement	30
II.6.4	Calcul du courant de distribution et potentiel de distribution sur la structure protégée	31
II.6.6	Calcul de la masse anodique	32
II.7	Conclusion	32

Chapitre III : Partie Pratique

III.1 Introduction	34
III.2 Description du système de la protection cathodique du GP1Z	34
III.2.5 Joints d'isolement	38
III.2.6 Cellules de mise à la terre	39
III.3 Configuration des systèmes de protection cathodique	39
III.3.1 Système de protection cathodique phase I et phase II	39
III.3.2 Système de protection cathodique phase III	39
III.4 Mesure du potentiel de la canalisation enterrée.....	39
III.4.1 Inspection du redresseur/transformateur	41
III.4.2 Inspection des joints isolants.....	41
III.7 Partie calculs	44
III.8 Conclusion.....	47
Conclusion.....	49
Annexe.....	52

Liste des figures

Figure I.1 : Pile de corrosion électrochimique

Figure I.2 : Courbe d'équilibre E-pH de Fer-eau à 25°C [3].

Figure I.3 : Représentation schématique de la corrosion généralisée

Figure I.4 : a) Mécanisme de la corrosion par piqûre, b) Corrosion par piqûres du cuivre dans l'eau potable [6].

Figure I.5 : Schéma d'une pièce métallique qui présente une crevasse

Figure I.6 : a) Schéma représentative de la corrosion galvanique
, b) Corrosion galvanique de l'acier inoxydable [7].

Figure I.7 : Protection d'un pipeline souterrain avec une anode en magnésium

Figure I.8 : Schéma du système de protection cathodique par courant imposé.

Figure (1.10): Principe de fonctionnement de la méthode de Wenner.

Figure II.1 : Diagramme d'Evans – principe de la protection cathodique.

Figure II.2 : Schéma du principe de ICCP

Figure III.1 : Anodes de types ferro-silicium.

Figure III.2 : Anode posée verticalement dans l'eau de mer.

Figure III.3 : Mesure du potentiel de la canalisation enterrée.

Figure III.4 : Installation de l'électrode de zinc.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Composition d'une peinture [3].

Tableau I.2 : Certains systèmes corrosifs et leurs inhibiteurs appropriés [2]

Tableau (1.2): Corrosivité du sol selon la résistivité [11].

Tableau II.1 : Exemples d'anodes utilisées dans différents systèmes.

Tableau III.1 : Propriétés des canalisations protégées.

Tableau III.2 : Propriétés des anodes fer-silicium.

Tableau III.3 Résultat de la mesure de la résistivité du sol off-site.

Tableau III.4 Résultat de la mesure de la résistivité du sol sur on-site.

Tableau III.5 : Résultat de la mesure de la résistivité du sol sur le tracé du pipe GN.

Liste des Abréviations

ISO : Organisation internationale de normalisation

PH : potentiel d'hydrogène

Fe⁺² : Ion Ferreux

Fe⁺³ : Ion Ferrique

Couple OX/ Red : la réaction redox

FeS : sulfure de fer

H₂S : hydrogéné sulfuré

Cu⁺² : ion du cuivre

CIO : chlorure, bromure, et hypochlorite

Zn : zinc

HCl : Acide chlorhydrique

H₂SO₄ : Acide sulfurique

F-e-m : la force électromotrice

ICCP : la protection cathodique par courant imposé

NACE : National association of corrosion Engineering's

PVC : polychlorure de vinyle

RTO : Région de transport Ouest

GP1/Z : Complexe de séparation du gaz pétrolier liquéfié (Béthioua).

Tableau des symboles

Symbole	signification	unité
R_v	résistance de terre	Ω
ρ_s	étant la résistivité du milieu	$\Omega \text{ m}$
l	la longueur de l'anode	m
d	diamètre de l'anode	m
R_H	résistance de terre	Ω .
h	profondeur sous la surface du sol jusqu'au centre de l'anode	m
R_{is}	Résistance isolement	Ω .
β	Coefficient de vieillissement du revêtement	
t	temps.	sec
I	L'intensité du courant	A
R_s	résistance longitudinale de la conduite par unité de longueur	$\Omega \text{ m}$
m	le taux de consommation de l'anode	Kg/A.an.
M_t	La masse totale anodique	Kg

Résumé

Les systèmes de protection cathodique à courant imposé utilisent une source de courant continu par abaisser le potentiel de l'ouvrage au-dessous de son potentiel de corrosion. Notre travail consiste à une étude sur ces types de système en effectuant un calcul de dimensionnement du système de protection du complexe GP1/Z. La méthodologie que nous avons adoptée, consiste à relever les mesures de la résistivité du sol ensuite des calculs de dimensionnement de la résistance de terre des anodes, la masse anodique nécessaire pour la protection cathodique ainsi que le nombre des anodes approprié.

MOTS Clés : *corrosion, protection cathodique par courant imposé, résistivité du sol,*

المخلص

في الوقت الحاضر، أصبح تدهور الأنابيب تحت الأرض بسبب ظاهرة التآكل مصدر قلق متزايد للقطاعات الصناعية والبيئية في البلدان المتقدمة. في الواقع، فإن النمو السنوي في عدد الأعطال التي تحدث في شبكات أنابيب النقل وميزانيات إعادة التأهيل الضخمة التي تنتج عنها هي في أصل البحث التقني المبتكر من حيث التقييم والوقاية ضد تآكل.

في هذا العمل، الدراسة التي تجمع أولاً وقبل كل شيء نظرية التآكل (التعريف، الأنواع، الأسباب...) GP1Z. وثانياً التقنية المستخدمة للحماية في مجمع

المنهجية التي اعتمدها في هذا العمل تتمثل في أخذ قياسات مقاومة التربة وحساب مقاومة الأرض. وكتلة الأنود وعدد الأنودات المناسبة

الكلمة الرئيسية: التآكل ، الحماية الكاثودية بالتيار المؤثر ، مقاومة التربة

Introduction générale

Depuis le temps où l'homme a découvert et su utiliser les métaux, il est toujours confronté à leur destruction, c'est-à-dire leur retour à l'état naturel minéral. Cette destruction s'appelle la corrosion

La corrosion est le processus qui conduit les éléments naturels à défaire ce que l'homme a réalisé en élaborant des matériaux que la terre lui a offert. La corrosion métallique ramène ainsi, les métaux et alliages à leurs états naturels d'oxyde et de minerais

La corrosion est un problème industriel important : le coût de la corrosion, qui recouvre l'ensemble des moyens de lutte contre la corrosion, le remplacement des pièces ou ouvrages corrodés et les conséquences directes et indirectes des accidents dus à la corrosion, est estimé à 2 % du produit brut mondial.

On estime que, pour ce qui concerne l'acier, 10 à 20% de la production mondiale seraient détruites chaque année par la corrosion si l'on n'y prenait pas garde. En France, le CEFRACOR (centre français de la corrosion) a évalué en 1977 les dégâts causés par la corrosion à 8 ou 10% de la production d'acier

De nos jours, la protection cathodique est couramment appliquée à des structures aussi diverses que : les conduites enterrées ou immergées (gazoduc/oléoduc), les réservoirs, les bateaux, les installations pétrolières, les armatures métalliques, les câbles électriques ou téléphoniques, etc.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Le premier présente une étude bibliographique sur la corrosion des aciers, en mettant en exergue les différents facteurs provoquant la corrosion ainsi que ces différentes formes et types. Ensuite, les modes de protection électrochimique pour lutter contre ce phénomène ont été décrits avant de donner un aperçu sur les paramètres limitant l'efficacité de la protection cathodique et son contrôle.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de corrosion par sol, le principe, fonctionnement, et dimensionnement d'un système de protection par courant imposé

Le troisième chapitre est consacré à l'étude du système de protection cathodique par courant imposé du complexe GP1Z. Nous avons également effectué un dimensionnement du système par la méthode de la masse anodique.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale et complète de ce mémoire.

CHAPITRE I

Généralités sur la corrosion

I.1 Introduction

Dans ce chapitre nous nous décrivons les principes de base de la corrosion qui sont normalement valables pour tous les métaux. Une première partie explique la thermodynamique des réactions de corrosion. Mais, l'aspect thermodynamique seul ne permet pas d'interpréter les faits expérimentaux. Il y a d'autres phénomènes qui interviennent notamment la cinétique électrochimique qui est l'étude de la vitesse de la corrosion. La deuxième partie a été consacrée aux différents systèmes de protection contre la corrosion.

I.2 Définition de la Corrosion

Selon la norme ISO 8044 (2015) [1], la définition officielle de la corrosion, est la suivante :

Interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs ”.

La corrosion est donc, la destruction chimique ou électrochimique des matériaux métalliques par leur environnement. C'est en fait, le phénomène suivant lequel les métaux ont tendance à revenir à leur état naturel d'oxydes, sulfates, carbonates...etc., plus stable et subir ainsi, une dégradation de leurs propriétés [3].

I.3 Environnement corrosif

La corrosion ne peut être définie sans se référer à l'environnement dans lequel le matériau est exposé, on peut citer dans ce cas [2] :

1. Air et humidité
2. Eau fraîche, Distillée
3. Eau de mer et salée.
4. Vapeur et gaz tel que le : chlore.
5. Ammoniaque.
6. Sulfure d'hydrogène.
7. Dioxyde de soufre et oxydes d'azote.
8. Gaz combustibles.

9. Acides.

10. Sols.

C'est surtout l'environnement marin qui est réputé être le plus corrosif. Les conditions marines posent des problèmes pour la construction navale et portuaire, les plates-formes offshore et hydroliennes, les pipelines sous-marins, le refroidissement d'installations, qu'elles soient nucléaires, électriques ou chimiques, les usines de dessalement, de matériel de télécommunications sous-marines.

I.4 Conséquence de la corrosion

1. Arrêt de production qui entraîne une perte financière importante.
2. Perte de produits qui peut générer des accidents et des risques pouvant affecter l'environnement (pollution de l'air, des sols et des eaux) ou bien à l'intégrité humaine (santé et sécurité des individus).
3. Perte de rendement, en particulier dans le cas des isolants thermiques et les échangeurs de chaleurs, par les produits de corrosion en réduisant le transfert de chaleur.
4. Contamination de l'environnement par les produits de corrosion.

L'ampleur de la corrosion dépend essentiellement de la sensibilité d'un matériau à un environnement spécifique, Par exemple, le cuivre se corrode rapidement en présence de l'ammoniaque et cause un sérieux problème dans les zones agricoles. De nombreuses statues historiques réalisées en bronze ont été détruits par l'ammoniaque libérée des engrais [2] [3].

I.5 Coût de la corrosion

Les coûts attribuables aux dommages de la corrosion de toutes sortes aient été estimés à l'ordre de 3 à 5% du produit national brut des pays industrialisés, Les conséquences de la corrosion sur le plan économique et social peuvent être résumées dans les points suivants [3] :

- Pertes directes : remplacement des matériaux corrodés et des équipements dégradés,
- Pertes indirectes : couts des réparations et pertes de production (temps),
- Mesures de protection : inspections, entretiens, etc.

I.6 Processus de la corrosion électrochimique

La corrosion électrochimique ou humide est la plus rencontrée dans l'industrie du gaz et du pétrole ainsi que dans l'industrie pétrochimique. Elle est responsable de la dégradation des structures métalliques en contact avec tout milieu susceptible de contenir de l'eau; milieu complexe contenant une quantité d'espèces chimiques dissoutes ou en suspension, mais aussi avec les gaz amenant des condensations d'eau.

La corrosion électrochimique fonctionne comme une pile électrochimique et doit donc réunir simultanément quatre facteurs pour pouvoir se déclencher :

- Une anode c'est la partie du métal où se développe la réaction d'oxydation entraînant une dissolution de cette partie sous forme de cations positifs dans le milieu aqueux,
- Une cathode c'est la partie du métal où se développe la réaction de réduction d'une espèce contenue dans l'électrolyte (dégagement d'hydrogène par réduction d'ions H^+ , formation d'eau par réduction de l'oxygène en milieu acide, formation d'ions OH^- par réduction de l'oxygène en milieu basique, où le siège du dépôt d'un métal par réduction d'une de ses cations).
- Un conducteur électrique : qui puisse véhiculer les électrons libérés de l'anode vers la cathode. Ce rôle est assuré par le métal lui-même
- Un conducteur ionique : qui puisse permettre la migration des cations libérés à l'anode vers les anions libérés à la cathode pour assurer la neutralité électrique et fermer le circuit électrique. Ce rôle est joué par le milieu électrolytique lui-même.

