



MEMOIRE DE MASTER

Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

Option: ALIMENTATION EN EAU POTABLE

THEME :

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA PROTECTION
DES CONDUITES METALLIQUES CONTRE LA
CORROSION.**

Présenté par :

Racha LAYADI

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
HACHEMI Abdelkader	M.C.A	Président
HADJ SADOK Nabila	M.A.A	Examineur
AMIRI Djamel	M.A.A	Examineur
DERNOUNI Fouzia	M.A.A	Examineur
Salah BOUALEM	M.C.A	Promoteur

Session janvier 2024

Dédicace

Ce travail est dédié à mes
Parents qui m'ont accompagnés et
soutenus tout au long de ma vie, et
tous ceux à qui nous comptons et
Comptent pour moi .

Racha LAYADI

REMERCIEMENTS

Avant tout, Je remercie Dieu le tout puissant, pour m'avoir donné la santé, le courage et la volonté d'étudier et pour m'avoir permis de réaliser ce modeste travail dans les meilleures conditions.

Je remercie fortement mon promoteur : Mr. SALAH BOUALAM de m'avoir orienté par ses conseils judicieux dans le but de mener à bien ce travail.

J'adresse également mes vifs remerciements à L'ensemble des enseignants de L'ENSH qui m'ont suivi durant mon cycle d'étude.

Mon respect aux membres du jury qui me feront l'honneur d'apprécier et de juger mon travail.

Et en fin, je remercie tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

Chapitre I : Synthèse bibliographique	3
I.1 Aperçu historique :	3
Chapitre II : Notions Fondamentales sur la corrosion	7
II.1 Les facteurs de la corrosion	7
II.2 Théorie électrochimique	8
II.2.1 Corrosion électrochimique.....	8
II.2.2 Mécanisme de la corrosion électrochimique	8
II.2.3 Base d'une cellule électrochimique.....	8
II.3 Condition thermodynamique de la corrosion.....	9
II.4 Électrodes de référence.....	10
II.5 Loi de Nernst.....	11
II.6 Diagrammes de Pourbaix.....	11
II.7 Formes de corrosion	13
II.7.1 Corrosion uniforme (généralisée)	13
II.7.2 Corrosion localisée	13
II.8 L'entartrage des conduites	15
Chapitre III : Moyen de lutte contre la corrosion-Protection cathodique-	18
III.1 Principe de la protection cathodique :	18
III.1.1 Protection cathodique par anodes sacrificielles ou anodes réactives :	18
Remarque :	19
III.1.2 Protection cathodique par courant imposé :	20
III.1.3 Comparaison entre les deux systèmes de protection cathodique	22
III.2 Etude d'un cas du système de protection cathodique par courant imposé	22
III.2.1 Critère de la protection cathodique PCCI	22
III.2.2 Présentation de la conduite	22
Réservoir de 1000 m ³	23
SOURCE : ADE-Setif	23
III.2.3 Résistivité du sol	23
III.2.4 Mesure d'un potentiel	26
III.2.5 Description de l'équipement PC.....	26
III.2.6 Calcul et dimensionnement du système de protection cathodique PCCI [29]....	28

Bibliographie

Annex

LISTE DES FIGURES

Chapitre II : Notions Fondamentales sur la corrosion

Figure II.1: Base d'une cellule électrochimique [12].	9
Figure II.2 : Evolution de l'énergie d'un métal corrodable en fonction du temps [9].	10
Figure II.3 : Diagramme de Pourbaix du fer dans l'eau à T=25°C, les concentrations des espèces ioniques en solution vaut 10 ⁻⁶ mol/l [15].	12
Figure II.4 : corrosion uniforme et corrosion localisée d'un métal [17]	14

Chapitre III : Moyen de lutte contre la corrosion-Protection cathodique-

Figure III.1 : Principe de la protection cathodique par anodes sacrificielles [28].	18
Figure III.2 : Représentation de système de protection cathodique	19
Figure III.3 : Principe de la protection cathodique par courant imposé	20
Figure III.4 : présentation de la conduite à protéger AEP AIN AZEL.	23
Figure III.5: Relevé de mesures de la résistivité du sol du tronçon AEP Ain Azel.	25
Figure III.6 : Principe de protection cathodique du tronçons AEP Ain Azel.	25
Figure III.7 : Méthode de la mesure de potentiel de la protection cathodique.	26
Figure III.8 : Lit d'anodes horizontales avec mélange Régulateur.	31

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II : Notions Fondamentales sur la corrosion

Tableau II.1: Les principaux facteurs de corrosion.....	7
Tableau II.2: Potentiels standards (f.e.m) de quelques métaux, par rapport à l'électrode standard à hydrogène (E.N.H).....	10

Chapitre III : Moyen de lutte contre la corrosion-Protection cathodique-

Tableau III.1 : Comparaison entre les deux systèmes de protection cathodique.....	22
Tableau III.2 : Les caractéristiques techniques de la conduite AEP Ain Azel.....	23
Tableau III.3 : Relevé de mesures de la résistivité du sol.....	24
Tableau III.4 : Corrosivité du sol selon la résistivité.....	24
Tableau III.5 : Caractéristiques dimensionnelles de l'anode	31
Tableau III.6 : Câbles de liaison	33

Résumé

A travers cette modeste étude, on a expliqué les phénomènes de corrosion et d'entartrage dans les conduites métalliques enterrée dans le sol, provoquant des pertes de performances importantes et générant parfois des problèmes techniques aigus. L'étude ne se limite pas seulement à une simple étude théorique, car elle englobe aussi une étude d'un cas réel consistant l'application de protection cathodique sur la conduite AEP Ain Azel pour assurer sa fonctionnement.

Mots clés : corrosion, AEP Ain Azel, protection cathodique, courant imposé.

ملخص:

من خلال هذه الدراسة، تم شرح ظواهر التآكل وتكون الطبقات الكلسية في الأنابيب المعدنية المدفونة في التربة، مما يسبب خسائر أداء كبيرة وقد يؤدي أحياناً إلى مشاكل تقنية حادة. إن هذه الدراسة لا تقتصر فقط على دراسة نظرية بسيطة، بل تشمل أيضاً دراسة لحالة واقعية تتمثل في تطبيق الحماية الكاثودية بواسطة التيار المسلط لخط أنبوب مياه الشرب بعين ازال-AEP Ain Azel- بولاية سطيف لضمان سلامة تشغيله.

الكلمات المفتاحية: التآكل، الحماية الكاثودية، خط أنابيب AEP Ain Azel، التيار المسلط.

Abstract:

Through this modest study, the phenomena of corrosion and scaling in metal pipes buried in the ground have been explained, leading to significant performance losses and sometimes acute technical issues. The study extends beyond a simple theoretical analysis, as it also includes a real-life case study involving the application of cathodic protection on the AEP Ain Azel pipeline to ensure its proper functioning.

Keywords: corrosion, AEP Ain Azel, cathodic protection, imposed current.

Introduction Générale

Depuis le temps où l'homme a découvert et utilisé 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 des conduites métalliques enterrées dans le sol représente un défi majeur dans le domaine de l'ingénierie des matériaux et des infrastructures. Ce phénomène résulte des réactions électrochimiques complexes entre le métal de la conduite, l'électrolyte qui est le sol et d'autres facteurs environnementaux, peut entraîner des pertes considérables en termes de coûts de maintenance et de sécurité des installations.

La nécessité de prévenir et de contrôler la corrosion a conduit au développement de diverses techniques, parmi lesquelles la protection cathodique émerge comme une approche essentielle.

Dans cette étude, nous allons nous intéresser à la corrosion électrochimique. Nous montrerons que cette forme de corrosion est due à la formation de micro-piles à l'intérieur du métal lui-même.

Le présent mémoire de master vise à explorer en profondeur les aspects fondamentaux et appliqués de la corrosion des conduites enterrées, en mettant particulièrement l'accent sur la protection cathodique. Divisé en trois chapitres distincts, ce document offre une synthèse bibliographique approfondie, une analyse détaillée des mécanismes de corrosion spécifiques aux conduites enterrées, ainsi qu'une exploration rigoureuse des méthodes de calcul et de dimensionnement pour la mise en œuvre efficace de la protection cathodique.

Nous sommes intéressés dans ce travail à étudier du système de protection cathodique (PC) de la canalisation AEP Ain Azel-Setif.

Ce mémoire aspire à contribuer significativement à la compréhension et à l'application efficace de la protection cathodique dans le contexte de la corrosion des conduites enterrées, offrant ainsi des perspectives pertinentes pour les professionnels de l'ingénierie et de la gestion des infrastructures.

CHAPITRE 1 : Synthèse bibliographique

I. Synthèse bibliographique

Introduction

Afin de bien comprendre le sujet, nous commencerons ce chapitre par un aperçu mettre en évidence l'avancement historique des études de corrosion des canalisations enterrées dans le sol clarifiez les principales recherches qui ont été effectuées dans ce domaine.

I.1 Aperçu historique :

La corrosion est un processus naturel, et il existe de nombreuses définitions de la corrosion dans des ouvrages renommés sur la corrosion. Par exemple :[1]

- Fontana (1987) définit la corrosion comme étant "la destruction ou la détérioration d'un matériau en raison de sa réaction avec son environnement."
- Davis (2006) la définit comme étant "une réaction chimique ou une réaction électrochimique entre un matériau, généralement un métal, et son environnement, qui produit une détérioration du matériau et de ses propriétés."
- Plus récemment, Revie (2008) la définit comme étant "l'attaque destructive d'un métal par une réaction chimique ou électrochimique avec son environnement."

Plusieurs chercheurs ont par le passé contribué au domaine de la corrosion souterraine des canalisations enterrées. Au début des années 1900, plusieurs chercheurs ont entrepris des essais sur le terrain détaillé et de longue durée à l'aide de coupons et de sections de tuyaux dans le cadre d'études de corrosion souterraine. [2]

Whitman et coll. (1925) a étudié la solubilité de l'hydroxyde ferreux et son effet sur la corrosion. [4]

Denison et Hobbs (1934) ont été des pionniers dans l'étude de la corrosion des canalisations enterrées, en se penchant sur les métaux ferreux dans des sols acides. Leur recherche a établi des corrélations entre l'acidité des sols et les pertes de poids des échantillons, tout en examinant l'influence du pH sur la corrosion de la fonte dans divers sols. Cependant, leur étude était limitée aux sols acides et synthétiques. [2]

En 1949, Marcel Pourbaix a développé le diagramme de Pourbaix également connu sous le nom de diagramme potentiel-pH. I est utilisé pour étudier la corrosion des métaux et pour prédire la stabilité d'un métal dans un environnement spécifique. [15]

WJ Schwerdtfeger (1953) a développé une méthode reproductible pour créer des cellules de corrosion dans le sol en utilisant une procédure de mouillage du sol. Cette méthode a permis de mesurer les pertes de poids sur des électrodes en acier et en fonte exposées à différents sols pendant 6 mois, établissant des corrélations avec les pertes de poids et les dommages sur les échantillons de terrain exposés pendant 10 ans, permettant ainsi de prédire ces effets pour divers types de sols. [2]

Romanoff (1957) a mené une étude exhaustive sur la corrosion des tuyaux métalliques enterrés, examinant divers facteurs tels que l'aération, l'humidité, la composition du sol, le pH et d'autres variables. Il a conclu que la résistivité du sol joue un rôle clé dans la gravité de la corrosion des canalisations enterrées. [2]

Malvin (1958) a mené une vaste série d'essais sur le terrain pour étudier l'effet des sols sur la corrosion des canalisations métalliques enterrées. [4]

Tomashov (1966), il soutient que la corrosion à court terme se produit dans des conditions où l'oxygène est limitant en tant qu'espèce diffusante, dans un environnement aérobie. Il affirme également que la corrosion peut être initiée par des courants alternatifs présents dans des milieux électrolytiques, créant ainsi des gradients de potentiel et perturbant la passivation. [26]

Rossum (1969) a développé un modèle prédictif qui vise à déterminer la cinétique de croissance des piqûres en fonction de l'aération, du pH et de la résistivité (Tous les modèles visant à estimer la cinétique de corrosion localisée sont dérivés du modèle initial). [3]

