

N° d'ordre :

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE CHIMIE



MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER

Filière : Chimie

Spécialité : physique et chimie des matériaux

Par

Mr BENCHABANE Mourad

Thème

**UTILISATION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE DANS LA PROTECTION
CATHODIQUE D'UNE CANALISATION ENTERRÉE**

Soutenu le, devant le jury composé de :

Mme Mezeghrane Lamia	MCA	UMMTO	Présidente
Mr Kadri Abdelaziz	Professeur	UMMTO	Rapporteur
Mr Lazazi Salim	Ingénieur	NAFTAL	Co-Rapporteur
Melle Benmouhoub Chabha	MACA	UMMTO	Examinatrice

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein de l'entreprise **NAFTAL**. Je tiens à exprimer mes remerciements à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'avancé de ce travail, que ce soit sur un plan scientifique ou humain.

Mes sincères remerciements et ma reconnaissance sont adressés aux responsables de **NAFTAL** qui ont acceptés la réalisation de ce modeste travail au sein de leur entreprise.

En premier lieu, je tiens à remercier sincèrement **M^r : S.LAZAZI** chef département canalisation pour la confiance qu'il m'a témoigné en me donnant la chance d'effectuer le stage au sein de son département et d'avoir accepté de dirigé ce travail.

Je remercie plus particulièrement toute l'équipe de département canalisation : **MS.LOUARGUIOUI, S.AIT ZIANE, ...**

Je remercie toute personne travaillant à **NAFTAL** ; employés des autres départements qui ont eu une attention ou un mot sympathique à mon égard.

Mes profonds remerciements s'adressent particulièrement à mon promoteur **Mr : A.KADRI**. Je tiens à le remercier pour son aide, son orientation, ses compétences et ces précieux conseils qu'il m'a prodigué tout au long de mon travail, mais aussi et surtout pour ses qualités humaines.

Je remercie : **M^{me} : L. MEZEGHRANE** Maître de conférence classe A à l'UMMTO de m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Mes remerciements s'adressent à **Melle : C. BENMOHOUBE** Maître assistante classe A d'avoir acceptée d'examiner mon travail.

Je tiens à remercier également l'ensemble du personnel et doctorants de laboratoire de physique et chimie des matériaux (LPCM).

Mes profonds remerciements s'adressent particulièrement à tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation particulièrement ceux de département de chimie de m'avoir donné la chance d'apprendre et de nous faire partager leur savoir

Je remercie aussi toute ma famille qui m'a toujours supporté et fait confiance.

Dédicaces

Je tiens à dédier ce modeste travail

A ma chère mère, à mon cher père et à ma grand-mère en témoignage et en gratitude de leur dévouement et de leur soutien permanents durant toutes mes années d'études, leur sacrifice illimité, leur réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'efforts pour mon éducation, mon instruction afin de me voir atteindre mes objectifs, pour tout cela et pour tout ce qui ne peut être dit, mon affection sans limites.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance.

A mes chères sœurs, à mes chers frères.

A toute ma famille.

A mon cher neveu Ahcene.

A tous mes amis et à toutes mes amies.

Sommaire

Liste des figures	1
Liste des tableaux	2
Introduction générale.....	4

CHAPITRE I ASPECTS THEORIQUES

I.1 Présentation de l'entreprise NAFTAL	7
I.1.1 Historique de l'entreprise.....	7
I.1.2 Organisation de la société	7
I.1.3 NAFTAL district GPL	9
I.2 phénomène de la corrosion	10
I.2.1 Définition de la corrosion	10
I.2.2 Différents Processus de corrosion.....	11
I.2.3 Aspects morphologique de la corrosion.....	12
I.2.4 Mécanisme de corrosion	16
I.2.5 Aspects thermodynamiques de la corrosion	18
I.2.5.1 Fonctionnement de la pile de corrosion	18
I.2.6 Agressivité du sol.....	20
I.2.7 Diagramme POURBAIX	20
I.3 Moyens de lutte contre la corrosion.....	21
I.3.1 Protection passive	21
I.3.1.1 Propriétés principales des revêtements	21
I.3.1.2 Les différents types de revêtement	22
I.3.2 Protection par inhibiteur	22
I.3.3. Protection anodique	23
I.3.4 Protection en présence d'un courant vagabond	23
I.3.5 Protection cathodique.....	24
I.3.5.1 Principe de la protection cathodique.....	24
I.3.5.2 Types de protection cathodique	24
I.3.5.2.1 Protection par anodes sacrificielles.....	25
I.3.5.2.2 Protection par un courant imposé	27
II.3.5.3 Principaux domaines d'application	28
I.3.6 Critères de protection cathodique	29
I.3.7 Facteurs affectant la validité de ces critères	30