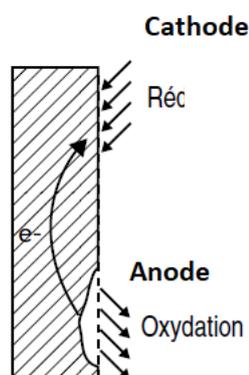


Figure I.1 : Pile de corrosion électrochimique

I.7 Etude thermodynamique de la corrosion électrochimique (diagramme du pourbaix)

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

Le diagramme de Pourbaix localise également les frontières des produits de corrosion insolubles du métal dissous avec les limites en concentration d'ions métalliques libres. Sur le diagramme de potentiel E-pH du système Fe- H₂O à 25°C (Fig. I.2), plusieurs points thermodynamiques critiques peuvent être soulevés :

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

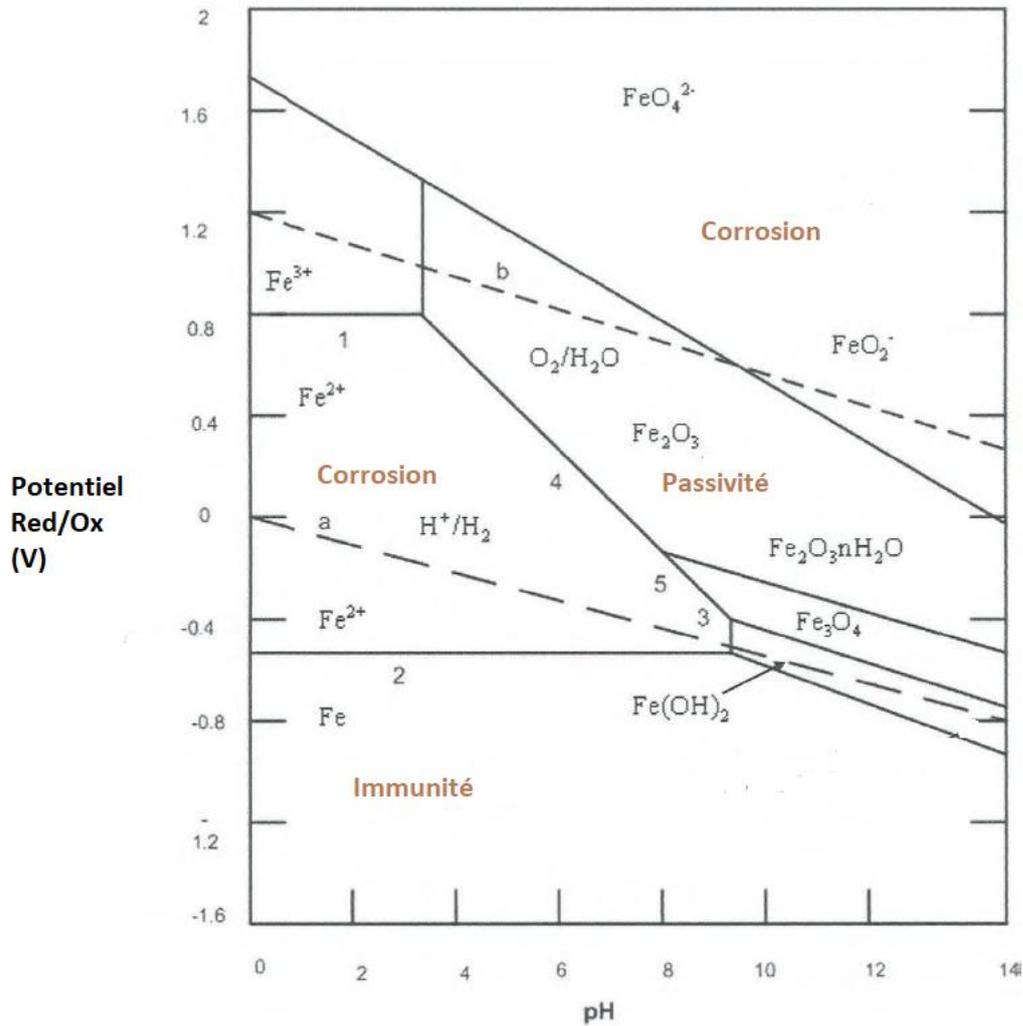


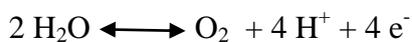
Figure I.2 : Courbe d'équilibre E-pH de Fer-eau à 25°C [3].

La région limitée par les lignes (a) et (b) de la figure (I.2) présente la zone de stabilité thermodynamique des molécules d'eau. Dans cette région, le potentiel et le pH sont considérablement stables. Par ailleurs, le rapprochement de ces limites provoque une dissolution de l'eau

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



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



Pour le cas du fer, le diagramme potentiel-pH du système Fer- H₂ O à 25°C fait apparaître trois phases distinguées, à savoir:

Phase d'immunité :

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

Phase de corrosion :

Dans cet état de système, le métal se transforme d'un niveau stable à un niveau actif (corrosion). Cette transformation se traduit par la dissolution de métal en ions solubles dans l'électrolyte. En solution neutre ou acide, le diagramme prévoit la dissolution du fer avec la formation d'ions ferreux Fe^{2+} et d'ions ferriques Fe^{3+} .

Phase de passivité :

C'est la plage où se trouvent les différentes phases condensées sous forme d'oxydes et d'hydroxydes qui recouvrent la surface du métal et le protègent contre les attaques de corrosion. Le métal a donc été oxydé en surface mais ce film le protège d'une agression en profondeur.

I.8. Les formes du la Corrosion

Si les processus élémentaires de la corrosion métallique humide sont toujours les mêmes, la morphologie de l'attaque peut prendre des formes très diverses, résultant de la répartition des zones anodiques et cathodiques à l'interface métal - électrolyte et, éventuellement, de l'interaction d'autres phénomènes (électriques, mécaniques, biologiques ...) avec la corrosion. Le classement suivant peut en être donné :

I.8.1. 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 [4]. L'attaque de la surface sera très importante si cette dernière est rugueuse. A l'échelle macroscopique on ne distingue pas les lieux cathodiques des lieux anodiques, la surface entière du métal est simultanément cathode et anode. La corrosion non uniforme est celle qui n'est pas répartie sur toute la surface (fig.I.3).

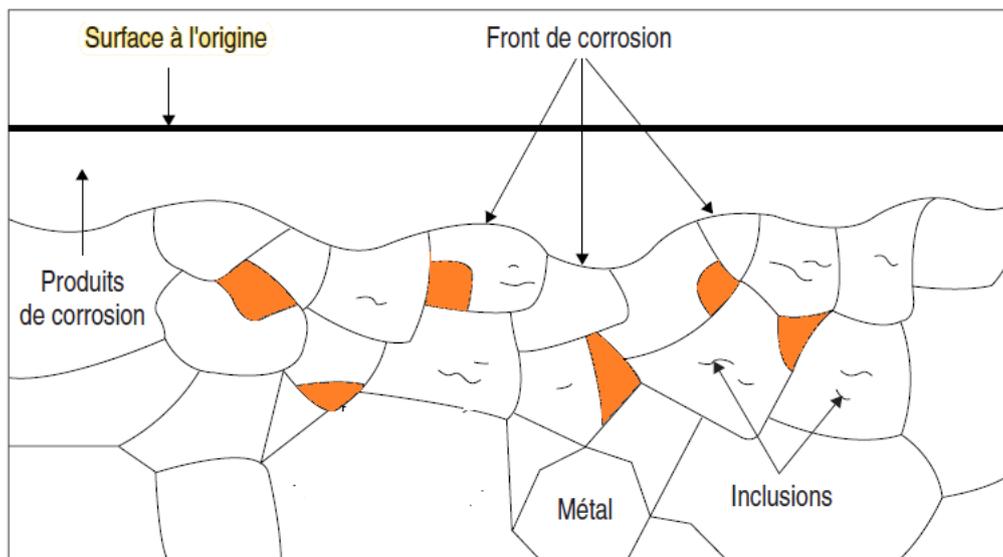


Figure I.3 : Représentation schématique de la corrosion généralisée

I.8.2. La corrosion localisée

Cette forme de corrosion représente un phénomène particulièrement dangereux puisque les produits de la corrosion ne sont pas nécessairement visibles et de plus, la perte de poids n'est pas toujours appréciable.

Les différents types de la corrosion localisée sont :

- Corrosion par piqûres.
- Corrosion par crevasses
- Corrosion intergranulaire (intercristalline).
- Corrosion sous contrainte.
- Corrosion avec érosion.
- Corrosion galvanique.

I.8.2.a La corrosion par piqûres

C'est une corrosion très localisée pouvant progresser très rapidement en profondeur, alors que le reste de la surface reste indemne. L'installation peut être perforée en quelques jours sans qu'une perte de poids appréciable de la structure apparaisse (Fig.I.4).

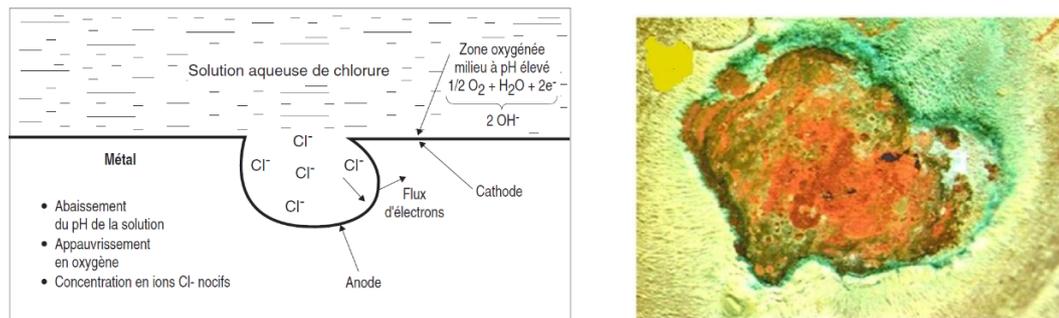


Figure I.4 : a) Mécanisme de la corrosion par piqûre, b) Corrosion par piqûres du cuivre dans l'eau potable [6].

Les facteurs de la corrosion par piqûres sont [5] :

1. Défauts de surface : la microstructure de la surface présente des « inclusions » qui se forment avant ou pendant la solidification du métal. Dans le cas du Fer, l'inclusion du soufre est très probable ceci engendre la formation du sulfure de fer (FeS) et par conséquent la corrosion par piqûre est déclenchée.
2. La composition du milieu : présence des chlorures, bromures et hypochlorites ClO^- sont les plus agressives. La présence du sulfures H_2S augmente la probabilité d'une corrosion par piqûre (détruit le film passive) et La présence d'un cation oxydant (Fe^{+3} , Cu^{+2} , Hg^{+2} , ...) permet la formation des piqûres même en absence d'oxygène.

I.8.2.b Corrosion caverneuse

Elle peut apparaître lorsqu'une pièce métallique est au contact d'un électrolyte dont le renouvellement n'est pas assuré : interstices entre matériaux de même nature, dépôts divers, sous matériau isolants, etc. Le processus de développement de la corrosion par crevasse (caverneuse), n'est pas fondamentalement différent de celui de la corrosion par piqûres. Cependant, la cinétique et la morphologie de l'attaque sont toutes autres. Celle-ci s'étend en largeur à la surface de l'interstice ou sous le dépôt, et non pas en profondeur comme pour les piqûres (fig. I.5).

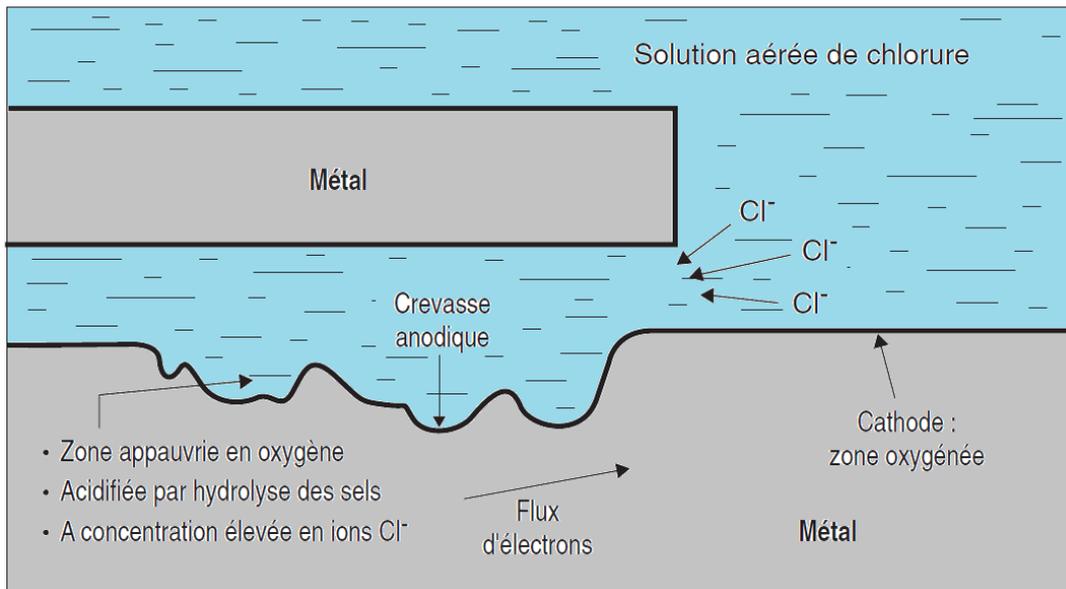


Figure I.5 : Schéma d'une pièce métallique qui présente une crevasse

I.8.2.c Corrosion galvanique

C'est en générale, lorsque deux métaux différents sont en contact ou reliés électriquement dans un milieu corrosif aqueux (Fig.I.6). La corrosion s'établit sur le métal le moins noble et s'arrête sur le métal le plus noble. Les sites anodiques et cathodiques sont distincts. Mais elle se manifeste aussi lorsque les deux parties d'un objet métallique d'un même métal ne sont plus au même potentiel à cause d'une hétérogénéité ou à cause d'un âge différent.

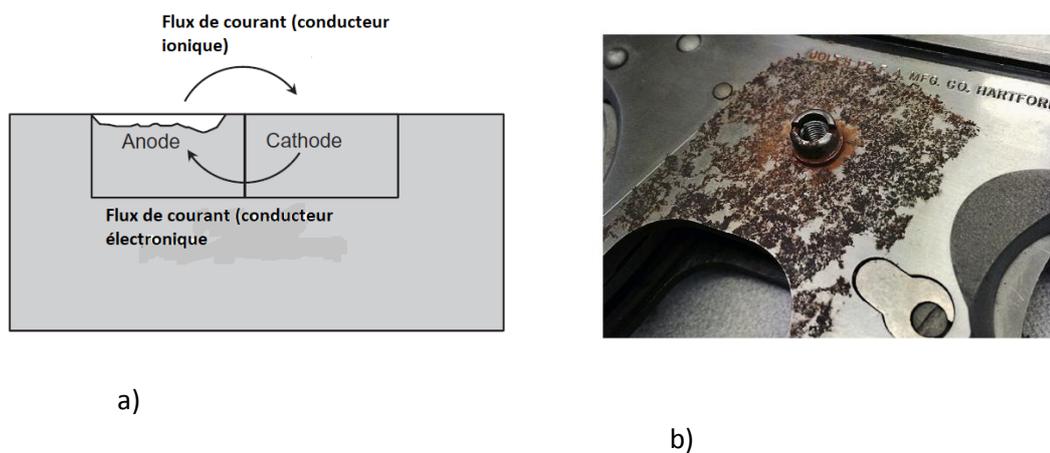


Figure I.6 : a) Schéma représentative de la corrosion galvanique

, b) Corrosion galvanique de l'acier inoxydable [7].

I.8.2.d Corrosion inter-granulaire

Ce type de corrosion se manifeste aux joints de grains. Ce phénomène peut provoquer des fissures qui affaiblissent les caractéristiques mécaniques du métal. Certains aciers inoxydables et alliages (fer, chrome, nickel) sont très affectés par ce mode de corrosion qui réduit de façon catastrophique leur résistance mécanique. Il peut être dû soit à la présence d'impuretés dans le joint de grain, soit à l'enrichissement (ou l'appauvrissement) local en l'un des constituants.