En 1979, Gupta et Gupta ont mené une étude sur la teneur critique en humidité du sol lors de la corrosion souterraine de l'acier doux. Ils font ressortir une humidité critique à 65% de la saturation. La vitesse de corrosion atteint un maximum à ces teneurs et diminue ensuite. [3]

Serra et Mannheimer (1981) ont effectué leurs mesures électrochimiques en laboratoire. Ils ont découvert que la résistance de polarisation était la mesure la plus efficace pour estimer les taux de corrosion des métaux dans les sols. [4]

Murray et Moran (1989) ont mené des expériences pour étudier la corrosion des pipelines enterrés en surveillant la teneur en humidité du sol, utilisant la spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) in situ. Leurs résultats ont montré que les taux de corrosion étaient influencés par la teneur en humidité. [2]

Norin et Vinka (2003) ont réalisé une étude sur la corrosion des conduites métalliques enterrées pendant 1 et 3 ans, distinguant entre corrosion uniforme et locale, tout en examinant l'influence du matériau de remblai sur le comportement de corrosion. Ils ont enterré des panneaux d'acier et de zinc à différentes profondeurs dans un matériau de remblai composé de divers éléments. Les résultats ont révélé des fosses plus prononcées dans les spécimens enterrés dans le matériau de remblai ou les sols perturbés par rapport à ceux enterrés dans des sols naturels. [2]

Nie et ses collègues (2009) ont révélé que la corrosion de l'acier au carbone dans un sol salin est sensible à la température, avec des courants de corrosion et une passivité se développant à basse température, mais des taux de corrosion plus élevés à 50°C. [4]

Petersen et Melchers (2013) ont mené une étude en Australie pour modéliser la corrosion externe à long terme des tuyaux en fonte enterrés. Leurs résultats suggèrent que l'humidité du sol (mesurée par le degré de saturation) est liée à l'augmentation de la pénétration maximale de la corrosion à long terme près des canalisations. [2]

Adeosun et Sanni (2013) ont mené une étude sur la corrosion des barres d'acier doux soudé et non soudé enterrées dans le sol près de la zone côtière de l'Université de Lagos en utilisant la méthode gravimétrique. La conclusion de l'étude souligne le taux de corrosion de l'acier doux soudé était plus élevé que celui de l'acier doux non soudé dans les deux zones et l'influence de facteurs environnementaux tels que le type de sol, la teneur en humidité et le pH sur la corrosion de l'acier doux dans le sol. [2]

Yan et ses collègues (2014) ont examiné la corrosion de l'acier de pipeline dans un sol rouge acide, notant que la corrosion était fortement influencée par le pH du sol et la teneur en oxydes de fer. Le taux de corrosion augmentait avec la baisse du pH et l'augmentation des oxydes de fer, avec des produits de corrosion principalement composés d'oxydes et d'hydroxydes de fer à la surface de l'acier. Les résultats ont également des implications pour la compréhension du rôle des oxydes de fer dans la corrosion des pipelines en sols d'argile rouge. [2]

Melchers (2017) a développé un modèle externe post-perforation pour expliquer la corrosion des conduites d'eau en fonte haute pression, en mettant en évidence la relation entre la corrosion externe et les ruptures sous pression due à la fuite d'eau oxygénée. Les résultats de l'étude abordent également d'autres sujets, tels que la corrosion de la fonte ductile influencée par des micro-organismes et l'utilisation de modèles mathématiques pour prédire la corrosion des pipelines, ainsi que la corrosion de différents métaux et alliages dans le sol. [2]

L'étude d'Asadi et Melchers (2018) a analysé la corrosion par piqûre de tuyaux en fonte anciens, révélant que les piqûres graves se produisaient aux points de contact sol-tuyau et dans des zones à humidité élevée. La distribution des piqûres variait entre les pipelines, et l'étude a conclu que la corrosion de ces tuyaux était influencée par des facteurs environnementaux tels que le type de sol, la teneur en humidité et le pH. [2]

Conclusion

Ce chapitre fournit un aperçu historique et bibliographique des études de corrosion des canalisations enterrées, en mettant en lumière les contributions de chercheurs renommés dans ce domaine. Il révèle l'influence de facteurs environnementaux tels que le type de sol, la teneur en humidité et le pH sur la corrosion des canalisations enterrées, ainsi que l'importance de modèles mathématiques pour prédire la corrosion et comprendre les mécanismes de corrosion dans divers environnements.

CHAPITRE II : Notions Fondamentales sur la corrosion

II. Notions Fondamentales sur la corrosion

Introduction

La corrosion est la dégradation du matériau ou de ses propriétés sous l'effet de l'environnement immédiat qui peut être le sol, l'atmosphère, l'eau ou d'autres fluides par réaction chimique [5].

La corrosion peut être vue sous sa forme globale comme une réaction spontanée d'échange d'électrons à l'interface métal / environnement. C'est un phénomène naturel qui tend à faire retourner les métaux à leur état d'oxyde (état naturel) par une attaque plus ou moins rapide du milieu corrosif [6].

Les différents mécanismes de corrosion sont influencés par plusieurs paramètres qui interagissent entre eux plutôt que de manière isolée. Ces paramètres incluent la composition et la structure du matériau, les propriétés chimiques de l'environnement, la température et d'autres variables. Dans ce chapitre, nous aborderons quelques concepts fondamentaux liés à la corrosion.

II.1 Les facteurs de la corrosion

Les phénomènes de la corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs et ils peuvent être classés en trois groupes principaux (tableau II.1) [7].

Tableau II.1: Les principaux facteurs de corrosion.

Facteurs du milieu corrosif	Facteurs métallurgiques	Facteurs définissant les conditions d'emploi
-Concentration du réactif -Teneur en oxygène -pH du milieu -Température -Pression	-Composition de l'alliage -Procédés d'élaboration - Impuretés -Traitements thermiques -Traitements de surfaces (revêtements).	-Etat de surface -Forme des pièces -Sollicitations mécaniques -Procédés d'assemblage

NB : La température, le pH, les conditions de flux, le film formé à la surface du métal et la pression exercent une influence sur la vitesse de corrosion. [8,9].

➤ **Effet de la température**

Généralement, l'augmentation de la température accélère les phénomènes de corrosion, car elle diminue les domaines de stabilité des métaux et accélère les cinétiques de réactions et de transport. L'importance de son influence diffère cependant en fonction du milieu corrosif dans lequel se trouve le matériau [10].

➤ **Effet de l'acidité**

La susceptibilité du matériau à la corrosion est fonction du pH de l'électrolyte. Une forte concentration en protons dans la solution augmente l'agressivité du milieu, ce qui modifié les

équilibres des réactions chimiques et électrochimiques. La corrosion augmente avec la diminution du pH du milieu [11].

➤ **La salinité**

Les chlorures sont des ions agressifs, souvent à l'origine de la corrosion localisée, leur présence en solution s'accompagne d'effets complémentaires, d'une part, leur concentration locale induit une acidification du milieu et d'autre part, la salinité exerce une influence sur la conductivité du milieu aqueux [10].

➤ **Régime hydrostatique**

Le transport des réactifs vers l'interface et des produits de réaction vers l'électrolyte est de nature à modifier la cinétique des réactions électrochimiques en changeant la concentration des espèces et donc le potentiel d'équilibre. [9]

II.2 Théorie électrochimique

Elle repose sur la connexion de deux phases conductrices, l'une électrochimique appelée électrode et l'autre ionique appelée électrolyte [12].

D'après cette définition, toute réaction de corrosion qui provoque une oxydation du métal est de type électrochimique.

II.2.1 Corrosion électrochimique

Elle se produit lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal soit dans le milieu qui l'entourne ou dans les deux. Cette hétérogénéité va produire une différence de potentiel entre différents points du métal et si ce matériau se trouve dans un milieu électrolysable, il y aura formation des piles qui vont débiter dans la masse métallique, car elles sont en court-circuit. Les zones anodiques sont corrodées et disparaissent [12].

Il apparaît alors dans le circuit métal-liquide un courant électronique qui circule depuis l'anode vers la cathode, tandis qu'un courant ionique s'établit dans la solution entre les deux électrodes.

II.2.2 Mécanisme de la corrosion électrochimique

Une réaction électrochimique implique un transfert de charges à l'interface entre un conducteur électronique, appelé électrode, et un conducteur ionique, appelé électrolyte. Elle contient deux réactions d'électrode opposées, égales d'amplitude, se trouvent en compétition : oxydation et réduction.

- l'oxydation est une génération d'électrons qui a lieu sur un site appelé anode



- la réduction est un gain d'électrons qui a lieu sur un site appelé la cathode.

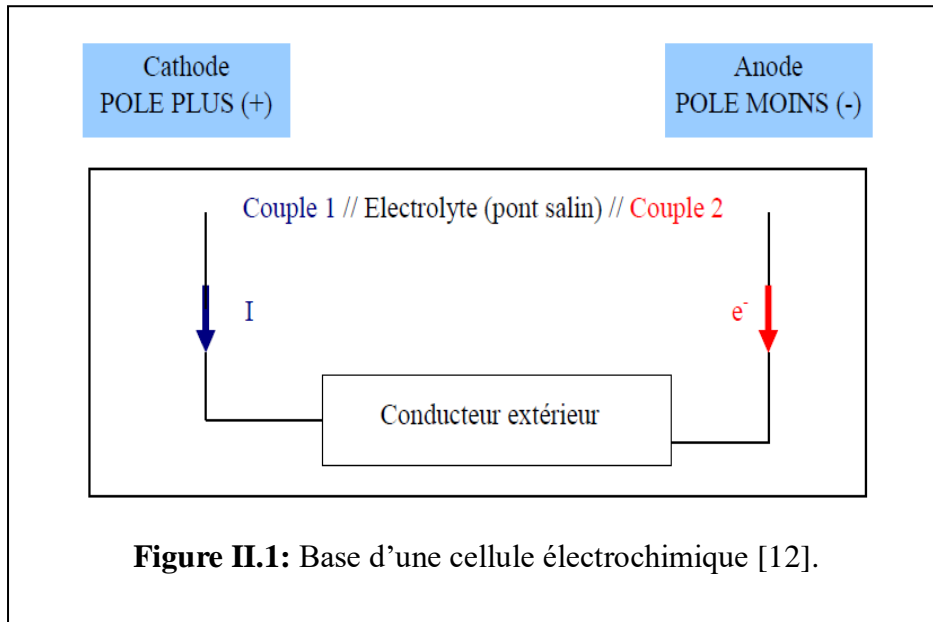


L'ensemble M /M_{n+} est dit couple oxydo – réducteur ou système redox.

II.2.3 Base d'une cellule électrochimique

La cellule de corrosion se compose de quatre composants : l'anode, la cathode, l'électrolyte et la liaison électrique (fig.II.1) [12].

- **Anode** : est la partie de l'électrode dans laquelle l'**oxydation** a lieu et à partir de laquelle les électrons sont générés (perte d'électrons).
- **Cathode** : est la partie de l'électrode qui ne se corrode pas, les électrons qui arrivent de l'anode sont déchargés dans la cathode (gain d'électrons).
- **Electrolyte** : c'est le milieu aqueux (conducteur ionique).
- **Liaison électrique** : l'anode et la cathode doivent être connectées électriquement pour permettre au courant électrique de passer dans la cellule de corrosion. On note que dans le cas où l'anode et la cathode font partie du même métal, la liaison physique n'est pas nécessaire.



II.3 Condition thermodynamique de la corrosion

La plupart des métaux existent dans la nature sous forme de composés (oxydes, sulfures, etc), c'est leur état thermodynamique stable. Le passage de l'état de minerai à celui de métal pour article de consommation courante, exige un apport de chaleur considérable (haut fourneau, etc). Ce métal, exposé à l'environnement naturel, reviendra après corrosion à l'état de composé (oxyde, sulfure, ...).

Les métaux comme l'or, qui existent quelquefois à l'état pur dans la nature, ont une excellente résistance à la corrosion dans un environnement naturel.

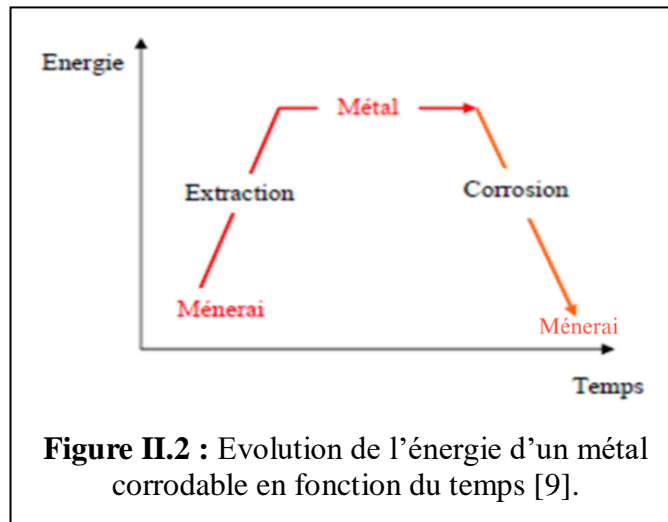
La corrosion ne peut se produire que si les produits de corrosion sont plus stables que le métal et le milieu environnant.

Une réaction spontanée n'est donc possible que si $\Delta G < 0$, l'équilibre chimique correspond au minimum d'enthalpie libre : $\Delta G = 0$.

La tendance d'une réaction chimique à se produire est donnée par l'énergie libre de Gibbs (ΔG). Plus l'énergie ΔG° est négative, plus la tendance de la réaction à se produire est grande [9].

La variation d'énergie s'écrit : $\Delta G = G_{\text{produits}} - G_{\text{réactifs}}$

La figure (II.2) illustre l'évolution de l'énergie d'un métal corrodable en fonction du temps.



Remarque

- 1/ ΔG donne la direction de la réaction, mais ne donne aucune indication sur la vitesse de corrosion.
- 2/ L'enthalpie libre ΔG est encore appelée Potentiel thermodynamique.
- 3/ ΔG est fonction de la température et de la pression.

II.4 Électrodes de référence

L'électrode de référence est la seconde demi - pile du montage, choisie parmi quelques-uns des systèmes électrochimiques les plus réversibles et les plus simples, ou les plus commodes à mettre en œuvre.

D'un point de vue théorique, c'est l'électrode à hydrogène normale (E.N.H) qui est le zéro et avec :

- ✓ Pression hydrogène = 1 bar.
- ✓ Température = 25°C.
- ✓ Activité de l'ion $[H^+] = 1$.

Dans la pratique, l'outil est complexe et difficile à manipuler [13].

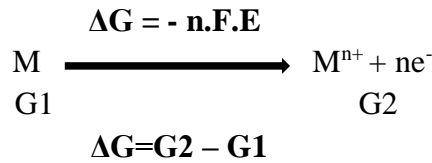
Les potentiels standards sont des constantes parfaitement définies pour chaque métal (Voir tableau II.2).

Tableau II.2: Potentiels standards (f.e.m) de quelques métaux, par rapport à l'électrode standard à hydrogène (E.N.H).

Système	E0 (V /ENH)
Au/Au ³⁺	+1.5
Hg/Hg ²⁺	+0.8
Ag/Ag ⁺	+0.79
Cu/Cu ²⁺	+0.34
H₂/H⁺	0.00
Pb/Pb ²⁺	-0.13
Sn/Sn ²⁺	-0.14
Fe /Fe ²⁺	-0.44

II.5 Loi de Nernst

Un métal M plongé dans une solution, les lois de la thermodynamique disent que :



Avec :

E : est le potentiel d'électrode, C'est la force électromotrice en volts mesurée par rapport à l'électrode standard à hydrogène.

n : la valence du métal (c'est-à-dire le nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction).

F : la constante de Faraday = 96500 Coulombs.

Nernst a trouvé, pour le cas particulier d'un métal plongé dans un électrolyte la relation suivante :

$$E = E^{\circ} + \frac{0.059}{n} \cdot \log[M^{n+}]$$

[Mn+] : concentration des ions de métal en (mol/l).

Eo : potentiel normal d'équilibre du métal en contact avec une solution, [Mn+] = 1. [14]

II.6 Diagrammes de Pourbaix

Le comportement électrochimique des métaux dans l'eau a été présenté sous forme de diagramme exprimant le potentiel d'électrode en fonction du pH. On peut ainsi voir d'un seul coup d'œil dans quelle condition on aura :

- corrosion,
- immunité,
- passivité.

Telle que :

- **domaine de la corrosion** : c'est la région E-pH où le métal se trouve sous forme ionique. Il y a eu oxydation du métal et donc corrosion pour donner une espèce soluble.
- **domaine d'immunité** : c'est le domaine de stabilité thermodynamique du métal (à la concentration de 10^{-6} mol L⁻¹). La corrosion étant impossible thermodynamiquement ne peut donc pas se produire (la cinétique n'intervient pas dans ce cas).
- **domaine de passivité** : c'est le domaine où se trouvent les différentes phases condensées (en général des oxydes et des hydroxydes) qui recouvrent le métal et le protègent d'une attaque ultérieure. Le métal a donc été oxydé en surface, mais cette pellicule le protège d'une attaque en profondeur. On voit là tout l'intérêt d'une couche protectrice très stable, compacte et fortement liée au métal.

Pour un métal donné, on trace généralement un tel diagramme en tenant compte des différentes réactions d'électrode et chimiques possibles entre le métal, ses ions et l'eau pure. Les différents couples sont représentés à l'état d'équilibre par des droites. L'ensemble de ces droites détermine les différentes zones dans lesquelles une espèce est stable.

Considérons le cas du fer en équilibre avec ses oxydes dans l'eau pure : on peut ainsi tracer un diagramme potentiel-pH (fig II.4), en indiquant les zones de stabilité du fer (Fe), les zones de stabilité de l'ion Fe^{2+} , les zones de stabilité de l'ion Fe^{3+} et les zones de passivation.

Il s'agit donc d'une sorte de « carte », les zones délimitées par des frontières indiquant les couples de valeurs (E/pH) pour lesquelles une espèce est stable.

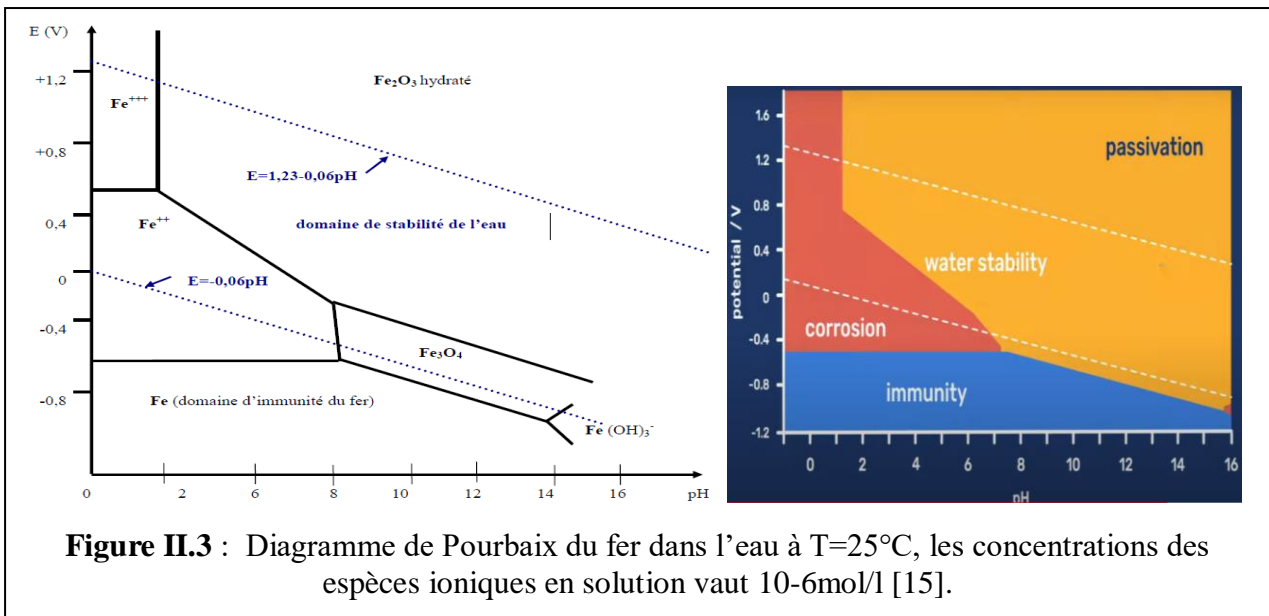
Le diagramme de Pourbaix montre la façon de protéger le métal :

- On peut diminuer le potentiel →→ protection cathodique
- On peut augmenter le potentiel →→ passivation.
- On peut augmenter le pH →→ domaine de passivité : protection basique.

NB : 1- Ce diagramme peut être tracé pour tous les métaux.

2- Le diagramme de Pourbaix ne donne aucune idée sûre :

- a) La vitesse de corrosion,
- b) L'influence d'impuretés ou d'ions en solution dans l'eau,
- c) L'efficacité des films passifs en présence de SO_4 , etc.
- d) Le taux de corrosion.



Commentaire sur les graphes :

Le diagramme de Pourbaix est une représentation graphique du potentiel en fonction du pH, essentiel dans l'étude de la corrosion. Il identifie les conditions sous lesquelles un métal peut se corroder. Le fer est pris comme exemple dans les deux graphes précédents.

L'équation de Nernst exprime la dépendance du potentiel au pH des réactions électrochimiques. Sur le plan du diagramme potentiel-pH du fer, il apparaît trois domaines distincts :

- Domaine d'immunité thermodynamique, donc pas de corrosion. Le fer reste à l'état métallique (M), c'est le domaine de la protection cathodique ;

- Domaine de corrosion ou les formes d'oxydation du métal sont des Fe^{2+} , Fe^{3+} , $Fe(OH)_3$
- Domaine de passivité éventuelle ou les formes d'oxydation du métal sont des oxydes (Fe_2O_3 , Fe_3O_4) qui peuvent être protecteurs.

Les lignes horizontales représentent l'équilibre entre le fer et les ions Fe^{2+} et entre les ions Fe^{2+} et Fe^{3+} , des réactions redox où le potentiel est indépendant du pH. La ligne verticale symbolise l'équilibre entre les ions Fe^{3+} et Fe_2O_3 , une réaction acide-base indépendante du potentiel.

Les autres lignes ont une pente, impliquant des réactions redox-acido-basiques où à la fois les électrons et les protons sont transférés, avec des potentiels dépendants du pH.

La phase stable est le fer métallique, ne corrode pas. La région de corrosion montre des conditions où l'oxydation du métal en un produit soluble est thermodynamiquement favorable. La passivation se produit dans la région d'oxydes métalliques insolubles, formant un film protecteur.

II.7 Formes de corrosion

Les tuyaux en métal qui sont enterrés dans le sol peuvent subir différents types de corrosion en raison des conditions corrosives auxquelles ils sont exposés. Voici quelques-uns des types courants de corrosion associés aux tuyaux métalliques enterrés dans le sol :

NB : Tous les types de corrosion énumérés ci-dessous sont des types de corrosion électrochimique, car ils impliquent une réaction chimique suivie d'un déplacement d'électrons (est un flux de courant naturel).

II.7.1 Corrosion uniforme (généralisée)

La corrosion généralisée est la plus répandue. Elle s'étale sur toute la surface de l'objet exposé à l'environnement. Elle se caractérise par l'intervention d'un seul métal où toute la surface est simultanément anode et cathode, c'est à dire que les électrons fournis par l'oxydation à l'anode seront repris à la cathode à travers le métal lui-même (fig I.2). L'emplacement de l'anode et de la cathode change à tout moment, ce qui rend toute la surface du métal, susceptible de se corroder [16].