I.8.2.e Corrosion par érosion, abrasion, cavitation

Cette corrosion est produite par le mouvement relatif d'un fluide corrosif et d'une surface métallique. On a apparition de sillons, vallées, surfaces ondulées, trous... ayant un aspect directionnel caractérisé (queue de comète, sabot d'un cheval...).

I.8.2.f. Corrosion sous contraintes

La corrosion sous contrainte est une fissuration du métal qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique. Le processus se déroule en deux phases successives :

1. Une phase d'initiation qui correspond à la formation d'un défaut local en surface (piqûre),
2. Une phase de propagation dans laquelle la piquûre devient fissure et progresse jusqu'à la rupture.

Ce processus dépend essentiellement de l'intensité des contraintes imposées, de la nature du matériau (composition chimique et structure), de l'état de surface et du milieu corrosif et de la température.

I.9. Modes de protection contre la corrosion

La lutte contre la corrosion doit être une préoccupation constante, depuis conception des équipements jusqu'à leur entretien quotidien. Si les moyens à mettre

en œuvre sont variés et dépendent en grande partie des situations d'utilisation particulières, le but recherché est le même: enrayer la dégradation des équipements pour augmenter la durée de leur vie, en empêchant que se produisent les réactions électrochimiques qui entraînent une dissolution et une attaque du métal ; autrement dit, réduire ou même annuler la circulation des électrons de l'anode vers la cathode.

I.9.1. Protection par revêtements

I.9.1.a. Revêtements métalliques

Les revêtements métalliques sont couramment employés pour protéger l'acier, notamment contre la corrosion atmosphérique, on peut aussi les appliquer sur d'autres substrats comme le cuivre et ou le laiton, outre leurs effets anti – corrosion, il existe deux types de revêtements métalliques :

- Revêtements nobles ou cathodiques : Le métal à protéger est moins noble que le revêtement, tel que : un revêtement de nickel ou de cuivre sur l'acier.
- Revêtements moins nobles anodiques ou sacrificiel : Le substrat est plus noble que le revêtement, c'est le cas du procédé de galvanisation (revêtement de zinc).

I.9.1.b. Les revêtements organique

Les revêtements organiques forment une barrière plus ou moins imperméable entre le matériau et le milieu. Ils maintiennent la durabilité des structures et offrent une résistance aux intempéries, humidité, abrasion, résistance chimique, ténacité et aspect esthétique. Ils sont classés selon la composition chimique de la résine [8], les plus utilisées sont : les résines vinyliques, acryliques, alkydes (à base d'huile) et les alkydes modifiés au silicone.

Tableau I.1 : Composition d'une peinture [3].

Composants	Fonction
Résine	Protège la surface de la corrosion en fournissant un film homogène.
Solvants	Aide à transformer les résines solide en liquide pour permettre l'étalement de la peinture.
Additives	Aide à améliorer la qualité de la peinture.
Pigments	Fournit l'opacité, la couleur ainsi qu'une résistance à la corrosion.
Extenseur (composant inorganique)	Utilisé en présence des pigments pour améliorer les propriétés des liants. Exemple : talc, argile, silice, baryte.

I.9.2 Protection par inhibiteur

Un inhibiteur est une substance chimique que l'on ajoute en petite quantité au milieu pour diminuer la vitesse de corrosion du matériau métallique à protéger. Leur domaine d'utilisation recouvre les milieux acides, la vapeur, et les eaux de refroidissement. Les inhibiteurs diminuent la progression de la vitesse de corrosion par [2] :

- Augmentation de la polarisation anodique ou cathodique (droite de Tafel)
- Réduit la diffusion des ions vers la surface métallique.
- Augmente la résistance électrique de la surface métallique.

Cependant, il existe deux types d'inhibiteurs :

1. Les inhibiteurs organiques
2. Les inhibiteurs inorganiques.

Les différents types d'inhibiteurs organiques et inorganiques ainsi que leur domaine d'application sont illustrés sur le tableau ci- dessus:

Tableau I.2 : Certains systèmes corrosifs et leurs inhibiteurs appropriés [2]

Milieu	Inhibiteurs organiques	Métal	Concentration
Acides			
HCl	Ethylaniline MBT Pyridine phenylhydrazine Amines+oxyde d'éthylène	Fer	0,5% 1% 0,5%+0,5% 0,2%
H ₂ SO ₄	Phenylacredine	Fer	0,5%
H ₃ PO ₄	NaI	Fer	200ppm
Eau			
Eau potable	Ca(HCO ₃) ₂ Polyphosphate Ca(OH) ₂ Na ₂ SiO ₃	Acier, Fer Fe,Cu,Al,Zn Fe,Zn,Cu	10ppm 5-10ppm 10ppm 10-20ppm
Eau froide	Ca(HCO ₃) ₂ Na ₂ CrO ₄ NaNO ₂ NaH ₂ PO ₄ Morpholine	Acier, Fer Fe,Zn,Cu Fe	10ppm 0,1% 0,05% 1% 0,2%
Eau bouillante	NaH ₂ PO ₄ Polyphosphate Morpholine Hydrazine Ammoniaque Octadecylamine	Fe,Zn,Cu Fe	10ppm 10ppm Variable
Liquide de refroidissement	Na ₂ CrO ₄ NaNO ₂ Borax	Fer,Cu,Zn, Pb Fe	0,1-1% 0,1-1% 1%
Eau/Glycol	Borax + MBT	Tous les métaux	0,1-1%
Saumure	Na ₂ SiO ₃ Quartenaire Imidazoline	Fer	0,01% 10-25% 10-25%
Eau de mer	Na ₂ SiO ₃ NaNO ₂ Ca(HCO ₃) ₂ NaH ₂ PO ₄ + NaNO ₂	Zn Fer Tous les métaux Fer	10ppm 0,5% Dépends du pH 10ppm + 0,5%

I.9.3 Protection électrochimique

La corrosion électrochimique d'un métal est le résultat du passage d'un courant anodique dans les piles locales. Pour supprimer le phénomène de corrosion, il faut porter le métal à un potentiel pour lequel l'intensité de la réaction élémentaire anodique est nulle ou très faible. Deux types de protection électrochimiques peuvent être envisagés :

- Protection cathodique.
- Protection anodique.

I.9.3.1 Protection cathodique

La corrosion d'une pièce métallique peut être empêchée par la protection cathodique. Elle est surtout utilisée pour la protection des canalisations métalliques (tuyauteries) souterraines ou les constructions se trouvant en contact avec l'eau, tels que les câbles, les réservoirs, les conduites, etc. L'avantage de la protection cathodique est la grande économie avec une utilisation pratiquement illimitée.

La protection cathodique a obtenue aussi une grande importance dans l'application dans le domaine de transport du pétrole et gaz. Le principe de la protection cathodique consiste à abaisser la tension métal-milieu de manière à l'emmener dans sa zone d'immunité. Par convention, le courant circule du positif (+) vers le négatif (-), par conséquent le métal est protégé si le courant entre dans la structure en provenance de l'électrolyte. Dans le cas contraire, si le courant passe de la structure à l'électrolyte, la corrosion est accélérée, le courant de protection est produit soit par :

- L'anode réactive ou sacrificielle. Dans ce cas la force électromotrice (f-e-m) nécessaire, est obtenue à partir de la différence entre la tension moyenne du couple de corrosion et la tension propre (plus négative) d'une anode dite sacrificielle.
- Un courant imposé, en utilisant un générateur extérieur de f-e-m, réglable et une anode auxiliaire. Deux paramètres fondamentaux contrôlent la protection cathodique : le potentiel de protection et la densité de courant de protection.

I.9.3.1.a La protection par anode sacrificielle

L'anode sacrificielle forme une pile électrochimique avec le métal à protéger qui joue le rôle de cathode. L'anode sacrificielle doit avoir un potentiel réversible inférieur à celui du

métal à protéger. Pour protéger l'acier par exemple on utilise des anodes sacrificielles en Zn, Mg ou Al ainsi que leurs alliages. Les anodes sacrificielles doivent satisfaire aux conditions suivantes :

- Avoir un potentiel d'électrode suffisamment négatif pour pouvoir polariser rapidement le matériau à une valeur suffisante;
- Elles ne doivent pas se polariser lors du passage du courant. En particulier, les produits de corrosion ne doivent pas former de film adhérent susceptible de modifier la valeur du potentiel;
- Elles doivent enfin avoir un coût économiquement supportable. Dans la pratique, seuls trois matériaux satisfont ces critères : ce sont le zinc, l'aluminium, et le magnésium.

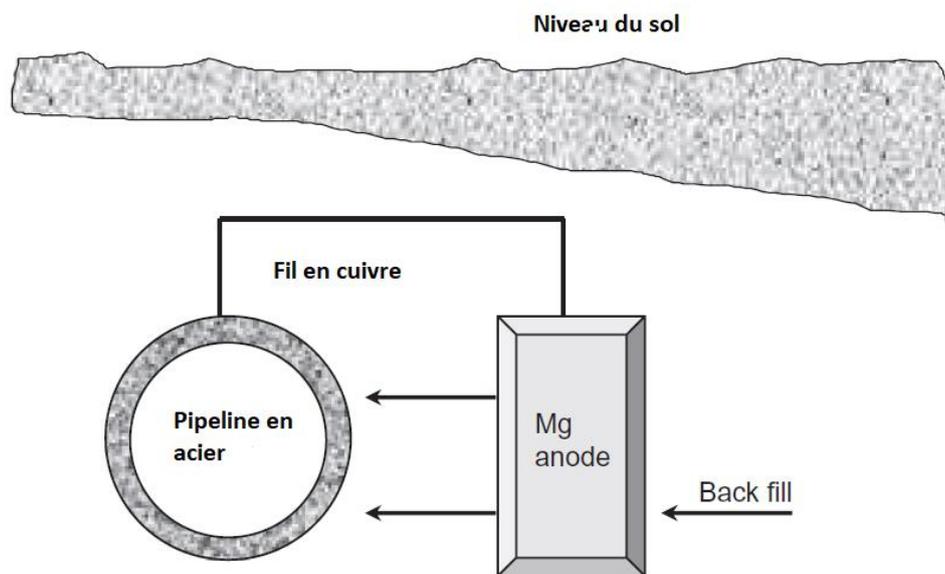


Figure I.7 : Protection d'un pipeline souterrain avec une anode en magnésium

I.9.3.1.b La protection par courant imposé

Elle implique l'utilisation d'un redresseur. Cette technique offre l'avantage de pouvoir régler la tension ou le courant selon le besoin. La protection cathodique est généralement utilisée en association avec un autre mode de protection conventionnel par revêtement ou par peinture, ceci afin de limiter la densité de courant fournie par les anodes ou le générateur. Parmi les principaux domaines d'application on peut citer :

- Les structures enterrées : il s'agit des canalisations, des réservoirs de stockage, etc. La disposition des anodes est fonction de la taille des installations.
- Les structures immergées : carènes ou installations fixes (jetées, appontements, plates-formes de forage offshore) en eau de mer ou en eau douce.

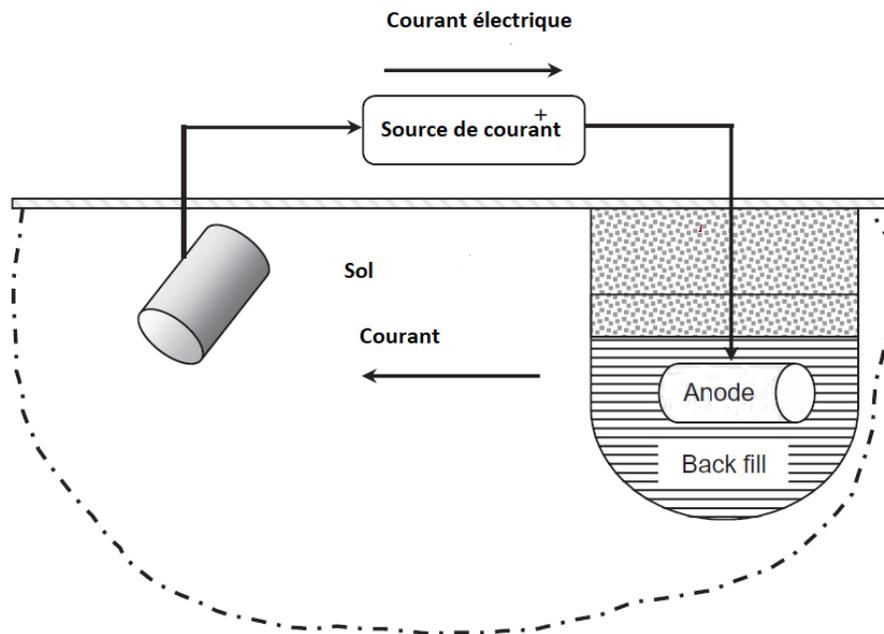


Figure 8 : Schéma du système de protection cathodique par courant imposé.

I.8 Conclusion

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

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

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

CHAPITRE II

Protection cathodique par courant imposé

II.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à une étude détaillée des systèmes de protection cathodique par courant imposé. D'abord utilisés pour protéger les pipelines enterrés transportant du pétrole et des gaz dans les années 20, Au cours des décennies successives, un immense développement dans les systèmes de protection cathodique a été accompli. Au début de ce siècle, des milliers de kilomètres de canalisations et de câbles enfouis sont efficacement protégés par protection cathodique. La protection cathodique est également appliquée aux réservoirs de stockage, aux navires, structures de forage en mer, condenseurs et ponts en béton.

II .2 Corrosion par sol

Les sols sont loin d'être des milieux homogènes ; ils présentent en effet, d'un site à l'autre des caractéristiques très variées. Le caractère corrosif des sols est fonction des paramètres suivants :

- ✓ Leur perméabilité à l'air et à l'eau, qui dépend de leur porosité et de la granulométrie des matériaux constitutifs ;
- ✓ Leur taux d'humidité ;
- ✓ Leur teneur en sels ;
- ✓ Leur alcalinité ou leur acidité (pH).
- ✓ Leur conductibilité électrique.

En général, ce sont ces deux derniers paramètres que l'on mesure. Dans la plus part de cas, le pH des sols est compris entre 6 et 9.

Quand une conduite traverse des sols de nature différente, le potentiel d'équilibre du métal, avec chacun de ces milieux, peut être différent, ce qui entraîne la formation des zones cathodique et de zones anodique [10].

II .2.1 Agressivité du sol

Considérée comme la principale caractéristique qui contribue directement au processus de corrosion des structures enfouies. Un sol résistif a un faible apport sur le processus de corrosion tandis qu'un sol de faible résistivité permet l'activation et la propagation rapide de

la corrosion et, par conséquent, une apparition importante du nombre de bris sur les conduites du réseau.