II.7.2 Corrosion localisée

La corrosion localisée est due à une hétérogénéité du matériau ou de l'environnement. On désigne par corrosion localisée toute manifestation agressive de l'environnement en des sites préférentiels d'une surface métallique. Ces sites préférentiels correspondent à des zones anodiques par opposition aux parties non attaquées cathodiques. [17]

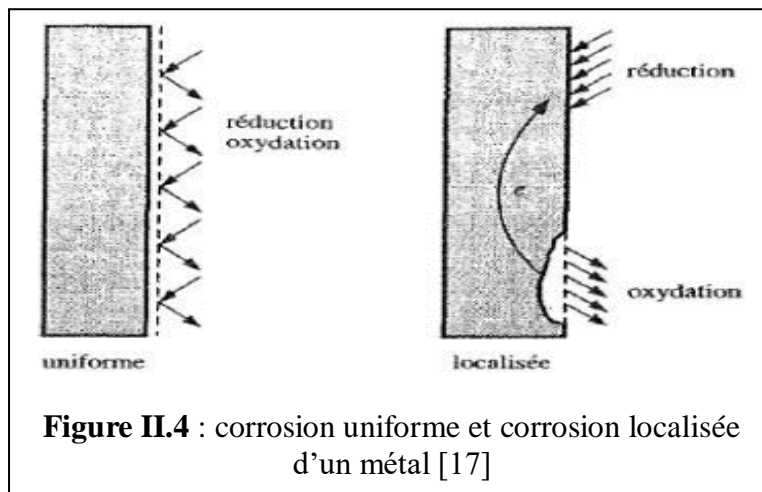


Figure II.4 : corrosion uniforme et corrosion localisée d'un métal [17]

II.7.2.1 Corrosion par piqûres

La corrosion par piqûres se caractérise par la formation de cavités à la surface du métal de profondeurs variables [18,19], de l'ordre de millimètres mais qui généralement ne dépassent pas plusieurs dizaines à quelques centaines de micron mètres de diamètre. Ce type de corrosion est produit par des anions, principalement par les ions chlorures [20]. L'apparition et la présence des défauts, dans la couche passive, développent la corrosion de celle-ci. La perturbation de la surface par ses hétérogénéités permet de créer des micros-zones non protégées qui sont anodiques (dissolution du métal).

La corrosion par piqûres se produit sur tous les métaux passifs dans des milieux suffisamment agressifs à partir d'un certain potentiel appelé potentiel de piqûre ou de rupture [21].

II.7.2.2 Corrosion galvanique

La corrosion galvanique est due à un contact entre des matériaux de nature différente placés dans un même électrolyte. Elle est aussi appelée **corrosion bimétallique** (fig I.4). Elle fonctionne comme une pile constituée de deux électrodes plongées dans un électrolyte qui est en général une solution diluée d'acide. Les deux électrodes sont reliées extérieurement par un circuit électrique qui assure la circulation des électrons et à la libération d'ions métalliques. Le matériau de potentiel le plus bas d'un assemblage galvanique est anode, l'autre cathode, et la valeur des potentiels normaux permet de déterminer le métal protégé et le métal attaqué [22].

II.7.2.3 Corrosion par crevaisson

Lorsqu'il y a une différence de concentrations d'ions ou de gaz dissous dans l'électrolyte, il résulte une formation d'une pile électrochimique et ce type de dégradation est habituellement appelé corrosion par crevasse ou une corrosion caverneuse [23]. La corrosion caverneuse s'apparente aux phénomènes d'aération différentielle. En fait, l'augmentation de la concentration en ions chlorures induit une diminution du pH provoquant une initiation d'une corrosion caverneuse [24].

II.7.2.4 Corrosion par courant alternatif (AC)

La corrosion AC se produit lorsque des courants alternatifs circulent à travers des structures métalliques qui se trouvent dans un environnement électrolytique, comme le sol ou l'eau.

Le mécanisme de la corrosion AC est souvent associé à l'électrochimie, où les courants alternatifs peuvent créer des gradients de potentiel électrique à la surface du matériau métallique. Ces gradients de potentiel peuvent entraîner la dégradation de la couche protectrice appelée passivation, ce qui rend le métal plus vulnérable à la corrosion [25].

II.8 L'entartrage des conduites

Toutes les eaux contiennent des sels minéraux et des substances dissoutes ou en suspension. La dureté de l'eau a pour conséquence la formation, lorsque certaines conditions sont remplies, de précipités plus ou moins compacts et adhérents. En effet, lors d'une augmentation de la température, d'une élimination de CO₂ dissous, d'une augmentation de la concentration en certains sels dissous ou, plus généralement, d'une modification des équilibres chimiques, des matières dissoutes peuvent cristalliser. Une couche adhérente plus ou moins compacte et isolante est alors formée à la surface de la conduite d'eau. Ce dépôt connu sous le nom de tartre, engendre la baisse des échanges thermiques, la réduction du diamètre partiel ou total des conduites d'eau, le dysfonctionnement des installations domestiques et industrielles et les équipements.

Le tartre est constitué majoritairement de carbonate de calcium (CaCO₃). C'est seulement lorsque le précipité formé se fixe sur les parois, que l'on a coutume d'utiliser le terme entartrage. L'entartrage est un phénomène très complexe et met un temps long à se manifester.

Pour qu'il y ait dépôt de tartre sur une surface d'échange, deux conditions principales doivent être réunies :

1. Il faut que la limite de solubilité soit dépassée, c'est à dire qu'il y ait sursaturation
2. Il faut ensuite que la vitesse de déposition soit suffisamment rapide [27]

Dans des cas la corrosion interne favorise l'entartrage des conduites telle que : les conduites ou des tuyaux en acier subissent de la corrosion, cela peut provoquer la libération d'ions ferreux (Fe²⁺) dans l'eau. Ces ions ferreux libérés peuvent réagir avec d'autres éléments présents dans l'eau, tels que les ions carbonates (CO₃²⁻) et les ions bicarbonates (HCO₃⁻). Cette réaction chimique peut conduire à la formation de précipités de fer, qui sont essentiellement des particules solides de fer. Ces particules de fer en suspension dans l'eau ont tendance à se déposer progressivement sur les parois internes des conduites. Une fois que ces particules de fer se sont accumulées sur les parois des conduites, elles peuvent servir de points d'ancrage pour d'autres sels minéraux dissous dans l'eau, comme le calcium et le magnésium. Ces sels minéraux ont tendance à adhérer plus facilement aux surfaces rugueuses ou irrégulières lorsqu'ils entrent en contact avec les particules de fer. Par conséquent, la présence de ces particules favorise la formation d'entartrage car elles offrent une surface propice à l'adhérence des sels minéraux.

En fin de compte, la présence de toute ces conditions cela peut entraîner la formation de dépôts calcaires plus importants à l'intérieur des conduites, ce qui réduit le débit d'eau, augmente la pression nécessaire pour déplacer l'eau et entraîne des obstructions.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une bibliographie concernant le phénomène de corrosion et son processus d'occurrence, ainsi que les différents types de corrosions selon leurs causes. Nous avons également évoqué aussi l'influence de la corrosion sur l'entartrage des conduites. Dans le chapitre qui va suivre, nous allons élaborer le moyen de lutte contre la corrosion-Protection cathodique-.

Chapitre III : Moyen de lutter contre la corrosion-Protection cathodique-

III. Moyen de lutte contre la corrosion-Protection cathodique-

Introduction

Ce chapitre explore d'abord les différentes approches de la protection cathodique, notamment la protection par anodes galvaniques et la protection par courant électrique imposé. Ensuite, il se concentre sur le dimensionnement système de la protection cathodique par courant électrique imposé dans le projet d'AEP Ain Azel-SETIF. Ce volet comprend une présentation des concepts théoriques, y compris les équations des paramètres électriques, ainsi que les résultats des calculs issus de notre étude.

III.1 Principe de la protection cathodique :

La corrosion des métaux au contact des milieux aqueux (eaux, sols...) est de nature électrochimique. Dans ces milieux, l'application de la technique de protection cathodique a pour but de diminuer le potentiel de polarisation du métal à un niveau pour lequel la vitesse de corrosion du métal est réduite d'une façon significative. Le seuil de la protection cathodique peut être déterminé thermodynamiquement. Il correspond au **seuil d'immunité** tel que représenté dans le diagramme de Pourbaix correspondant à un état à partir duquel la corrosion devient théoriquement impossible.

Pour modifier le potentiel du métal à protéger cathodiquement, on utilise une anode installée dans le même électrolyte. Les anodes peuvent être de deux types :

- a- Soit les anodes ayant un potentiel plus électro-négatif que le métal à protéger (anodes sacrificielles ou galvaniques).
- b- Soit des anodes couplées à un générateur de courant imposant une différence de potentiel entre des deux métaux (méthode à courant imposé).

III.1.1 Protection cathodique par anodes sacrificielles ou anodes réactives :

Le métal à protéger est relié électriquement à une électrode constituée par métal moins noble qui joue le rôle d'anode dans la première pile. Dans ce type de protection, l'anode se consomme par dissolution en portant la surface du métal à protéger au-delà de son potentiel d'immunité. La réalisation est schématisée dans la figure suivante :

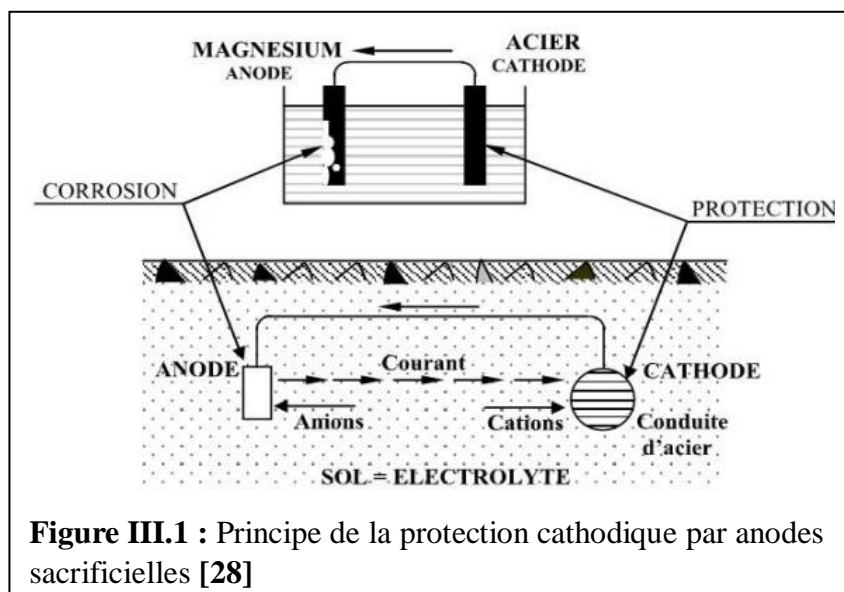
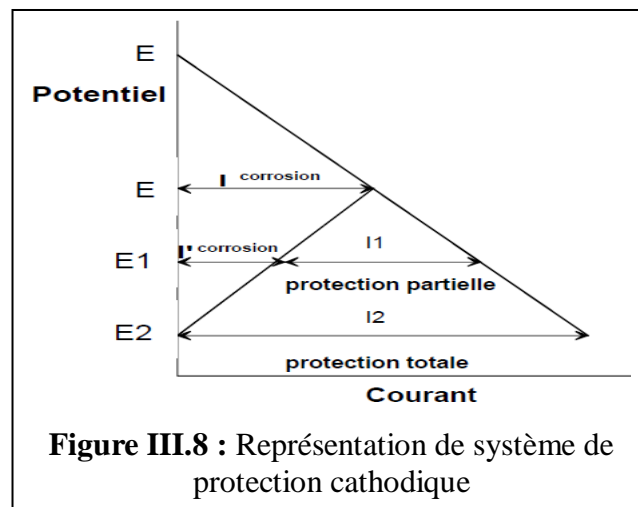


Figure III.1 : Principe de la protection cathodique par anodes sacrificielles [28]

L'anode se dissout et ramène le potentiel de la structure dans sa zone d'immunité. Pour que la protection existe, il faut :

- Que la pile débite, donc l'anode soit reliée électriquement au métal,
- Que la surface à protéger et l'anode soient plongées toutes dans le même milieu électrique.
- Que l'installation soit adaptée à la surface à protéger (dimensions, nombres, répartitions des anodes).

Représentation graphique de la protection cathodique :



Explication :

Dans les conditions de corrosion libre, la structure métallique a un potentiel de corrosion mixte E et se corrode à une vitesse proportionnelle à $I_{\text{corrosion}}$.

Si l'on applique la polarisation cathodique afin que le potentiel de la structure diminue jusqu'à E1 par le courant I1 appliqué extérieurement, alors l'objet est partiellement protégé, puisque la vitesse de corrosion a diminué et vaut $I'_{\text{corrosion}}$.

Si l'on augmente le courant extérieur jusqu'à I2 pour que le potentiel descende à E2 correspondant au potentiel réversible de la réaction anodique, alors la dissolution anodique sera stoppée. L'objet est alors sous protection cathodique.

Lorsque tous les points de l'ouvrage aura atteint le potentiel de protection (EP) qui est égal à celui de l'anode (EA), l'ensemble sera devenu une seule cathode annulant de ce fait le courant de corrosion (i_{corr}) par un courant de protection minimale ($I_{\text{pro-min}}$). On peut abaisser le potentiel de l'ensemble à un potentiel plus bas (EP) avec un courant (IP). Le courant IP est toujours supérieur au courant de corrosion I_{corr} et qu'il dépend des pentes respectives des courbes de l'anode et de la cathode.

Remarque :

La protection cathodique par anodes sacrificielles n'a pas une durée indéfinie, elle s'arrête

avec la disparition du métal sacrificiel ou par blocage électrochimique. Les métaux les plus employés par la protection cathodique sont : Al, Zn, Mn qui possèdent des potentiels de dissolution très négatifs.

III.1.1.1 Influence de la température :

La valeur relative du potentiel que prennent les deux métaux plongés dans un électrolyte donné peuvent varier avec la température. Donc, un métal moins noble à la température ordinaire peut devenir plus noble à une température élevée, d'où il y'a alors inversion de la polarité de la pile. C'est le cas du couple Fer-Zinc dans l'eau.

A la température 30°C le potentiel stationnaire de Fer est plus noble de celui de Zinc, alors qu'à la température 40°C il devient moins noble. On déduit que la protection d'une canalisation en fer par le Zinc (galvanisation) ne peut être employé sans risque quand la température est élevée (c'est le cas des installations de chauffage central).

III.1.2 Protection cathodique par courant imposé :

Elle utilise une source de courant continu qui débite dans un circuit comprenant : un déversoir(masse anodique), l'électrolyte (sol ou eau), la structure à protéger. Elle consiste à relier la structure à protéger au pôle négatif d'un générateur à courant continu, dont le pôle positif est connecté à un déversoir de courant plongeant dans le même électrolyte que la structure à protéger (sol ou eau). Le courant continu débité par le générateur est diffusé dans l'électrolyte ambiante via le déversoir et est capté par la structure à protéger qui est ainsi portée à un potentiel électronégatif par rapport au milieu dans lequel elle se trouve. Le déversoir de courant doit être constitué d'un métal le moins corrodable possible pour avoir une durée de vie assez longue (alliage inerte (Fe 15% et Si), graphite, Plomb et métaux précieux).

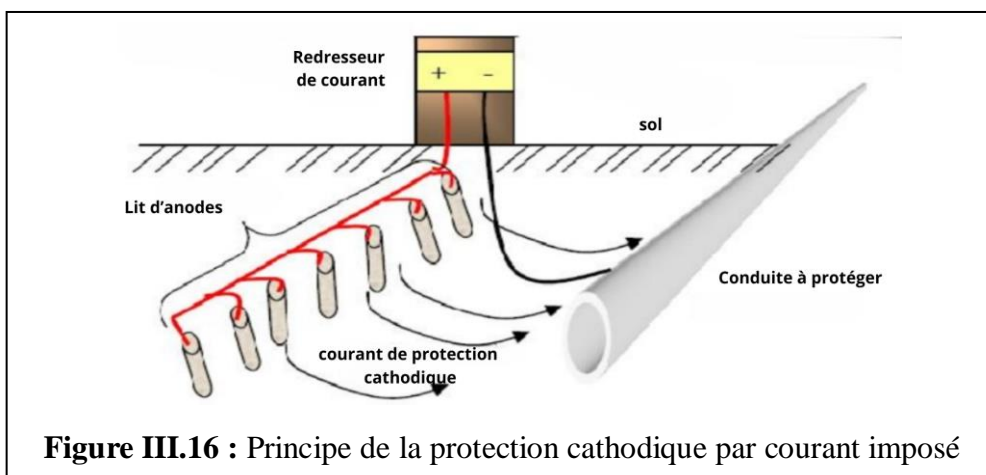


Figure III.16 : Principe de la protection cathodique par courant imposé

Deux paramètres fondamentaux contrôlent la protection cathodique par le courant imposé sont :

- Le potentiel de protection (E_p)
- La densité du courant de protection (i_p).

III.1.2.1 Le potentiel de protection E_p :

Le potentiel de protection cathodique est donné par l'équation de Nernst :

$$E_p = E^\circ - \frac{RT}{nF} \ln 10^{-6}$$

Remarque :

Le potentiel de protection E_p , peut dépendre dans une certaine mesure, de la corrosivité de l'environnement (électrolyte), mais il dépend surtout du type de métal utilisé.

Pour une conduite en acier et une électrode Cu/Cu-SO₄, le potentiel de protection vaudra au :

1. Dans environnement aérobie : $E_p < - 850$ mV.
2. Dans environnement anaérobie : $E_p < -950$ mV.

III.1.2.2 Le courant de protection I_p :

Le courant de protection I_p est le courant cathodique nécessaire pour imposer le potentiel de protection cathodique correspondant au courant de protection I_p . En d'autres termes, I_p est la quantité de courant nécessaire pour maintenir le potentiel électrique d'une structure métallique à une valeur spécifique qui la protège contre la corrosion.

Sa valeur dépend de la surface de la structure à protéger (S) et la densité du courant de protection (i_p).

$$I_p = i_p * S$$

Où : i_p : la densité du courant de protection (A/m²), S : est la surface à protéger (m²).

Remarque :

La protection cathodique par le courant imposé implique l'utilisation d'un redresseur. Cette méthode offre l'avantage de pouvoir régler la tension ou le courant en fonction des besoins.

III.1.2.3 Domaines d'application de protection cathodique par le courant imposé :

Elle est utilisée pour :

- Les conduites enterrées ou immergées revêtues ou nues,
- Les plates-formes de forage pétrolier,
- Les réservoirs de stockage de grande capacité,
- Les ouvrages concentrés tels que les stations de pompes

Cette méthode est assez délicate et sensible aux incidents mécaniques et électriques. Elle nécessite une isolation complète. Elle exige une surveillance régulière car toute modification de courant risque d'entraîner une variation de potentiel qui implique la corrosion de la structure.

III.1.3 Comparaison entre les deux systèmes de protection cathodique

Tableau III.1 : Comparaison entre les deux systèmes de protection cathodique

	PC Anodes sacrificielles	PC Courant imposé
- Complexité de l'installation	Simple	Complexe
- Source d'énergie	Inutile	Nécessaire
- Distribution du courant sur la structure	Souvent hétérogène	Homogène
- Facilité d'adapter le courant consommé en fonction de la demande	Adaptation possible à travers une liaison résistante	Adaptation facile
- Poids de l'installation	Importante (surcharge en poids pour des longues durées de vie)	Peu d'accroissement
- Influence de la résistivité du milieu	Non envisageable si la résistivité du milieu est trop petite	Pas d'influence
- Débit par anode	Faible	Elevé
- Nombre d'anodes	Important	Faible

III.2 Etude d'un cas du système de protection cathodique par courant imposé

III.2.1 Critère de la protection cathodique PCCI

Il est considéré qu'une canalisation en acier est parfaitement protégée cathodiquement lorsque son potentiel par rapport à l'électrode de référence Cu/ CuSO₄ en tous points est en dessous du seuil de -850mV (Domaine d'immunité de l'acier).

III.2.2 Présentation de la conduite

La conduite à protéger est la conduite de tronçon AEP AIN AZEL transportant l'eau potable de la station de pompage du forage Merrzghlal de Ain Azel jusqu'à le réservoir de 1000 m³. Les caractéristiques techniques de cette conduite sont comme suit :

Tableau III.2 : Les caractéristiques techniques de la conduite AEP Ain Azel.

Diamètre extérieur	$D_{ext} = 250 \text{ mm}$
Diamètre intérieur	$D_{int} = 243 \text{ mm}$
Longueur	$L = 11\,000 \text{ m}$
Epaisseur moyenne	$e = 3.5 \text{ mm}$
Nuance	API -5L grade B
Nature du Revêtement	Couche 01 : Résine époxy. Couche 02 : Revêtement polyéthylène
Départ	Forage Merrzghlal
Arrivée	Réservoir de 1000 m^3

SOURCE : ADE-Setif

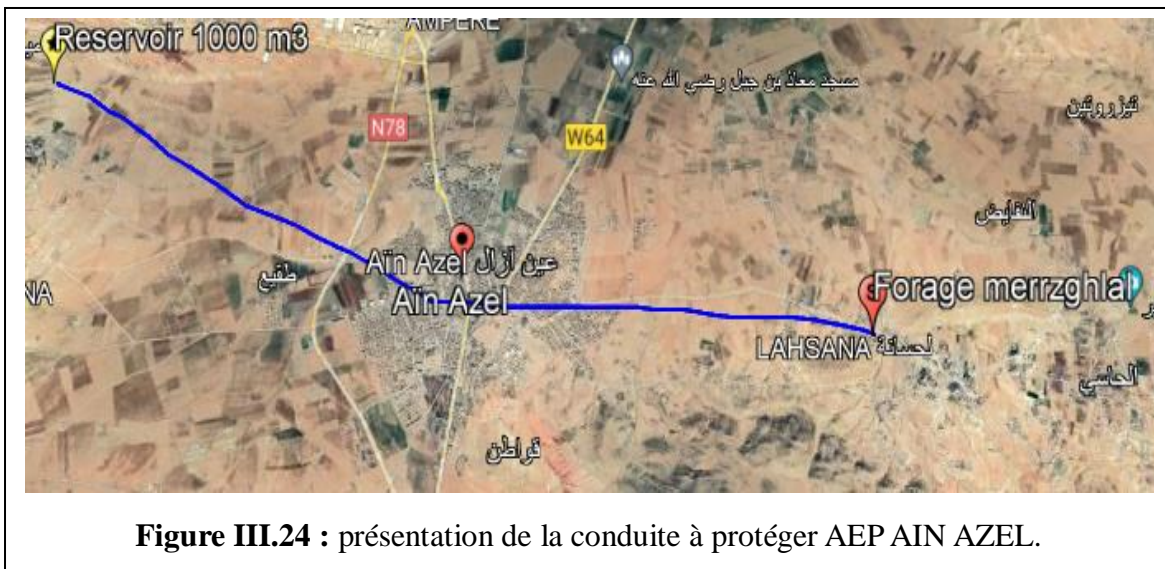


Figure III.24 : présentation de la conduite à protéger AEP AIN AZEL.

III.2.3 Résistivité du sol

Le sol exerce une influence particulière sur l'acier (Risque de corrosion), la résistivité dépend de l'agressivité du sol, les facteurs qui influent sur la nature du sol sont :

- Composition chimique
- Taux d'humidité
- PH du sol
- Granulométrie
- Aération

La mesure de résistivité du sol c'est la résultante totale de tous ces facteurs.

La méthode utilisée pour les mesures des résistivités pour le sol où les canalisations AEP Ain Azel est enfouie, est celle des quatre piquets appelés méthode de WENNER (Annex N°01). Les valeurs mesurées pour le tronçon AEP Ain Azel sont dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.3 : Relevé de mesures de la résistivité du sol.