À cet effet, la connaissance de la résistivité du sol entourant les conduites sert à estimer la corrosivité du sol, à déterminer les zones exposées à la corrosion et aussi à établir des plans d'intervention et de prévention en fonction des priorités [11].

Les limites de résistivité considérées sont présentées au Tableau (1.2) dans lequel cinq classes de sol sont ainsi définies en fonction de leur résistivité et de la corrosivité associée à chacune d'elles.

Tableau (1.2): Corrosivité du sol selon la résistivité [11].

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

II .2.1.a Méthode de mesure de la résistivité du sol

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

Cette technique présente de nombreux avantages dont entre autres sa caractéristique non destructive, capacité de fournir de hautes résolutions, relevé de mesure rapide et données facilement interprétables [11].

II .2.2.b Principe de mesure de la résistivité du sol

Tel qu'illustré sur la Figure (1.10), on fait circuler un courant d'intensité I entre les deux piquets extérieurs et on mesure la différence de potentiel ΔE qui en résulte par l'effet Ohmique entre les deux piquets intérieurs.

Les valeurs obtenues des mesures de I et ΔE permettent de calculer la résistivité du sol selon l'équation 1.2.

Comme le sol n'est pas homogène, la valeur obtenue par la mesure ne correspond pas à la résistivité réelle du sol mais plutôt à une moyenne des résistivités des diverses couches le constituant. Ainsi, cette valeur est appelée la résistivité apparente.

La résistivité moyenne du sol peut être déterminée à partir de la résistance mesurée par l'Ohmmètre. Toutefois, la connaissance de la distance entre chaque piquet de terre est nécessaire dans chaque mesure.

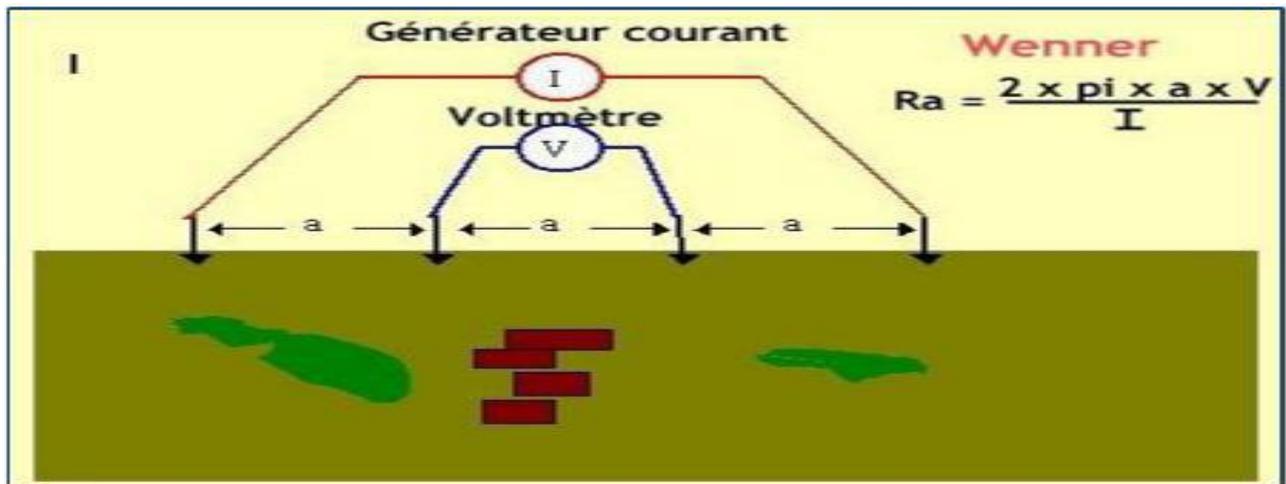


Figure (1.10): Principe de fonctionnement de la méthode de Wenner.

La résistivité moyenne du sol (ρ) peut être calculée en fonction de la résistance moyenne du sol mesuré avec l'application de la formule 1.2.

Où

$$\rho = 2 \pi R d \quad (1.2)$$

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

R : Résistance moyenne du sol (Ω).

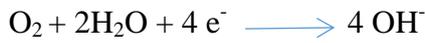
d : Espacement entre deux piquets (cm).

II.3 Principe de la protection cathodique

La protection cathodique est définie comme étant la réduction ou l'élimination de la corrosion en faisant du métal une cathode au moyen d'un courant imposé ou d'une anode sacrificielle (généralement magnésium, aluminium ou zinc) [12]. Cette méthode utilise la polarisation cathodique pour contrôler la cinétique de la réaction qui se produit sur l'interface

métal-électrolyte. Le principe de la protection cathodique s'explique par la théorie du potentiel mixte élaborée par Wagner-Traud [13].

Prenant l'exemple de la corrosion du fer dans un électrolyte neutre aéré, les réactions susceptibles de se produire sont les suivantes :



La relation entre les densités de courant « i (A/cm^2) » anodiques et cathodiques pour le système ci-dessus est présentée sur la Fig. II.1. Dans laquelle la théorie du potentiel mixte et les équations cinétiques ont été utilisées pour expliquer la corrosion du fer.

En général, à l'interface électrolyte/métal, le métal s'oxyde (réaction anodique) en même temps que la réduction de l'oxygène pour former les ions hydroxydes OH^{-} (réaction cathodique). L'intersection entre la branche anodique et la branche cathodique selon le diagramme d'Evans du ce système (Fig. II.1) permet de déterminer le potentiel de corrosion E_{CORR} (appelée aussi **potentiel mixte**) ainsi que la densité de courant correspondante i_{CORR} .

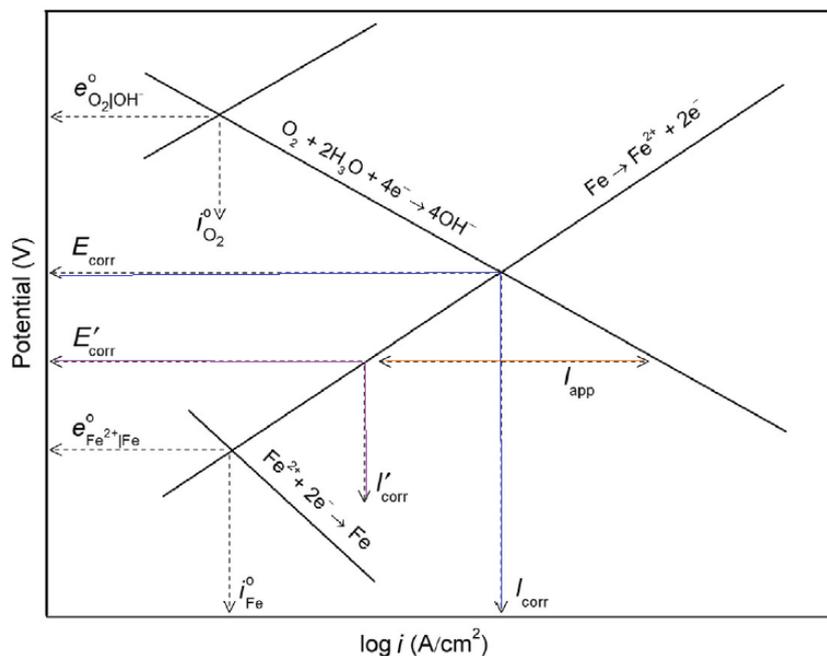


Figure II.1 : Diagramme d'Evans – principe de la protection cathodique.

II.4 Fonctionnement d'une installation de protection cathodique à courant imposé ICCP

La Figure II.2 montre les différents éléments qui composent l'installation :

1. Le transformateur redresseur (ou source de courant continu)
2. Les anodes ou déversoirs.
3. Les câbles de jonction (anodique et cathodiques).
4. Le backfill.

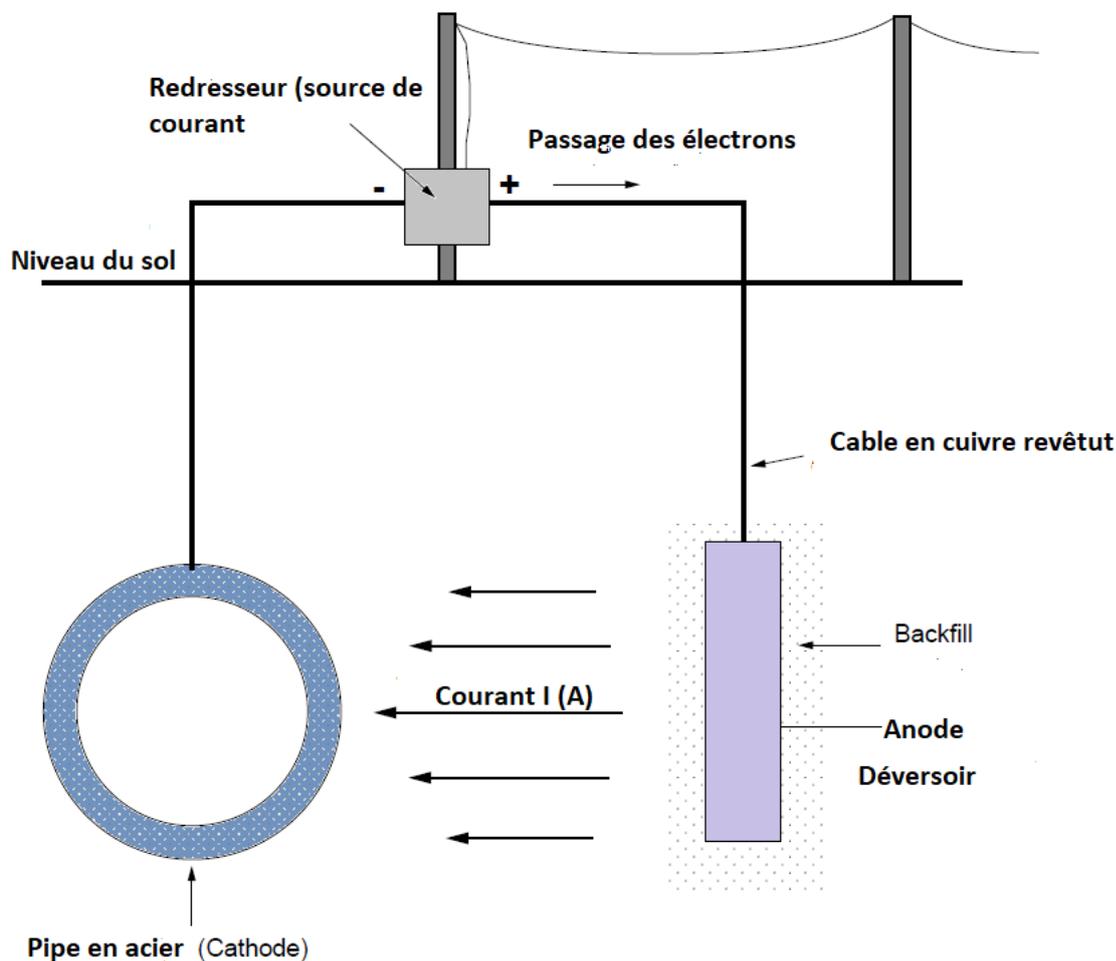


Figure II.2 : Schéma du principe de ICCP

Le pôle positif de la source est relié au déversoir alors que le pôle négatif est relié à la structure à protéger.

Le courant venant du déversoir traverse l'électrolyte, puis entre dans la structure créant ainsi un abaissement de potentiel recherché correspondant à l'immunité du métal.

II.4.1 Potentiel de protection

Le potentiel de protection nécessaire pour les systèmes de protection cathodique par courant imposé est probablement aux alentours de **-850 mV/E** (Cu/CuSO_4) [14]. Cependant, en présence de sulfures, bactéries, températures élevées, environnements acides et différents métaux, le critère de 850 mV peuvent ne pas être suffisant [15]. Selon la NACE, il faut également tenir compte de la chute de potentiel à l'interface métal-sol, qui est incluse dans la plupart des mesures pratiques du potentiel de protection qui relie directement à la résistance de l'électrolyte (sol).

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

II.4.2 Le revêtement associé à la protection cathodique

La protection cathodique est systématiquement utilisée dans un système qui associe une protection passive et une protection active.

Les revêtements sont souvent associés à la protection cathodique afin de [16] :

- Offrir une protection supplémentaire contre la corrosion et de façon "passive",
- Aider la protection cathodique dans les rôles suivants :
- Limiter le courant consommé,
- Réduire la consommation des anodes,
- Assurer une polarisation plus rapide,
- Assurer une portée de la protection cathodique dans les structures complexes,
- Assurer une meilleure répartition du courant dans la structure,
- Réduire le coût global de la protection.

II.4.3 Résistance du sol

La résistance du sol est l'un des facteurs les plus importants dans le choix de :

- L'emplacement de la protection cathodique.
- Le type d'anode et le nombre d'anodes nécessaires [17],
- La longueur et le diamètre du Backfill,
- La tension du redresseur.

Les sols marécageux ont une faible résistance, tandis que les sols rocheux peuvent avoir une résistance de plusieurs milliers d'Ohms [18]. De même, le courant augmente

considérablement dans les sols à faible résistance. Par conséquent, ces types de sols se révèlent plus corrosifs que des sols de haute résistivité.

II.4.4 Le déversoir (Anodes)

Les anodes utilisées dans les systèmes de protection à courant imposé ne doivent pas nécessairement être moins noble que le matériau de la structure à protéger, ces anodes sont généralement fabriquées à partir de matériau résistant à la corrosion afin de limiter leur consommation. Pour le choix de l'anode on doit tenir compte de [3] :

- Faible taux de consommation,
- Polarisation faible,
- Conductivité électrique élevée et faible résistance à l'interface anode/électrolyte,
- Résistance élevée à l'abrasion et à l'érosion,
- Facilité de fabrication sous différents formes,
- Un coût faible.

Les anodes utilisées selon la NACE (10A196) (National Association of Corrosion Engineering's) sont représentées sur le Tableau II.1, qui représente une excellente description détaillée des matériaux anodiques utilisés pour les structures enterrées.

Tableau II.1 : Exemples d'anodes utilisées dans différents systèmes.