P.k (Km)	Résistivité des terrains	P.k (Km)	Résistivité des terrains
1	70.1	25	91.3
2	51.2	26	81.9
3	33.6	27	114.7
4	14.6	28	177.1
5	15.7	29	253.0
6	18.1	30	281.6
7	5.5	31	410.0
8	13.4	32	212.0
9	17.8	33	161.7
10	23.3	34	101.3
11	21.3	35	97.7
12	43.4	36	110.7
13	23.3	37	95.0
14	22.2	38	80.3
15	27.7	39	90.6
16	33.8	40	102.7
17	45.6	41	131.1
18	126.1	42	180.4
19	48.2	43	25.1
20	57.9	44	33.4
21	85.0	45	57.1
22	129.0	46	85.4
23	74.6	47	20.12
24	67.2	48	260.8

SOURCE : ADE-Setif

Les limites de résistivité considérées sont présentées au (Tableau III.4) où les classes de sol sont ainsi définies en fonction de leur résistivité et de la corrosivité associée à chacune d'elles

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

Des chiffres de résistivité ($\Omega. m$)	Agressivité Du Sol
1000-250	Presque pas agressif
250-100	Faiblement Agressif
100-50	Agressif
50-10	Fortement Agressif
Inférieure à 10	Extrêmement Agressif

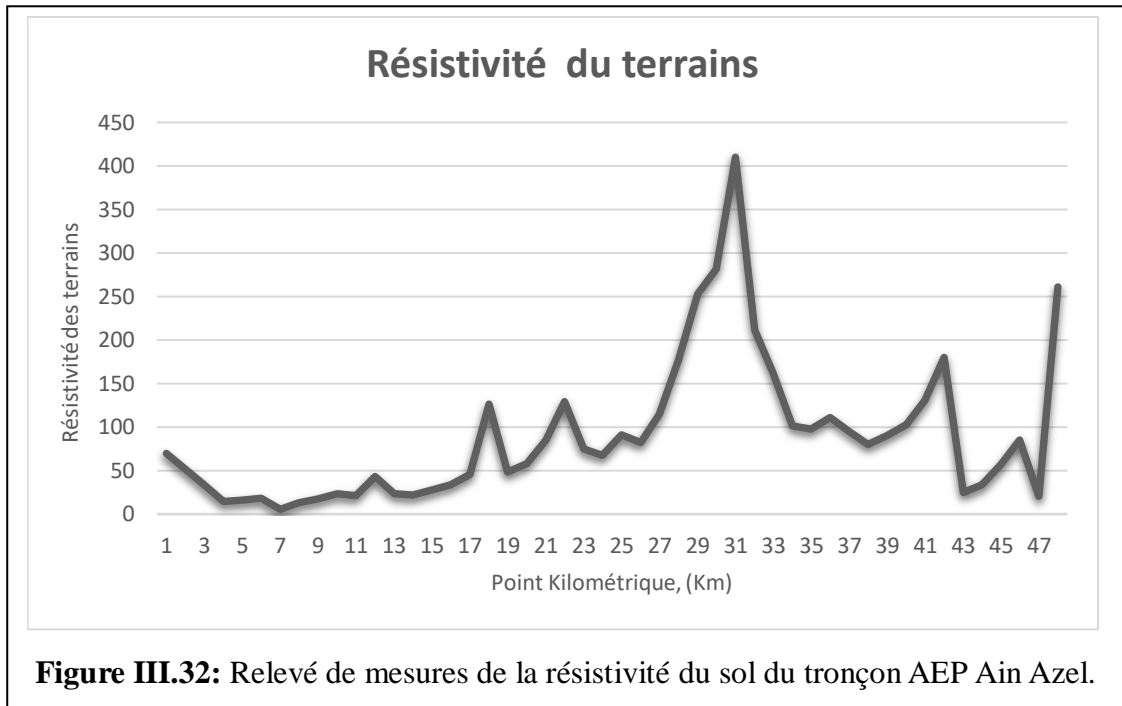


Figure III.32: Relevé de mesures de la résistivité du sol du tronçon AEP Ain Azel.

La figure (III.5) présente les mesures réelles de la résistivité du sol sur le tronçon de canalisation AEP Ain Azel. Tenant compte la résistivité moyenne du sol qui est de $90.8 \Omega.m$.

Pour un calcul propice et un bon dimensionnement du système de protection cathodique, nous arrondirons cette résistivité à une valeur de $79.0 \Omega.m$ (C'est la résistivité à une profondeur de 1 m) soit un environnement **agressif**.

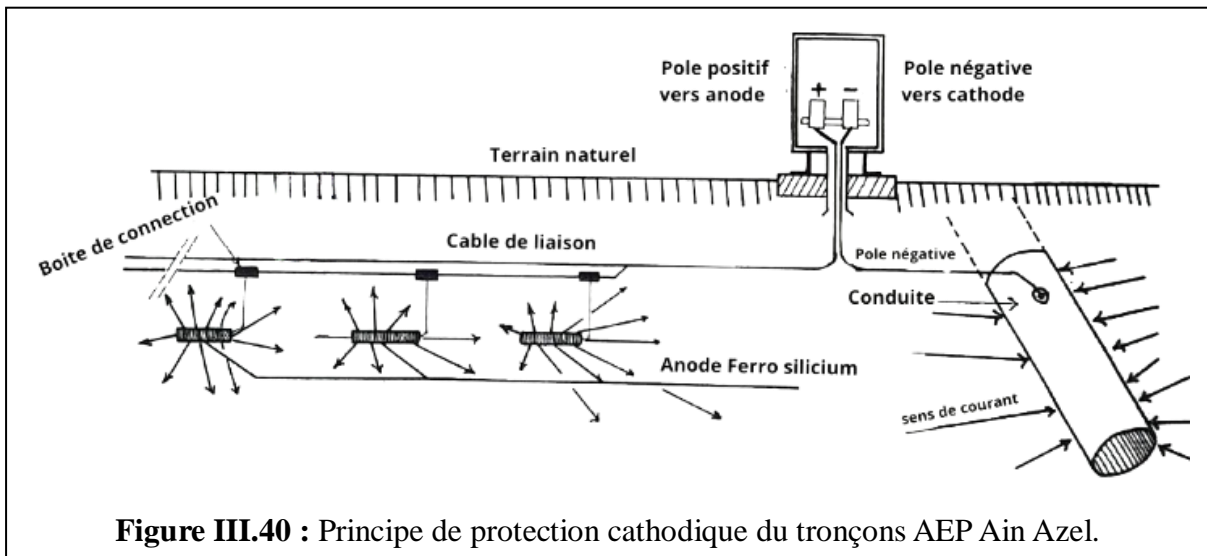


Figure III.40 : Principe de protection cathodique du tronçons AEP Ain Azel.

NB : dans ce que vas suit on va adopter la protection cathodique par courant imposée à cause les limites d'application des anodes sacrificielles :

- Débit du courant dépendant du bon contact avec le métal à protéger.
- Recommandée pour les petites installations (des conduites avec une faible longueur).

- Conditions environnementales : n'est pas recommandée pour des sols agressifs.

III.2.4 Mesure d'un potentiel

On mesure le potentiel cathodique grâce à une électrode de référence $Cu/CuSO_4$ à l'aide d'un voltmètre.

Electrode de sulfate de cuivre :

C'est l'électrode de référence, très généralement utilisée pour la mesure de potentiel des structures enterrées telles que les canalisations et les bacs de stockage.

❖ Contrôle Méthode de mesure du potentiel

On plonge la partie poreuse de l'électrode $Cu/CuSO_4$ dans le sol préalablement humidifié si ce dernier est sec. La valeur du potentiel mesuré dépend de la position de l'électrode par rapport à la structure en acier c'est à dire lors de la mesure du potentiel électrochimique, l'électrode de référence est placée à proximité de la structure en acier comme le présente la figure III.7.

Des mesures multiples peuvent être effectuées sur chaque contact de la sonde avec la cathode en déplaçant l'électrode de référence à différents points de la surface du sol.

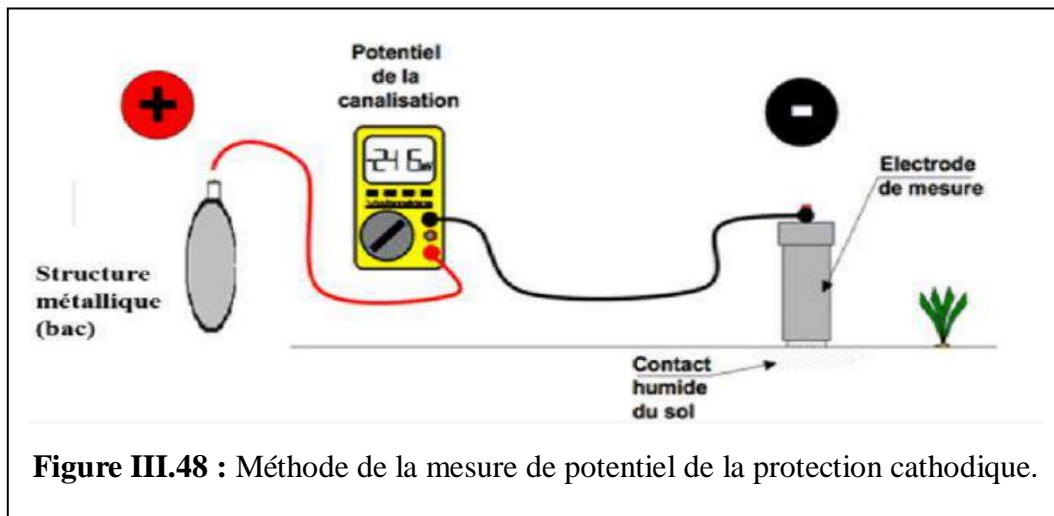


Figure III.48 : Méthode de la mesure de potentiel de la protection cathodique.

III.2.5 Description de l'équipement PC

L'installation du système de protection cathodique comprendra :

- Un redresseur
- Un lit d'anodes
- Câbles de liaison
- Joints isolants
- Shuntage
- Prise de potentiels.

III.2.5.1 Redresseur

- Alimentation : 220 Hz monophasé

- Courant redressé
- Tension : 50 V minimum, la tension sera réglable de 0 à 50 V par commutateur (basse tension TBT)
- Intensité : 20 ampères.

Le redresseur sera du type à diodes silicium. Un tel pont redresse les deux alternances de courant monophasé.

Il comprendra :

- Un voltmètre, un ampèremètre de sortie permettant de contrôler la tension et le débit et mise en marche.
- En amont : un sectionneur (coupe-circuit).
- Le redresseur sera relié à une prise de terre.

III.2.5.2 Les Anodes

Le lit d'anode sera constitué par des anodes et enrobé de backfill, (poudre de coke ou de graphite) occupant un volume de $\text{Ø}250 \text{ mm} \times L= 2000 \text{ mm}$. Il est utilisé comme régulateur de corrosion pour tous types d'anodes, installées dans tous types de sol.

Le lit d'anodes sera en position horizontale dans une tranchée de 1 m de profondeur, l'écartement entre deux anodes successives sera de 5 m mesuré d'axe en axe.

Les anodes seront en fer silicium et mesurent 1200 mm de long et 50 mm le diamètre et pèsent 20 Kg chacune. Ces anodes devront convenir à une utilisation dans milieu salin et auront une grande résistance aux attaques par le chlore naissant, elles ne seront donc pas sujettes à des défaillance prématurées.

III.2.5.3 Câble électrique

Le câble aura une section de 16 mm^2 , il sera constitué par un seul conducteur en cuivre, il sera isolé en polyéthylène réticulé chimiquement et gaine de p.v.c. (ou type U 1000 R 02 V $1 \times 16 \text{ mm}^2$ ou 25 mm^2).

Entre le redresseur, cathode et anode, le câble sera posé à une profondeur de 0,60 m. Hors sol, le câble sera fixé par des colliers.

- La connexion des câbles avec la canalisation se fera par aluminothermique.
- Dans les zones non dangereuses, la connexion des câbles se fera sur la plaque soudée sur les conduites.

III.2.5.4 Joints isolants

Des joints isolants seront placés aux extrémités des conduites (ou il existe le rassemblement avec les accessoires), ainsi qu'à chaque piquage.

Description des joints à brides

Le joint complet d'isolement de brides comprendra les éléments suivants :

- Un joint isolant
- Rondelles isolantes
- Gaines isolantes pour goujons de brides (Annex n°03).

NB :

- Les goujons de brides : sont des éléments de fixation utilisés dans l'assemblage de brides pour connecter des tuyaux ou des équipements.

III.2.5.5 Shuntage

Toutes pièces spéciales montées à l'aide des joints non soudés, ainsi que les vannes, soupapes et les ventouses seront shuntées à l'aide d'un câble type 500 V de 1 x 16 mm².

NB : -Shuntage de toutes pièces assemblées à l'aide de brides.