Environnement marin	Béton	Eau potable	Structure enterrée
Surface platinée	Surface platinée	Graphite	Graphite
Fer, Acier	Métaux mixtes d'oxydes	Aluminium	Ferrosilicium
Métaux mixtes d'oxydes	Polymères	Fer, Acier	Ferro silicium
Zinc		Ferrosilicium	Fer, Acier
Silicium-Chrome			Silicium-Chrome
			Métaux mixtes d'oxydes
			Surfaces platinées

En pratique, l'implantation des déversoirs doit impérativement s'écarter d'au moins 50m de la canalisation et de tout ouvrage métallique enterré susceptible de capter les courants déversés.

On distingue deux types d'emplacement :

- Les déversoirs verticaux : les anodes sont enterrées verticalement dans un trou creusé au fond d'une tranchée à une profondeur de 1m et 2m selon la nature du sol (FigII.2.a).
- Les déversoirs horizontaux : ce type de pose est conseillé lorsqu'on dispose de terrain ou bien lorsque la résistivité du sol est faible (Fig. II.2.b).

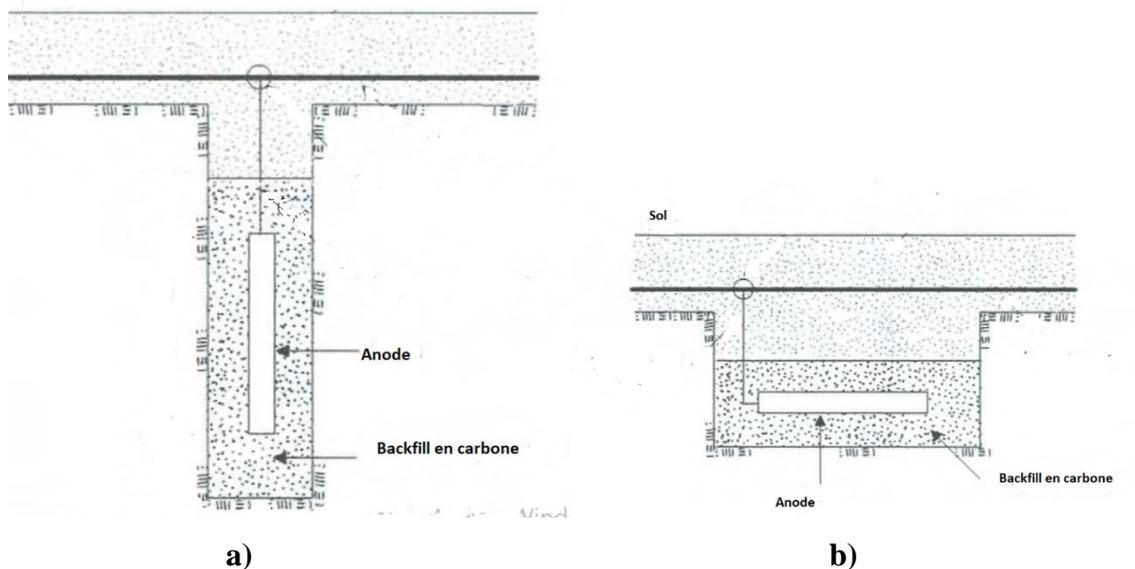


Figure II.2 : a) Déversoir horizontal, b) Déversoir vertical

II.4.5 Les câbles de jonction

Les câbles à gaine métallique sont évitables, il est préférable d'utiliser des gaines non métalliques telles que le PVC qui est le plus utilisable dans l'industrie. Il est généralement conseillé d'utiliser des câbles d'une section minimale de 25 mm^2 pour réduire le phénomène de la chute de tension et de chauffage des câbles.

La sortie de courant de l'anode à la structure désirée pour être protégée à travers le câble, peut provoquer une rupture de l'isolant qui entoure le câble dans ce cas le métal du câble se comportera comme une anode.

II.4.6 Générateur de courant

Appelé aussi « redresseur » ou « rectificateur », habituellement constitué par un transformateur-redresseur alimenté à partir du réseau électrique basse tension 220 V.

Les réglages de la tension et du courant de sortie se font à partir d'un roto transformateur.

Tous les appareils sont munis d'indicateurs pour le contrôle de leur fonctionnement, et de systèmes de protection par fusibles.

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 tels que : énergie solaire, groupe électrogène, accumulateurs et piles.

II .5. Avantages de l'utilisation de système de la protection cathodique par courant imposé ICCP

Certains des avantages de l'utilisation du système de la protection cathodique par courant imposé comprennent:

- **Zone protégée efficace plus grande**

L'utilisation d'une alimentation externe force la cellule électrochimique à fonctionner, ce qui lui permet d'avoir une plus grande zone de protection efficace.

- **Protection anticorrosion à plus long terme**

Étant donné que les potentiels d'électrode ne jouent pas un rôle significatif dans les systèmes de la protection cathodique par courant imposé, les anodes peuvent être sélectionnées en fonction d'autres facteurs critiques, tels que la densité de courant, les taux de consommation, le coût des matériaux et la longévité. Cela permet aux propriétaires d'actifs de se procurer des anodes qui durent plus longtemps, ce qui peut avoir un effet global positif sur les budgets de réparation et d'entretien.

- **Contrôle et surveillance plus faciles**

La présence d'une alimentation externe permet de surveiller et de contrôler les performances du système de la protection cathodique par courant imposé. Les opérateurs peuvent effectuer des relevés mensuels, ce qui leur permet d'effectuer les ajustements nécessaires pour tirer le meilleur parti du système.

Bien que le système de la protection cathodique par courant imposé offre des avantages significatifs par rapport à leurs homologues passifs, ils peuvent être plus chers car ils nécessitent un équipement supplémentaire lors de l'installation. Par conséquent, les propriétaires d'actifs devraient évaluer la taille et le type de structure à protéger pour décider si le système de la protection cathodique par courant imposé est la bonne solution de protection contre la corrosion.

II.6 Dimensionnement d'un système de ICCP

Le dimensionnement de la protection cathodique est une affaire de spécialiste. Néanmoins, il est utile de donner quelques principes de base.

Il s'agit tout d'abord de mesurer, quand cela est possible, mais le plus souvent d'estimer par le calcul, le besoin en courant cathodique de la structure, c'est à dire le courant qu'elle doit recevoir pour que le seuil de protection soit atteint. Il s'agit d'utiliser des hypothèses déduites de l'expérience.

Le besoin en courant de protection sert à la détermination de la masse et du nombre d'anodes, ainsi qu'au dimensionnement électrique de la source de courant du poste de soutirage (protection par courant imposé). Le courant délivré doit être estimé au mieux, non seulement pour des considérations économiques, mais aussi à cause de certains effets néfastes tels que le décollement des revêtements lorsque le courant est trop important.

Dans un système à courant imposé, la protection cathodique se définit par les paramètres suivants :

- La densité de courant de protection, qui est l'intensité par unité de surface, dépendant essentiellement de la qualité de l'isolement du revêtement et de l'agressivité du milieu environnant;
- Les caractéristiques du générateur.

II.6.1 Le débit du générateur de courant

Défini par la loi d'Ohm :

$$I = \frac{U}{R}$$

Où U est la tension du générateur en de courant continu et R résistance du circuit.

La tension se situe en général dans la catégorie très basse tension et la résistance du circuit est conditionnée principalement par la résistance des déversoirs.

II.6.2 Calcul de la résistance des déversoirs anodiques

II.6.2.a Déversoirs verticaux

Le calcul de la résistance vertical de l'anode est basé sur la formule de Dwight [19]

$$R_v = \frac{\rho_s}{2\pi L} \left(\ln \frac{8L}{d} - 1 \right)$$

R_v : résistance de terre en Ω .

ρ_s : étant la résistivité du milieu en $\Omega \text{ m}$

l : la longueur de l'anode en mètre.

d : diamètre de l'anode en mètre.

II.6.2.b Déversoirs horizontaux

Si les anodes sont utilisées horizontalement, la relation est donnée par la formule modifiée de Dwight :

$$R_H = \frac{\rho_s}{2\pi L} \left(\ln \left[\frac{4L^2 + \sqrt{(2h)^2 + L^2}}{2dh} \right] + \frac{2h}{d} - \frac{\sqrt{(2h)^2 + L^2}}{L} - 1 \right)$$

R_H : résistance de terre en Ω .

ρ_s : étant la résistivité du milieu en $\Omega \text{ m}$

l : la longueur de l'anode en mètre.

d : diamètre de l'anode en mètre.

h : est la profondeur sous la surface du sol jusqu'au centre de l'anode en mètre.

II.6.3 Calcul de la résistance d'isolement de revêtement

Un revêtement est caractérisé par sa résistance électrique (R_e) qui dépend de la résistivité de celui-ci.

Cette résistance est liée à la conduction et à l'épaisseur du revêtement considéré.

La résistance du revêtement est calculée d'après la formule suivante :

$$R_{is} = \frac{R_{is}(t_0)}{(\beta \cdot t)(1 - \exp(-\beta \cdot t))}$$

R_{is} : Résistance isolement en Ω .

$R_{is}(t_0)$: Résistance isolement en Ω à temps = 0.

β : Coefficient de vieillissement du revêtement.

t : temps en seconde.

II.6.4 Calcul du courant de distribution et potentiel de distribution sur la structure protégée

Ce calcul est valable uniquement pour les conduites enterrées, pour déterminer la distribution du potentielle « E_x » en fonction de la distance x le long d'une canalisation revêtue de longueur infinie sont données par les équations d'atténuation :

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_0 \exp(-\alpha x) \\ i_x &= I_0 \exp(-\alpha x) \end{aligned} \right\}$$

E_x : potentiel à la limite de protection de la structure.

E_0 : potentiel au point de soutirage (au niveau du redresseur)

i_x : courant entrant dans la structure en un point quelconque x.

I_0 : courant entrant au point de soutirage.

α : le coefficient d'atténuation qui est calculé à partir de l'équation :

$$\alpha = \frac{R_s}{R_k}$$

R_s : résistance longitudinale de la conduite par unité de longueur et R_l est la résistance aux fuites de la conduite.

$$R_k = (R_s R_l)^{1/2}$$

$$R_L = (E_x - E_o) / (I_x - I_o)$$

Les équations d'atténuation entre deux points de soutirage séparés par une distance L sont :

$$\left. \begin{aligned} E_x &= \frac{E_o \cosh \alpha(L - x)}{\cosh \alpha L} \\ i_x &= \frac{I_o \sinh \alpha(L - x)}{\sinh \alpha L} \end{aligned} \right\}$$

II.6.6 Calcul de la masse anodique

Le calcul de la masse de l'anode « M_a » pour une durée de vie « t » et un taux de consommation connu est déterminé à partir de l'équation :

$$M_{\text{anodique}} = m \cdot I \cdot t$$

M_{anodique} : masse de l'anode nécessaire pour une durée de vie donnée.

m : le taux de consommation de l'anode en Kg/A.an.

I : courant électrique en Ampère.

t : durée de vie.

En général, le taux de disparition de l'anode de type silicium-fer est de 0.5Kg/A. Ans. Le nombre d'anode nécessaire à la protection cathodique est :

$$N_A = \frac{M_{\text{anodique}}}{M_a}$$

N_A : nombre d'anode nécessaire.

M_a : masse d'une anode.

II.7 Conclusion

Cet bref aperçu sur le système de protection cathodique à courant imposé, démontre son intérêt industriel pour la protection des structures métalliques enterrées dans le sol.

Plusieurs facteurs déterminent l'efficacité du système; le degré d'agressivité du sol est l'un des facteurs, un sol très corrosif (faible résistivité) a une vitesse de corrosion très élevée contrairement au sol peu corrosif (grande résistivité) où le taux de corrosivité est très faible.

Autre facteur qui est les difficultés techniques qui sont en rapport avec tous les ouvrages métalliques situés au voisinage tels que : lignes à haute tension, prises de terre, sont à prendre en considération car leurs effets se répercutent négativement sur la protection de l'ouvrage.

Chapitre III

Partie pratique

III. Partie pratique

III.1 Introduction

Dans la partie pratique de notre mémoire, nous avons choisi le système de protection cathodique par courant imposé du complexe GP1/Z qui a pour rôle de protéger les canalisations enterrées des réseaux eau incendie, réseaux eau de mer et pipe gaz naturel.

Dans une première partie, une description détaillée du système de protection a été décrite, dans laquelle nous avons mis en évidence les caractéristiques des principaux composants d'un poste de soutirage comme : le redresseur, le lit de soutirage et les câbles de jonction. Nous avons montré également le mode d'inspection du système de protection, toutes les données techniques présentées dans ce mémoire sont tirées des manuels techniques du complexe.

Enfin, nous avons terminé notre travail par des calculs des caractéristiques de la masse anodique ainsi sa résistance dans le sol et le courant de sorti de l'anode.

III.2 Description du système de la protection cathodique du GP1Z

Le système de protection cathodique est du type courant imposé .L'énergie est assurée par l'intermédiaire de 03 postes de soutirage de caractéristiques identiques : 80 V ; 50A et 03 postes de soutirage de caractéristiques : 50 V ; 10A.

Chaque poste couvre une partie du réseau, et soutire le courant à une série de 09 anodes, posées verticalement dans des trous individuels.

Les anodes sont connectées à des résistances variables qui permettent une régulation du débit du lit. Toutes les anodes sont montées en parallèle et raccordées au pôle « positif » du transformateur redresseur par l'intermédiaire d'un câble de tête installé en tranchée, d'une section de 14 mm².

Le pôle négatif du transformateur/redresseur est relié à la structure protégée par l'intermédiaire d'une boîte de jonction installée près de la canalisation.

Des câbles à double protection de 14 mm² de section, assurent la liaison entre les transformateurs/redresseurs et soit la structure à protéger, soit le lit d'anode.

- Les brides d'assemblage de la tuyauterie enterrée sont shuntées par câble isolé de 38 mm² assurant la continuité électrique de l'installation.

- Les postes incendie sont isolés du reste de la structure par des joints d'isolement en Téflon et en Bakélite.
- Des shunts de 38 mm² de section, assurent l'équipotentialité entre le réseau incendie et les réseaux eau potable et air instrument (tout le système d'assemblage des brides est isolé : rondelles, écrous, fourreaux).
- 38 prises de mesure sont installées à proximité des pipes, et couvrent l'ensemble du réseau ; elles sont constituées d'un câble de 5,5 mm², soudés sur les brides, et émergeant dans une boîte de mesure montée sur poteau.
- Des cellules en zinc, enterrées dans un lit de backfill à base de bentonite et de gypse, protègent les joints isolants contre les surintensités et les personnes contre les défauts d'isolement.