Remarque :

Le shuntage consiste à transférer le courant électrique d'une conduite à une autre à l'aide de câbles de shuntage. Ce processus est utilisé pour équilibrer la distribution du courant cathodique dans un système de protection, assurant ainsi une protection uniforme contre la corrosion

Les shunts, généralement des câbles électriques, permettent de créer des connexions électriques entre différentes parties d'une installation de tuyauterie. En transférant le courant d'une conduite à une autre par le biais du shuntage, on peut équilibrer la distribution du courant cathodique, assurant ainsi une protection cathodique adéquate sur toutes les sections de la conduite.

III.2.5.6 Prise de potentiel

Pour faciliter le contrôle du bon fonctionnement de l'installation du système de protection cathodique, on placera quelques prises de potentiel. C'est un moyen qui nous permet d'accéder à la conduite pour relever le potentiel de celle-ci (Annex n° 04).

III.2.6 Calcul et dimensionnement du système de protection cathodique PCCI [29]

III.2.6.1 Calcul du nombre de postes de soutirage

Le poste de soutirage est un générateur de courant continu. Habituellement il est constitué par un transformateur-redresseur alimenté à partir du réseau électrique basse tension 220V. Les postes transformateurs redresseurs sont de type 50 volts – 20 ampères en sortie continue, alimenté en courant alternatif 220 volts monophasé 50 Hz.

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

$$N_p = \frac{L}{L_p}$$

L : Longueur de la surface de conduite à protéger (m).

L_p : La portée du poste de protection, (m).

L'évaluation de la longueur de postes se soutirage de protection L_p est faite à partir de la formule suivante :

$$L_p = \frac{1}{a} \ln \left(\frac{E_s}{E} + \sqrt{\left(\left(\frac{E_s}{E} \right)^2 + 1 \right)} \right)$$

a : Coefficient d'atténuation de la structure, (m^{-1}).

E_s : la chute de potentiel au point de soutirage

E_0 : la chute de potentiel aux extrémités de la portée du poste de soutirage.

$$a = \sqrt{\frac{r}{R}}$$

r : Résistance longitudinale de la conduite, (Ω/m)

$$r = \frac{\delta a}{\pi \cdot e(D_{ext} - e)}$$

R : Résistance transversale de la conduite, ($\Omega \cdot m$).

$$R = \frac{R_{is}}{\pi \cdot D_{ext}}$$

$\delta a = 21 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$: Résistivité de l'acier

e : L'épaisseur du pipeline.

$R_{is} = 18360 \Omega \cdot m^2$: Résistance d'isolement donnée par le revêtement

Pour le calcul des résistances r et R , on prendra le grand diamètre et l'épaisseur appropriée de la conduite AEP Ain Azel. On aura :

$$r = 0.78 \times 10^{-4} \Omega/m$$

$$R = 2.34 \times 10^4 \Omega \cdot m$$

Et puis, en substituant les valeurs de r et R on obtient :

$$a = 0.58 \times 10^{-4} m^{-1}$$

$E_{\text{extrémité}} = -950 \text{ mV}$

$$E_0 = (E_{\text{extrémité}} - E_{\text{naturel}}) = (-950 - (-500)) = -450 \text{ mV}$$

$E_{\text{soutirage}} = -1200 \text{ mV}$

$$E_s = (E_{\text{soutirage}} - E_{\text{naturel}}) = (-1200 - (-500)) = -700 \text{ mV}$$

Remarque : $E_{\text{extrémité}}$ et $E_{\text{soutirage}}$ sont des mesures déjà effectuées (Source : ADE Setif).

Alors, la portée des postes de protection L_p aura :

$$L_p = 2.11 \times 10^4 \text{ m}$$

Le nombre de postes de soutirage sera :

$$N_p = \frac{11000}{21124} = 0.52 \approx \mathbf{1 \text{ poste}}$$

III.2.6.2 Courant de la protection :

L'intensité du courant de protection I_s émis dans le sol par le déversoir, se répartit dans le sol et retourne à la conduite. Le passage du courant détermine dans la conduite un abaissement de potentiel. Par hypothèse, la protection cathodique est dimensionnée pour une densité de courant de 0.92 mA/ m^2

Le calcul requis pour protéger la surface externe globale de la canalisation est déterminé comme suit :

$$I_{tot} = d \times S_p$$

Avec : d : Densité de courant maximale (A/ m^2)

S_p : Surface à protéger, (m^2)

$$S_p = \pi * D_{ext} * L$$

L : longueur de la conduite (m)

Application numérique :

$$I_{tot} = 0,00092 \times 8639.38 = \mathbf{7.95 \text{ A}}$$

$I_{tot} = 8 \text{ Ampères.}$

Ce courant total $I_{tot} = 8$ ampère requis sur la canalisation par un seul poste de soutirage.

III.2.6.3 Calcul du nombre d'anodes (Lit d'anodes) :

Le déversoir (lit d'anodique) est destiné à diffuser dans le sol le courant de protection provenant du pôle positif d'un poste transformateur-redresseur. Cette diffusion de courant s'effectue à partir des anodes qui seront installées horizontalement en fond de tranchée et raccordées à un câble de liaison. Il doit donc être constitué de matériaux conducteurs de courant. Se comportant comme une anode, il est soumis aux phénomènes d'oxydation. La masse du matériau constituant le déversoir devra être déterminée pour que l'installation ait une durée de vie de l'ordre de 15 à 30 ans.

Les lits d'anode (Figure III.8) sont généralement constitués de :

- Anodes.

- Un câble de liaison des anodes.
- Mélange régulateur : backfill.

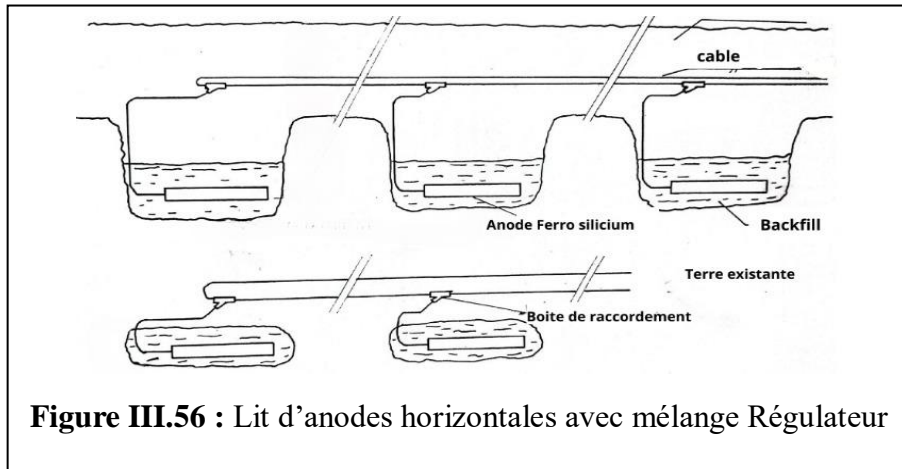


Figure III.56 : Lit d'anodes horizontales avec mélange Régulateur

Les anodes seront enfouies dans le backfil de coke de faible résistivité.

L'implantation du lit anodique sera réalisée de préférence dans une zone de basse résistivité. Les anodes utilisées seront en alliage Ferro-Silicium (Anode Fe/Si).

Tableau III.5 : Caractéristiques dimensionnelles de l'anode

Type d'anode	Corps d'anode		
	Ø (mm)	L (mm)	Poids Net (kg)
2'' × 48''	50	1200	20

Le nombre d'anodes est obtenu à partir de la formule suivante :

$$N = \frac{Ma}{ma}$$

Avec :

N : Nombre d'anodes.

Ma : Masse totale en *kg*.

ma : Masse unitaire d'anode en *kg*. $ma = 20$ kg

Pour répondre à un besoin en courant de 8 Ampères, la masse anodique sera de :

$$Ma = Ca \cdot T \cdot I_{tot}$$

Avec :

Ca : Consommation de l'anode en *kg/ A.an* (0.5 *kg/ A. an* pour des anodes en *Fe/ Si*)

T : Durée de vie en année (30 *ans*).

I : Courant en ampère.

A.N : $Ma = 0,5 \times 30 \times 8$

$$M_a = 120 \text{ kg}$$

Donc le nombre d'anodes sera de :

$N = 6$ anodes , d'où 6 anodes.

III.2.6.4 Puissance du poste redresseur :

La puissance de redresseur est calculée à partir de la formule suivante :

$$P = R \times I^2 = (R_T + R_A + R_C) \times I^2 \quad (\text{Watt})$$

Avec : R_T : Résistance de la conduite, (Ω/ m)

R_A : Résistance du déversoir, (Ω/ m)

R_C : Résistance du câble, (Ω/ m)

- **Résistance du conduite R_T :**

Négligeable

- **Résistance du déversoir R_A :**

La résistance théorique du déversoir permet de fournir le courant requis de 8 ampères sous une tension inférieure à la tension maximale de redresseur de 50 volts.

Chaque anode sera enrobée dans un cylindre de backfill avec les données suivantes :

$$L = 2000 \text{ mm} ; \quad \varnothing = 250 \text{ mm} \quad (\text{Les données de back-fill})$$

La résistance globale de déversoir en tenant en compte le backfill est donnée par la formule suivante :

$$R_A = \frac{R(\text{Backfill/ sol}) + R(\text{anode/ Backfill})}{N_a}$$

Avec :

R_A : Résistance globale de déversoir en Ω ;

N_a : nombre des anodes ; $N_a = 6$ anodes

$R_{(\text{anode/ Backfill})}$: Résistance de l'anode par rapport au backfill en Ω ; $R_{(\text{anode/ Backfill})} = 1.2 \Omega$.

$R_{(\text{Backfill / sol})}$: Résistance du back-fill par rapport au sol en Ω ; Elle est donnée par la formule de peter :

$$R(\text{Backfill/ sol}) = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \log\left(\frac{4 \cdot L}{D}\right)$$

Avec :

ρ : Résistivité du sol en $\Omega.m$; telle que : $\rho = 79.0 \Omega.m$

L : Longueur de cylindre de backfill en m ;

D : Diamètre de cylindre de backfill en m .

$$R(\text{Backfill/sol}) = \frac{79}{2 \times \pi \times 2} \log \left(\frac{4 \times 2}{0.25} \right)$$

$$R(\text{Backfill/sol}) = 9.47 \Omega$$

Alors :

La résistance globale du déversoir : $R_A = 1.78 \Omega$

- **Résistance du câble :**

Le câble utilisé est de type U1000R02V, constitué de conducteur en cuivre. Les différentes liaisons existantes sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau III.6 : Câbles de liaison

Type de prise	Section (mm ²)	Longueur (m)
Câble d'anodes	$S_{c_1} = 16$	$L_{c_1} = 30 m$
Câble de liaison des anodes	$S_{c_2} = 25$	$L_{c_2} = 80m$
Câble de liaison à la borne (+) du transformateur redresseur	$S_{c_3} = 50$	$L_{c_3} = 200m$

$$R_c = \rho_c \cdot \frac{L_c}{S_c} = \rho_c \cdot \left(\frac{L_{c_1}}{S_{c_1}} + \frac{L_{c_2}}{S_{c_2}} + \frac{L_{c_3}}{S_{c_3}} \right)$$

ρ_c : Résistivité du câble en $\Omega.m$.

$$R_c = \rho_c \cdot \frac{L_c}{S_c} = 1,72 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{30}{16} + \frac{80}{25} + \frac{200}{50} \right)$$

$$R_c = 0.156 \Omega$$

Donc : $R = 1.936 \Omega$, valeur qui conduit à une puissance de : $P = 123.9Watt$

III.2.6.5 Tension aux bornes de redresseur :

De même la résistance $R = 1.936 \Omega$ conduit à une chute de tension (Poste redresseur) de :

$$U = R \cdot I \quad (Volt)$$

$$U = 15.48 Volt$$

Conclusion

Les résultats obtenus à partir des calculs de dimensionnement du système de protection cathodique pour la conduite AEP Ain Azel ont montrés ce qui suit :

- Le nombre de postes de soutirage obtenu est d'un (01) poste pour une surface totale de la structure à protéger, de 8635 m²
- Le courant total $I_{tot} = 8$ ampère requis sur la canalisation.
- Le nombre d'anodes est de 06 anodes par déversoir. La durée de vie de chaque anode est estimée à 20 ans

Conclusion Générale

La technique de protection cathodique par courant imposé couple à une protection passive, a pour principe de faire circuler un courant électrique entre la structure métallique (pipeline) et le déversoir anodique favorisant ainsi, la réaction cathodique au niveau de ce métal que l'on veut protéger contre la corrosion.