III.2.1 Canalisations Protégées

Les canalisations protégées sont :

1. Canalisation souterraine des réseaux eau incendie,
2. Canalisation souterraine du gaz naturel
3. Canalisation souterraine d'eau potable

Dont les propriétés de chaque canalisation sont répertoriées sur le **Tableau III.1** :

Tableau III.1 : Propriétés des canalisations protégées.

DESIGNATION	DIMENSION	SURFACE
Pipe gaz naturel	16'' à 42 ''	20 51 m ²
Pipe eau de mer	6'' à 40''	18670 m ²
Pipe eau de mer	1'' à 4''	63 m ²
Pipe eau potable		34 m ²
Pipe air instrument		8 m ²
* Brides		1300 m ²

III.2.2 Spécifications des anodes

Les anodes utilisées pour la protection cathodique sont de formes cylindriques (**Figure III.1**) posées verticalement dans le sol (**Figure III.2**). L'emplacement des anodes s'effectue dans un électrolyte qui est l'eau de mer. Les anodes sont installées à 3 mètre d'environ au-dessous du sol. Les principales caractéristiques sont groupées dans le **Tableau III.2**.

Tableau III.2 : Propriétés des anodes fer-silicium.

Type d'anode	Fer-silicium
Composition	Si : 14,5 -15,5% C : 0,6-1,0% Mn < 0,5% P < 0,08 % S < 0,08%
Poids (Kg)	10,4-20,2
Consommation massique ($\text{KgA}^{-1}.\text{ans}^{-1}$)	0,25
Durée de vie (ans)	20



Figure III.1 : Anodes de types ferro-silicium.



Figure III.2 : Anode posée verticalement dans l'eau de mer.

III.2.3 Spécifications des redresseurs/rectificateurs

Les transformateurs/redresseurs assurent la distribution du courant électrique sur les canalisations installées dans des zones appelées : Phase I, Phase II et Phase III, dont les caractéristiques (tension/courant) sont [21,22] :

- Phase I : (50 V ,10 A)
- Phase II : (50 V ,10 A)
- Phase III : (50 V ,10 A).

III.2.4 Câbleries

Câble de tête des anodes

Les câbles de tête des lits d'anodes sont des câbles du type 600V, de 14mm² de section à double protection. Ils sont reliés au pôle positif des transformateurs redresseurs par intermédiaire de la boîte de jonction centrale.

Les câbles d'anodes sont des câbles de 600V de 8mm² de section à double protection, reliés au câble de tête par l'intermédiaire des boîtes de jonction installées près des lits.

Les câbles shunt

L'équipotentialité entre le réseau incendie et les réseaux annexes (eau potable et air instrument) est assurée par des shunts de 38mm², 600V à double revêtement et isolés du sol.

Câble retour

Le câble retour structure/redresseur (pole négatif) est un câble de 14mm², 600 V, à double revêtement. La liaison câble/structure est assurée par l'intermédiaire d'une boîte de jonction accessible.

III.2.5 Joints d'isolement

Les joints d'isolement entre la structure immergée (souterraine), et les parties apparentes, sont en Bakélite de 3mm d'épaisseur pour la zone pomperie eau de mer et en Téflon pour les autres zones. Les accessoires de fixation sont isolés de la partie métallique conductrice.

Les assemblages des tronçons de pipe sont bridés et shuntés par câble de 38 mm², 600V, à double revêtement.

III.2.6 Cellules de mise à la terre

Les mises à la terre des joints d'isolement sont assurées par des anodes en zinc en rondins de 1000 mm de long et de 42 mm de diamètre. La composition de l'anode en zinc est telle qu'elle contient moins de 0.0015% de fer, exigée par les anodes sacrificielles.

Le câble de fixation de l'anode est un câble à double protection de 22mm² de section.

III.3 Configuration des systèmes de protection cathodique

III.3.1 Système de protection cathodique phase I et phase II

Ce système est divisé en trois (03) zones, ON SITE, OFF SITE et PIPE RTO [21].

Les caractéristiques générales de la phase I sont :

Cinquante (50) anodes réparties sur quatre (04) lits de soutirage.

Masse de chaque anode : 20,2 Kg.

Dimensions (D X L) : 165,2 mm de diamètre et 2000 mm de longueur.

Composition de l'anode : Si : 14,5 -15,5%, C : 0,6-1,0%, Mn < 0,5%, P < 0,08 %, S < 0,08%.

Consommation massique : 0,25 Kg.ans⁻¹.A⁻¹.

III.3.2 Système de protection cathodique phase III

Ce système est divisé en deux (02) zones, ON SITE et OFF SITE [22]:

Trente (54) anodes réparties sur quatre (04) lits de soutirage.

Masse de chaque anode : 10,4 Kg.

Dimensions (D X L) : 165 mm de diamètre et 2000 mm de longueur.

Composition de l'anode : Si : 14,2 -14,75%, C : 0,7-1,1 %, Mn :1,5%, Cr : 3,25.5 %, Mo : 0,2%, Cu : 0,5%.

Consommation massique : 0,25 Kg.ans⁻¹.A⁻¹.

III.4 Mesure du potentiel de la canalisation enterrée

La mesure du potentiel de la canalisation à protéger doit être effectuée au niveau de chaque boîte de prise de potentiel pour tous les systèmes de protection cathodique phase I, II et III.

Cette prise de potentiel est effectuée chaque trois mois à l'aide d'une électrode de cuivre/sulfate de cuivre saturé (Cu/CuSO₄) selon les étapes suivantes (**Figure III.3**) :

- L'électrode de référence doit être placée sur le sol près du PIPE,
- L'électrode de référence doit être enfoncée de 5cm environ dans la terre,
- S'assurer qu'elle est en bon contact avec le sol,
- Si la terre est très sèche, verser de l'eau aux alentours de l'électrode de référence.

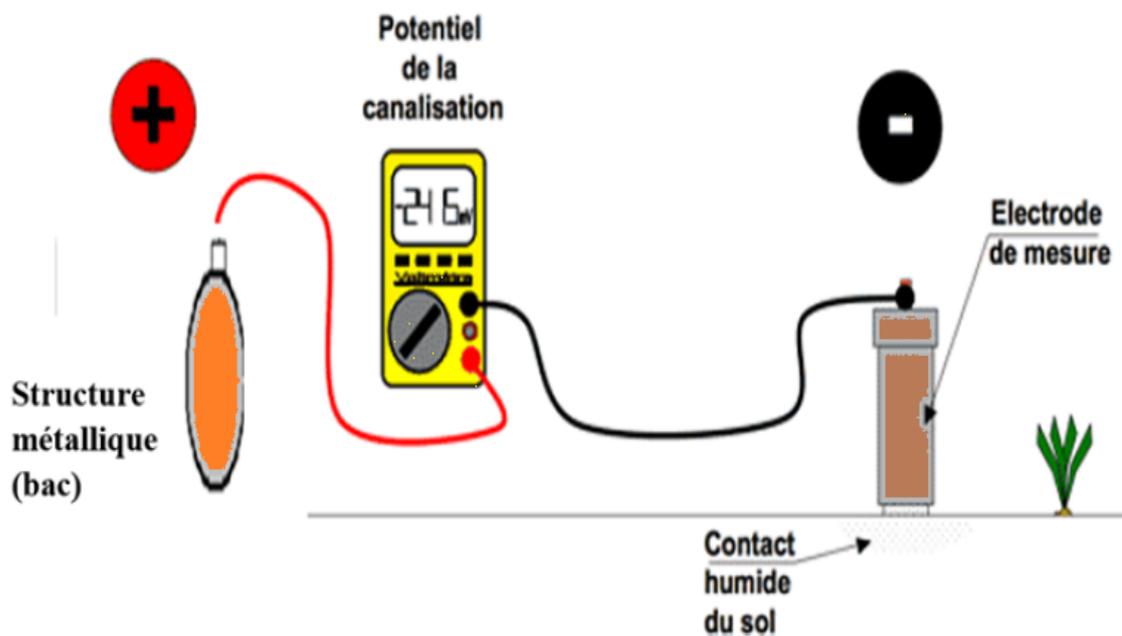


Figure III.3 : Mesure du potentiel de la canalisation enterrée.

Si la valeur du potentiel est inférieure ou égale à (-850 mV) au niveau de chaque point de mesure, le système de protection cathodique peut être jugé efficace, et par conséquent la canalisation souterraine est protégée contre la corrosion.

Pour le système de la phase III, une électrode de référence fixe (zinc) est installée au niveau de certains points de mesure tel que illustré dans la **Figure III.4** et ceci pour permettre une visualisation des valeurs relevées à distance.

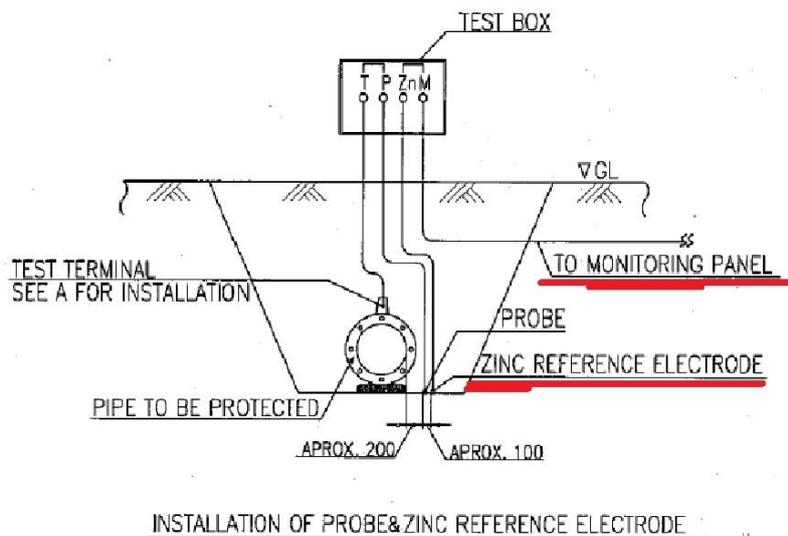


Figure III.4 : Installation de l'électrode de zinc.

Le critère pour l'électrode de Zinc est que la valeur du potentiel de la partie protégée doit être inférieure ou égale à (+250 mV).

III.4.1 Inspection du redresseur/transformateur

L'inspection consiste en :

- Vérification de l'alimentation AC et DC,
- Vérification des lampes témoins et fusibles,
- Vérification des organes internes du transformateur,
- Vérification des connexions électriques,
- Vérification de l'état du silicate, et éventuellement l'existence des traces d'humidité,
- Vérification de l'état externe du transformateur (présence de corrosion),
- Vérification du niveau d'huile.

III.4.2 Inspection des joints isolants

Pour le contrôle des joints isolants, la méthode consiste à mesurer du potentiel de la canalisation des deux côtés protégé et non protégé, et critère de jugement est que la différence absolue doit être supérieure ou égale à 100 mV.

III.7 Partie calculs

Tout d'abord, et avant d'entamer la partie calcul, Nous avons ramené des mesures de la résistivité du sol au niveau des trois phases (I,II,III), les valeurs sont illustrées sur les Tableau III.3, III.4 et III.5. Les points de mesures de la résistivité sont dans l'ANNEXE.

Tableau III.3 Résultat de la mesure de la résistivité du sol off-site.

Profondeur (m)	N0.3	N0.4	N0.5	N0.6	N0.13	N0.14	N0.15	N0.17
1	Au- dessus 10000	75.4	46.5	288.9	94.2	1067.6	402.0	30.2
2		678.3	67.9	452.2	98.0	753.6	427.0	42.7
3		94.2	92.4	471.0	130.0	433.3	565.2	49.0
5		131.9	130.4	376.8	138.2	266.9	1067.6	69.1
7		153.9	197.9	263.8	127.5	215.4	259.4	79.2
10		163.3	207.3	207.3	125.6	213.6	251.2	94.2
15		183.7	207.2	150.8	113.1	320.3	179.0	75.4
20		257.5	201.0	119.4	62.8	125.6	239.7	88.0

Tableau III.4 Résultat de la mesure de la résistivité du sol sur on-site.

Profondeur (m)	N0.8	N0.9	N0.10	N0.11	N0.16
1	1884.0	48.4	51.9	439.6	16.6
2	2763.2	1161.8	35.2	30.2	15.1
3	1789.2	791.3	31.1	32.1	24.5
5	1679.9	785.0	25.2	47.1	31.4
10	1318.8	408.2	12.6	25.2	14.5
15	1507.2	1224.6	12.3	84.8	29.2
20	477.3	502.4	18.9	100.5	15.1

Tableau III.5 : Résultat de la mesure de la résistivité du sol sur le tracé du pipe GN.

Profondeur (m)	N0.18	N0.19	N0.20
1	106.8	131.9	263.8
2	85.4	150.8	288.9
3	100.8	173.4	320.3
5	128.8	205.7	345.4
7	160.5	281.4	439.6
10	163.5	251.2	376.8
15	131.9	263.8	376.8
20	138.2	163.3	364.3

D'après les Tableaux, on remarque que la résistivité varie d'une zone à une autre à cause de la diversité du sol, elle est fonction également de la profondeur.

La nature du sol dans ces zones montre d'importantes valeurs de la résistivité, mais les plus grandes valeurs se trouvent dans les zones du site off et site on. Par exemple, plus de 1000 $\Omega.m$ est rencontrée dans la zone du réservoir d'eau de mer (le point de mesure N°3), le point de mesure N°8 présente également d'importantes valeurs de la résistivité en particulier dans les profondeurs de 1 jusqu'à 5 mètres.

Calcul de la résistance de terre des anodes de la phase I

D'après la relation de Dwight pour un déversoir vertical :

$$R_v = \frac{\rho_s}{2\pi L} \left(\ln \frac{8L}{d} - 1 \right)$$

La résistivité ρ_s est prise égale à 100 $\Omega.m$ selon le concepteur du système [20].

$$L = 2m.$$

$$d = 0,16m.$$

$$R_v = 287,015 \Omega$$

Nombre d'anode de la phase I est :50 anodes.

La résistance d'une anode est égale à :

$$R_A = \frac{R_v}{N_A}$$

$$R_A = \frac{287,015}{50}$$

D'où $R_A = 5,74\Omega$.

Calcul de la masse anodique de la phase I

La masse anodique de l'anode fer/Silicium nécessaire pour une durée de la vie de $t = 20$ ans pour une consommation massique de $0,25 \text{ Kg/A.an}$ est égale à :

$$M_t = m \times I \times t$$

M_t = La masse totale anodique nécessaire pour $t = 20$ ans

M_A = La masse d'une anode de ferro-silicium = $20,2 \text{ Kg}$

I = l'intensité de courant : 10 A

m : consommation de l'anode : $0,25 \text{ Kg/A}$.

$$M_t = 0,25 \cdot 10 \cdot 20$$

$$M_t = 50 \text{ Kg.}$$

Calcul du nombre d'anode

$$N_A = \frac{M_t}{M_A}$$

N_A = Nombre d'anode nécessaire pour une durée de vie de 20 ans

M_t = La masse totale anodique nécessaire pour $t = 20$ ans.

$$N_A = \frac{50}{20,2} = 2,47 \text{ anodes.}$$

Le nombre d'anode conçu par le constructeur est 03 par lit.

Le courant de sortie de l'anode vers la canalisation

Le courant de sortie de l'anode est calculé à partir de la formule suivante :

$$I = \frac{V}{R_V}$$

Avec : R_V est la résistance de terre de l'anode au sol : $285,015 \Omega$.

V est la tension appliquée : 50 V

$$I = 0,175 \text{ A.}$$

Calcul de la résistance de terre du lit de soutirage de la phase III

Pour une résistivité du sol égale à $1000\Omega\text{-m}$,

Longueur de l'anode 2 m

Diamètre de l'anode : 0,16 m

La résistance de terre des anodes est : $R_V = 286.62 \Omega$

Pour un nombre d'anode totale égale à : 54

La résistance d'une anode est : $R_A = 5.3 \Omega$

Calcul de la masse anodique de la phase III

Pour la même durée de vie c'est-à-dire 20 ans et une consommation de 0,25 Kg/A.an, la masse totale des anodes pour 20 ans est égale à :

$$M_t = m \times I \times t$$

$$M_t = 0.25 * 20 * 10$$

$$M_t = 50\text{Kg}$$

Calcul du nombre d'anode

$$N_A = \frac{M_t}{M_A}$$

N_A = Nombre d'anode nécessaire pour une durée de vie de 20 ans

M_t = La masse totale anodique nécessaire pour $t = 20$ ans.

$$N_A = \frac{50}{10,4} = 4,8 \text{ anodes.}$$

Dans la phase III, le nombre d'anode par lit conçu par le constructeur est : 05 anodes.

Le courant de sortie de l'anode vers la canalisation Pour une R_V résistance de terre de l'anode égale à : 286.62Ω . Et une tension appliquée V de 50V

$$I = 0.170A$$

Conclusion

D'après les résultats obtenus, le nombre d'anode nécessaire pour la protection de la phase I et II est de nombre (03) par lit de soutirage, la valeur est conforme à celle du design avec une masse totale des anodes égale à 50Kg.

Dans la phase III, nous avons trouvé un nombre de cinq anodes par lit de soutirage, cette valeur est plus élevée que celle conçu par le constructeur qui est de trois anodes. Nous avons attribué ce résultat au manque de données sur les autres facteurs qui influent sur le dimensionnement comme : la résistance des câbles de jonction, la résistance du métal et la résistance du revêtement.

D'après les résultats des mesures de la résistivité, le sol a une résistivité faible donc très corrosive, dans ce cas il est nécessaire d'augmenter le nombre d'anode pour la protection.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La protection cathodique à courant imposé (ICCP) est un mode de protection active qui utilise une source d'alimentation externe, afin de fournir le courant nécessaire pour baisser le potentiel de la structure à sa zone d'immunité.

Dans notre mémoire, nous nous sommes intéressés au système de protection cathodique du complexe GP1/Z qui a pour objectif la protection des canalisations enterrés (pipe gaz naturel et réseau eau incendie), ces derniers sont protégées par des revêtements organiques externes qui constitue le mode passive de la protection cathodique.

L'efficacité du système de protection cathodique repose sur le maintien d'un potentiel de polarisation correspondant au domaine d'immunité thermodynamique du métal qui est de $-0,85$ volt par rapport à une électrode au cuivre / sulfate de cuivre saturé. Pour cela des prises de mesures doivent être réalisées sur l'ensemble de l'ouvrage.

Nous avons remarqué que la résistivité du sol est un paramètre très important et varie d'une zone à une autre, elle change aussi en fonction de la profondeur, sa valeur est de l'ordre de $100\Omega.m$, cette valeur lui confère un caractère très corrosif.

Le calcul de la résistance de terre de l'anode, nous a permis de déterminer le nombre d'anode nécessaire pour la protection. Nous avons trouvé un nombre de trois anodes par lit dans la zone (phase I) qui est conforme au nombre d'anode conçu par le constructeur, mais un nombre plus élevé dans le cas de la zone (phase III). Cependant, il est important de signaler que pour une meilleure estimation de la résistance, il est nécessaire de connaître la résistance du revêtement, des câbles de jonction et du métal.

Bibliographies

- [1]: ISO 15589-1, « Petroleum electrochemical and natural gas industries- Cathodic protection of pipeline system » seconde édition, 2015.
- [2]: Pierre R.Roberge, Handbook of corrosion engineering, Mc Graw Hill, 1999.
- [3]: Zaki Ahmad, « Principales of corrosion engineering and corrosion control » 2006, Elsevier-BH.
- [4] : Formation Industrie - IFP Training « Corrosion des métaux » 2005.
- [5] : Hakim Bensabra « Cours de corrosion et protection des métaux » Université de Jijel, 2016.
- [6]: M.N. Nadagouda « A comprehensive investigation of copper pitting corrosion in a drinking water distribution system » Journal Corrosion Science. 52 (2010).
- [7] <http://ravelingroup.com/wordpress1/tag/colt-gold-cup/>
- [8] : Branko N.Popov « Corrosion engineering –principles and solved problem » Elsevier, 2015.
- [10]. J.Paul Bailon. J.Marie Dolt. Des matériaux 3^{ème} Edition 2000. Presses internationales Polytechnique.
- [11] **D. Bouzidi**, Corrosion et protection cathodique des conduites souterraines, mémoire d'ingénieurs, école de technologie supérieure université du Québec 2011.
- [12] A.W. Peabody, M.E. Parker, Cathodic protection, in: A. de S. Brasunas (Ed.), Corrosion Basics—An Introduction, NACE, Houston, TX, 1984, pp. 179–200.
- [13] C. Wagner, W. Traud, On the interpretation of corrosion processes through the superposition of electrochemical partial processes and on the potential of mixed electrodes, Corrosion 62 (2006) 844–855.
- [14] R.J. Kuhn, Cathodic protection of underground pipe lines from soil corrosion, API Proc. 14 (1933) 157–167.
- [15] T.J. Barlo, W.E. Berry, A reassessment of the -0.85 V and 100 mV polarization criteria for cathodic protection of steel buried in soils, Proc. Int. Congr. Met. Corros. 4 (1984) 86–91.

[16] BADORIS - Document de synthèse relatif à une barrière technique de sécurité (BTS), Protection cathodique Version 1.1 janvier 2008.

[17] A.W. Peabody, Use of magnesium for cathodic protection of pipelines in high soil resistive environments, Corrosion 15 (1959) 497t–502t.

[18] J.D. Palmer, Soil resistivity—measurement and analysis, Mat. Performance 13 (1974) 41–44.

[19] H.B. Dwight, Calculations for coreless induction furnaces, Electr. Eng. 54 (1936) 312–314.

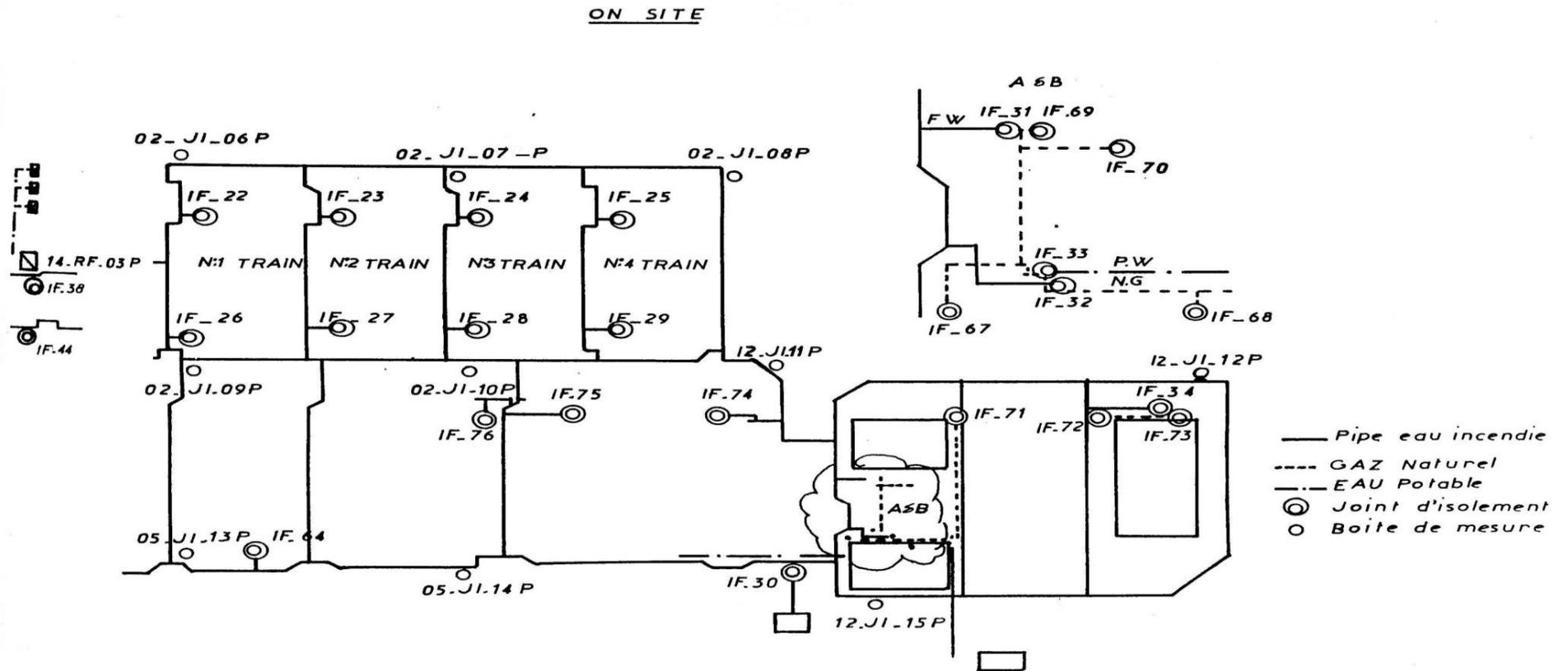
[20] Design specification for cathodic protection system for phas I, GP/1Z, Arzew. De la société « NAKABOHITEC CORROSION PROTECTING.

[21] Report of preliminary field survey for cathodic protection system, GP1/Z, Arzew. NAKAGAWA corrosion protecting.

[22] Fiche technique, « General specification for cathodic protection system « GP1/Z, Arzew.