L'étude approfondie du système de protection cathodique appliqué à la canalisation AEP Ain Azel-Setif a permis de mettre en lumière des résultats significatifs et des implications pratiques. La détermination du nombre de postes de soutirage, le calcul du courant total nécessaire, ainsi que le dimensionnement des anodes ont été des éléments cruciaux dans l'efficacité et la durabilité du système.

Les résultats obtenus démontrent clairement la pertinence de l'approche théorique dans la mise en œuvre pratique de la protection cathodique. L'obtention d'un seul poste de soutirage pour une surface totale de 8635 m² témoigne de l'efficacité du système dans des conditions spécifiques. De plus, la gestion du courant total de 8 ampères sur la canalisation répond aux exigences de protection, assurant ainsi une prévention adéquate contre la corrosion.

L'estimation de la durée de vie des anodes à 20 ans confirme la durabilité du système, soulignant l'importance de l'entretien périodique pour assurer une protection continue. Cette étude de cas offre ainsi des perspectives concrètes sur la manière dont la théorie de la protection cathodique peut être appliquée avec succès dans des contextes réels.

En somme, ce mémoire contribue significativement à la compréhension approfondie de phénomène de corrosion ainsi que le moyen de la lutter, la protection cathodique des conduites enterrées, offrant des recommandations pratiques pour les professionnels de l'ingénierie et de la gestion des infrastructures. Il souligne l'importance de combiner une solide base théorique avec une approche adaptée aux spécificités de chaque installation pour garantir une protection cathodique efficace et durable.

Bibliographie

- [1] Mars Guy Fontana. (1978). Corrosion Engineering,
- [2] Muhammad Wasim . (2018). 'External corrosion and its effects on mechanical properties of buried metal pipes'
- [3] Rym Akkouche. (2017). Corrosion des aciers dans les sols : mécanismes et cinétiques associés aux périodes transitoires d'humidification/séchage.
- [4] Muhammed Wasseem. Factors influencing corrosion of metal pipes in soils.
- [5] D. Landolt, corrosion et chimie de surfaces des métaux, presses polytechniques et universitaires Romandes, Lausanne, (1993).
- [6] P.L. Veronique Nobel, étude du mécanisme d'action de monofluorophosphate sodium comme inhibiteur de la corrosion des armatures métalliques dans le béton. Université Pierre & Marie Curie, Paris 6, Février 2004, pp 21-23, pp 47-51, Février 2004.
- [7] R.D.kane, S.Srinivasan, experience survey on corrosion monitoring and mitigation techniques for sweet well production. CLI International, INC, HOUSTON, TX, 1996,
<http://www.corrosionsource.com/InterCorr/96>
- [8] H.Uhlig, « corrosion et protection », édition. DUNOD, pp 87-102 et pp 231- 240, ISBN2-100-04191-6, Paris (1970).
- [9] R. G. Kelly, Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering, Marcel Dekker, 2003.
- [10] P.Boumersbach, C.Dumont, J.P.Millet, electrochemical characterization of a corrosion inhibitor: influence of temperature on the inhibition mechanism, 207th meeting of the electrochemical society, Quebec City (Canada), mai 2005.
- [11] R.D.kane, S.Srinivasan, experience survey on corrosion monitoring and mitigation techniques for sweet well production. CLI International, INC, HOUSTON, TX, 1996,
[http:// www.corrosionsource.com/InterCorr/96](http://www.corrosionsource.com/InterCorr/96)
- [12] F. L. Laque, Marine Corrosion, Causes and Prevention, John Willey, New York, (1975).
- [13] J.C. Catonné, Traitements de Surface par Voie Humide : Principe Electrochimique, M1428, Technique de l'Ingénieur, (1990).
- [14] L. L. Sheir, Corrosion, Vol.2, Butterworth, 3rd Edition, (1994).
- [15] M. Pourbaix, Atlas d'Equilibre Electrochimique, (1963).
- [16] I. B. Obot. (2014) «Recent advances in computational design of organic materials for corrosion protection of steel in aqueous media». *In Developments in corrosion protection*, (7), 123-151
- [17] **D. LANDOLT**, « corrosion et chimie de surface des métaux », traité des matériaux, presses polytechniques et Universitaires Romande, 12, (2003).

[18] H. Mayet. (1992) « Etude de la corrosion par piqûres des alliages d'aluminium par l'analyse des fluctuations de courant et de potentiel à l'abandon ». Thèse Science et Génie des Matériaux : *Institut National Polytechnique de Grenoble*.

[19] Z. Szklarska-Smialowska. (1999) « Pitting corrosion of aluminum ». *Corrosion Science*, 41(19), 1743-1767.

[20] D.Landolt. (2003) « Corrosion et chimie de surfaces des métaux ». *Traité des matériaux*, Edition Presses Polytechniques et Universitaires Romandes,.

[21] B. Baroux. (2002) « Further insights on the pitting corrosion of stainless steels ». In *Corrosion mechanisms in theory and practice* (pp. 311-347), CRC Press.

[22] R. Nizard, P.Bizot, L.Kerboull and L.Sedel. (1996) « Biomatériaux orthopédiques ». *Encycl Med Chir, Techniques chirurgicales—Orthopédie—Traumatologie*, 44,31.

[23] D.Upadhyay, M. A.Panchal, R. S. Dubey and V.K. Srivastav. (2006) «Corrosion of alloys

used in dentistry: A review ». *Materials Science and Engineering: A*, 432(1-2), 1-11.

[24] D.Han, Y. M. Jiang, C. Shi, B.Deng and J. Li. (2012) «Effect of temperature, chloride ion

and pH on the crevice corrosion behavior of SAF 2205 duplex stainless steel in chloride solutions ». *Journal of material science*, 47(2), 1018-1025.

[25] brahim, I. (2008). La corrosion induite par courant alternatif sur les canalisations enterrées sous protection cathodique [Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)].

<http://theses.hal.science/tel-01348986/document>

[26] Tomashov, N. D. (1966). Corrosion of metals in soils. Moscow: Izdatel'stvo "Nedra".

[27] Amina, K. (2016). Etudes électrochimiques et physico-chimiques des conduites d'eaux potables (Doctoral dissertation, Université FERHAT ABBAS-SETIF 1).

<https://bucket.theses-algerie.com/files/repositories-dz/1863080616491272.pdf>

[28] Galland,«Traitement de Surface»,Technique de l'ingénieur,France,1993.

[29] GHELLAI, Mourad. "Etude sur le système de protection Cathodique PC et Maintenance de la Canalisation Multiproduit ASR/NAFTAL". Mémoire de Master en Génie Mécanique, option Maintenance Industriel

Annex

Annex N° 01 :

Méthodes de calcul de résistivité Méthode de Wenner Consiste que les quatre électrodes sont disposées en ligne sur le sol, équidistantes d'une longueur a . Entre les deux électrodes extrêmes (E et H), on injecte un courant de mesure I grâce à un générateur. Entre les deux électrodes centrales (S et ES), on mesure le potentiel ΔV grâce à un voltmètre. L'appareil de mesure utilisé est un ohmmètre de terre classique qui permet l'injection d'un courant et la mesure de ΔV . La valeur de la résistance R lue sur l'ohmmètre permet de calculer la résistivité par la formule de calcul simplifiée suivante :

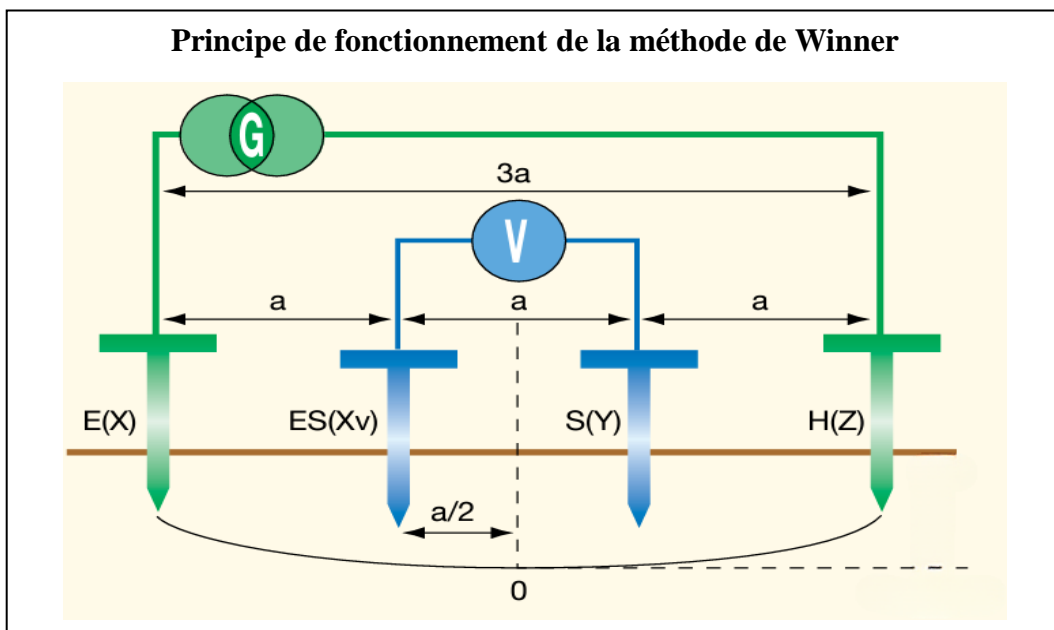
$$\rho = 2. \pi. a. R$$

Où :

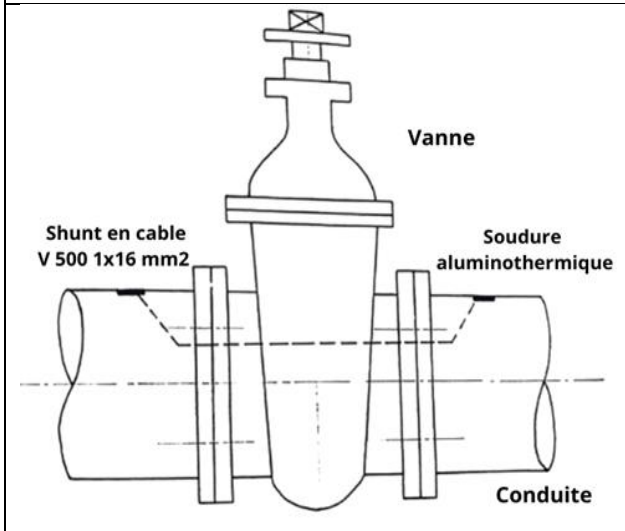
ρ : Résistivité du sol (Ω cm) ;

R : la résistance lue sur l'ohmmètre de terre (Ω) ;

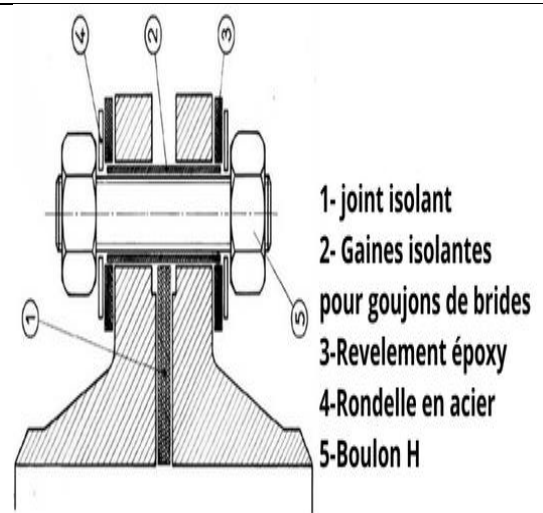
a : Espacement entre les piquets (m)



Annex N° 02 : Shuntage des pièces métalliques



Annex N° 03 : Joint isolant Type à Bride



Annex N°04 : Prise de potentiel