Annexes

PHASE I



Figeur.1.phase I –on site

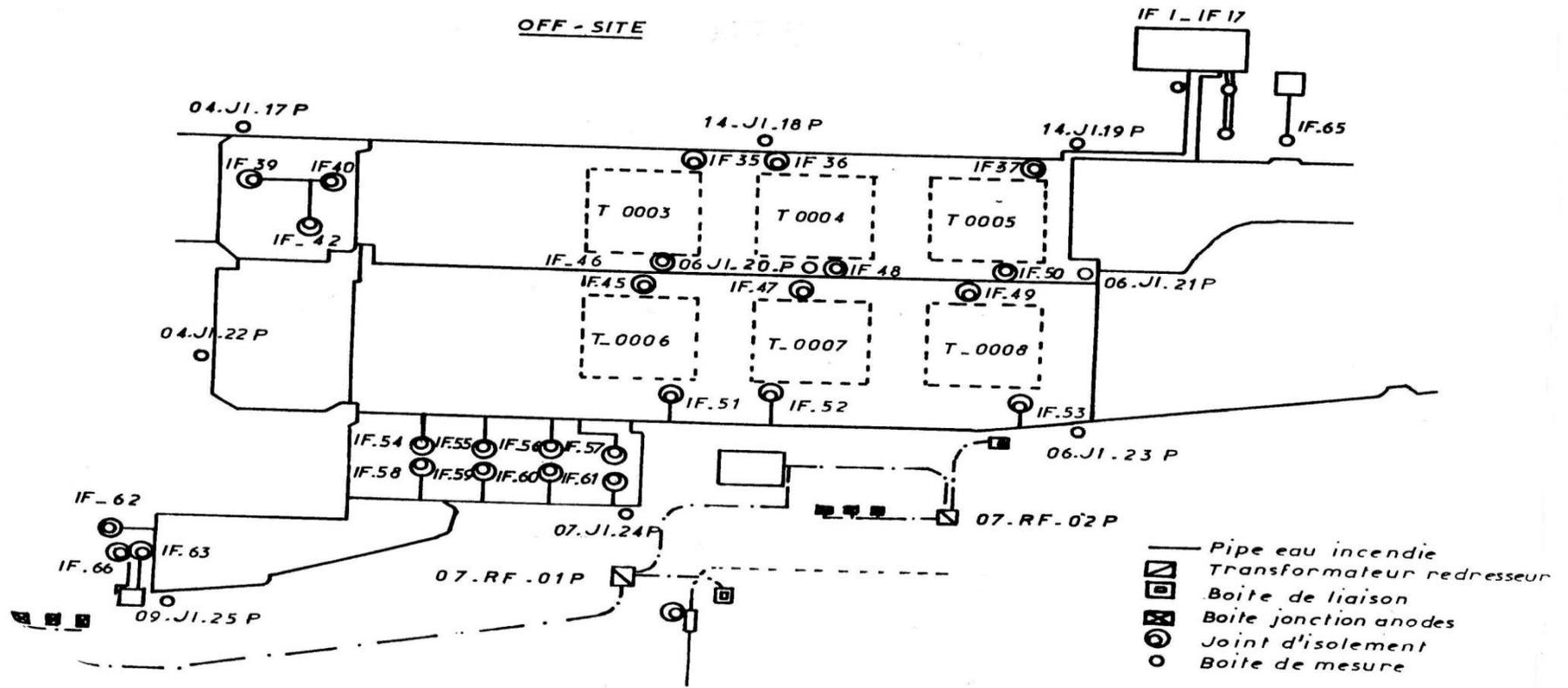


Figure 2. phase I. off-site

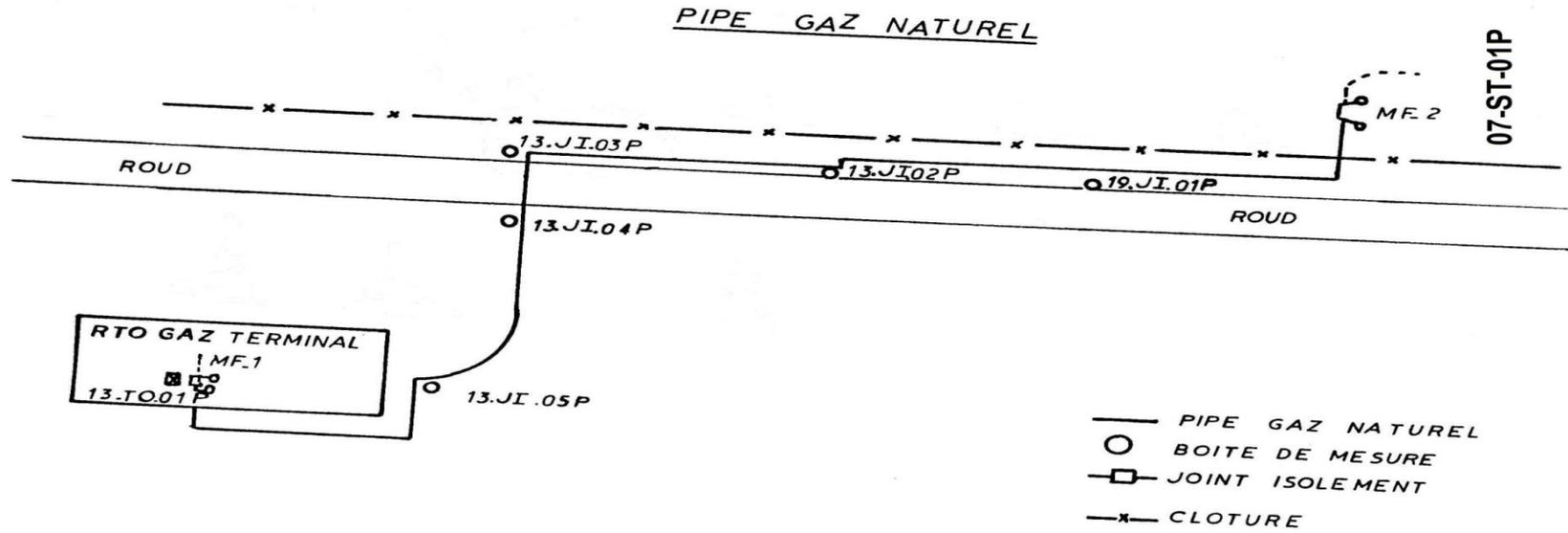


Figure.3.phase I .pipe gaz nature

PHASE II

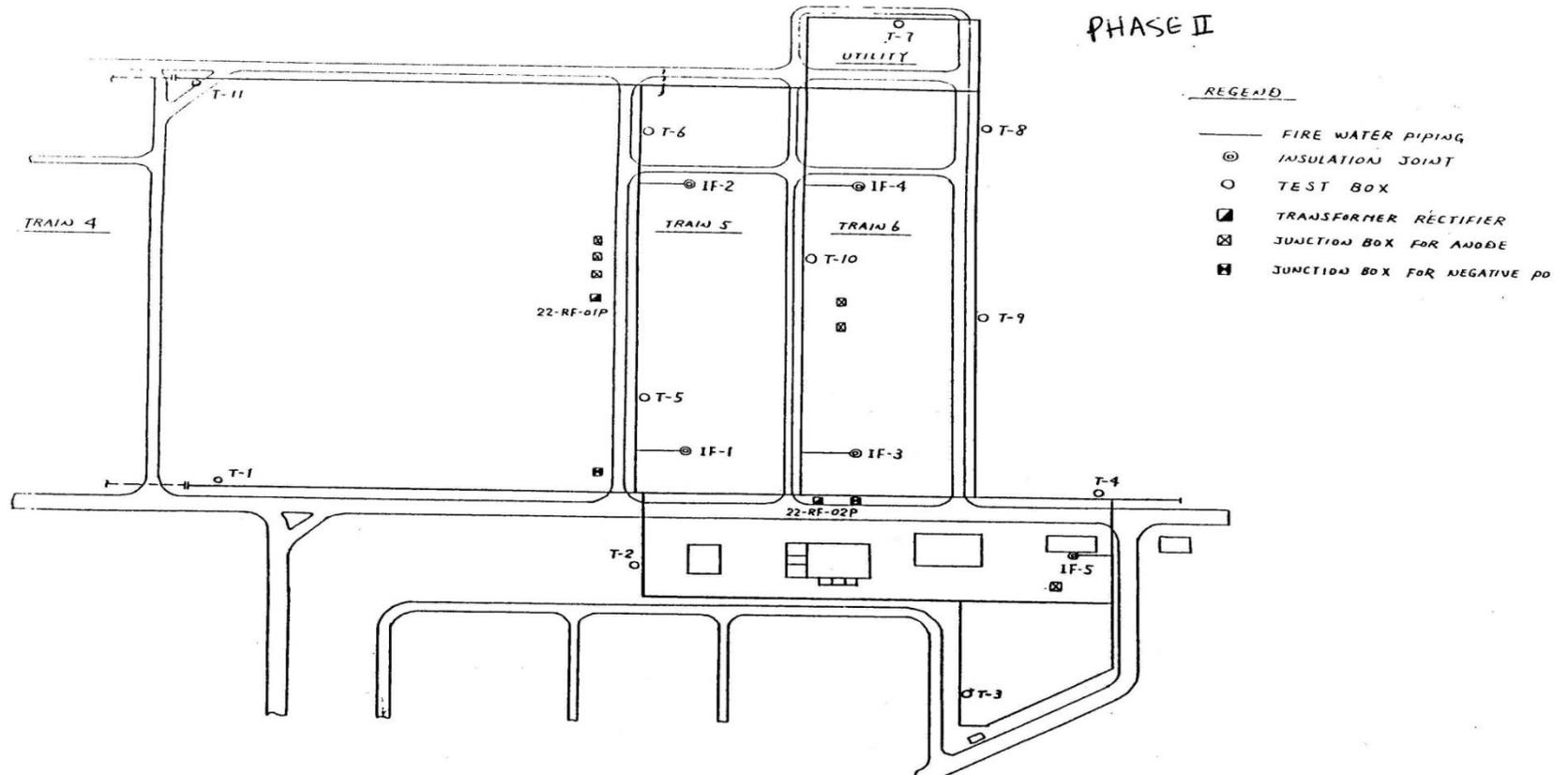


Figure 4. phase II

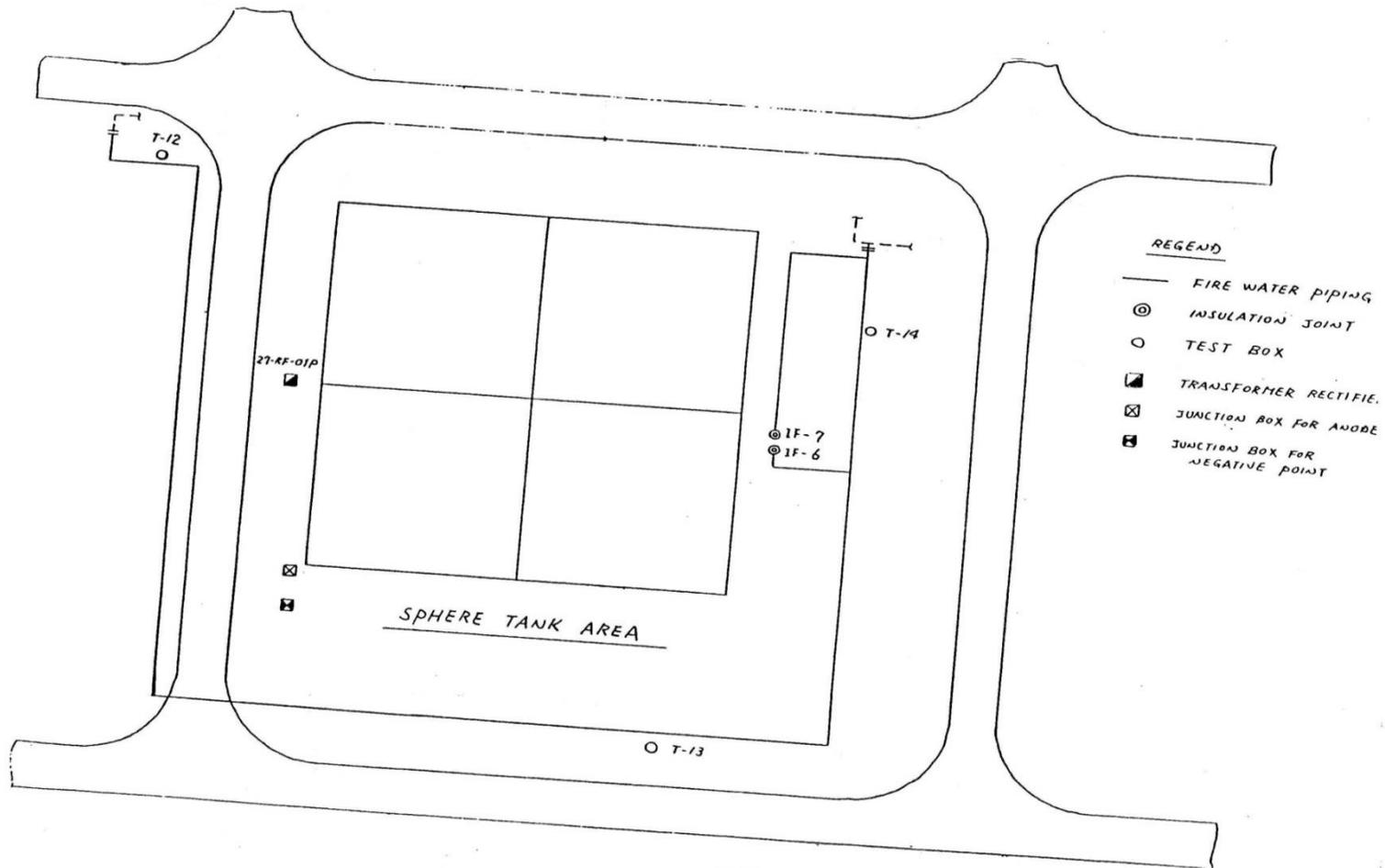
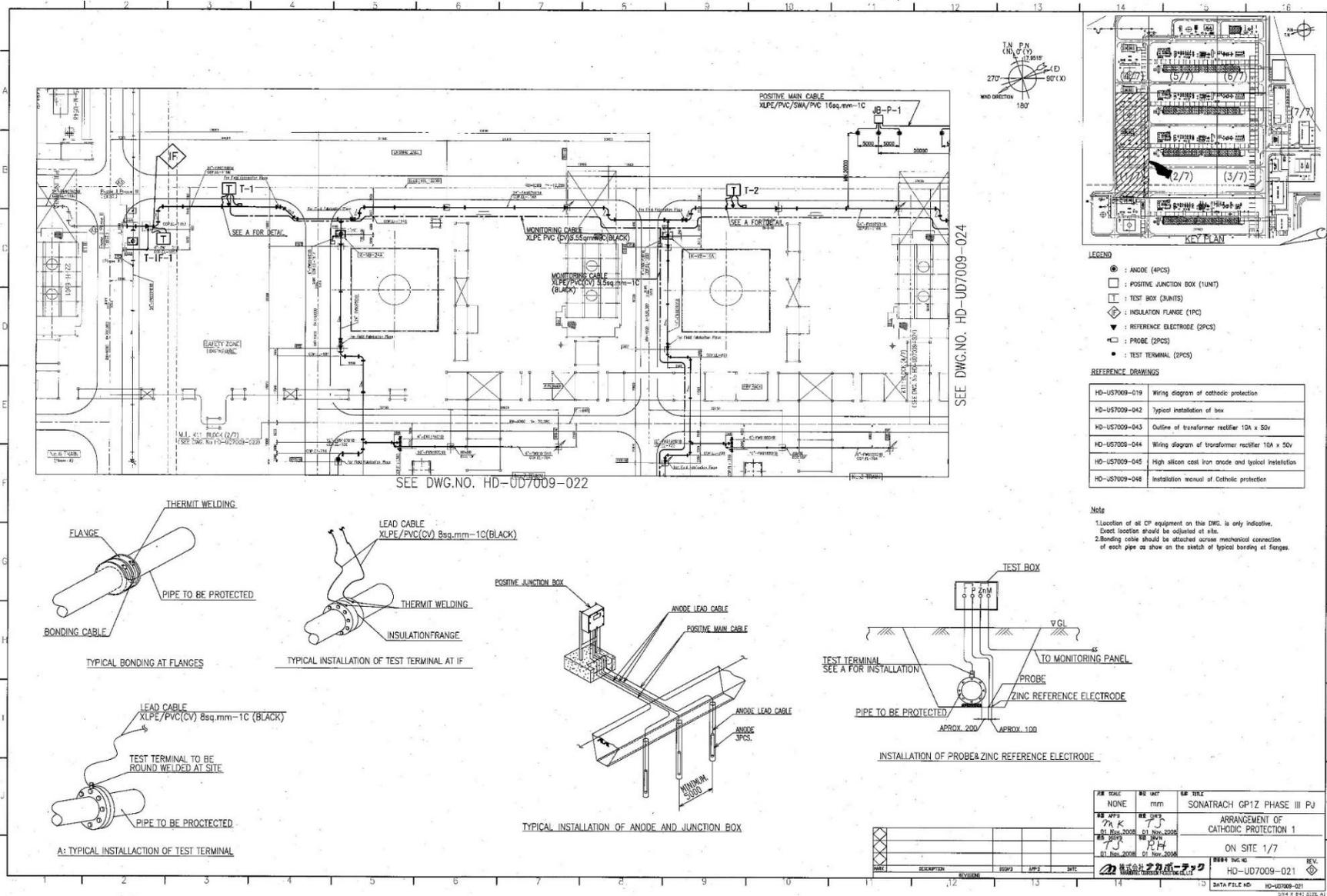


Figure 5. phase II.

PHASE III



Figur.6.phase III