I.3.8 Paramètres affectant sur la protection cathodique	31
---	----

CHAPITRE II CONDITION EXPERIMENTALES

II.1 Mise au point d'une protection cathodique par courant imposé.....	33
II.1.1 Densité de courant protecteur	33
II.1.2 Potentiel d'injection.....	33
II.1.3 Choix de l'emplacement du poste de soutirage	33
II.1.4 Composition d'un système de protection cathodique.....	34
II.1.4.1 La source d'énergie.....	34
➤ Constituant d'un système photovoltaïque	34
➤ Différents types de systèmes photovoltaïques	35
➤ Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque	36
II.1.4.2 Déversoirs ou masses anodiques	36
➤ Choix des matériaux constituant les anodes	36
➤ Milieu entourant l'anode	38
II.1.4.3 Câbles de liaison et joints isolants.....	38
➤ Câbles de liaison.....	38
➤ Les joints isolants	39
II.1.4.4 Appareillage électrique auxiliaire.....	39
II.1.5 Contrôles et maintenance de la protection cathodique	40

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSION

III.1 Données de base de l'étude	43
III.1.1 Description de l'ouvrage	43
III.1.2 Présentation de la canalisation à protéger	43
III.1.3 Caractéristiques de l'électrolyte	44
➤ Mesure de la résistivité du sol.....	44
➤ Les points particuliers	47
III. 2 Etude du projet de dimensionnement du système de protection cathodique de l'oléoduc « SKIKDA-BERRAHAL »	47
III.2.1 Organigramme du calcul	48
III.2.2 Calcul des paramètres caractéristiques.....	48
• Calcul de la résistivité du sol moyenne ρ_{sm}	49
• Calcul de la résistance longitudinale de la conduite R_{lo}	49

Sommaire

• Calcul de la résistance spécifique d'isolement après une durée d'exploitation (Ωm^2)	50
• Calcul de la résistance d'isolement d'un revêtement par unité de longueur (Ωm)	50
• Calcul du coefficient d'atténuation α	50
• Résistance d'entrée d'une conduite revêtue γ	50
• Valeurs des potentiels.....	51
• Coefficient, K, tenant compte des postes voisins.....	52
• Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage L_p	52
• Calcul du nombre de postes de protection cathodique N_{PPC}	52
• Calcul de l'intensité du courant protecteur nécessaire au début et à la fin de l'exploitation.....	53
• Dimensionnement des anodes	54
• Calcul du nombre d'anodes minimal pour la protection N_a	54
➤ Etude de sensibilité.....	55
• Influence de la résistivité du sol.....	55
• Influence de la distance Y (m) entre le déversoir et la conduite.....	57
• Influence de la résistance initiale du revêtement sur l'intensité du courant protecteur.....	59
Conclusion générale	63
Annexes	
Références bibliographiques	

Chapitre I

- Figure I.1 Organisation générale de la société NAFTAL S.P.A.
- Figure I.2 Organigramme de la branche GPL.
- Figure I.3 Mécanisme de l'oxydation d'un métal à haute température.
- Figure I.4 Corrosion par courants vagabonds.
- Figure I.5 Représentation schématique d'un processus électrochimique de corrosion.
- Figure I.6 Diagramme E-pH du système fer-eau à 25 °C.
- Figure I.7 Principe du drainage de courant électrique.
- Figure I.8 Principe de la protection cathodique par anodes sacrificielles.
- Figure I.9 Principe de la protection cathodique par courant imposé.

Chapitre II

- Figure II.1 Schéma d'un système photovoltaïque.
- Figure II.2 Mesure de potentiel.

Chapitre III

- Figure III.1 Principe de fonctionnement de la méthode de Wenner.
- Figure III.2 Diagramme de résistivité du sol.
- Figure III.3 Variation du potentiel de protection le long d'une conduite.
- Figure III.4 Courbe de variation du nombre de postes en fonction de la résistivité du sol.
- Figure III.5 Courbe de variation de l'intensité de courant en fonction de la résistivité du sol.
- Figure III.6 Courbe de variation du nombre d'anodes en fonction de « Y ».
- Figure III.7 Courbe de variation de l'intensité du courant en fonction de « Y ».
- Figure III.8 Courbe de variation de l'intensité de courant en fonction de la résistance du revêtement

Chapitre I

Tableau I.1 Corrosivité du sol selon la résistivité.

Tableau I.2 Comparaison entre les revêtements.

Tableau I.3 Comparaison entre les anodes sacrificielles et les anodes à courant imposé.

Chapitre II

Tableau II.1 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques.

Tableau II.2 Sections des câbles électriques en fonction de l'intensité du courant circulant.

Chapitre III

Tableau III.1 Présentation du tube à protéger (canalisation GPL).

Tableau III.2 Relevé de résistivité des sols.

Tableau III.3 Caractéristique des anodes.

Tableau III.4 Influence de la résistivité du sol.

Tableau III.5 Influence de « Y » sur le système de protection.

Tableau III.6 Influence de la résistance initiale du revêtement.

Introduction générale

Introduction générale

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

La quantité d'acier détruite chaque année par les phénomènes de corrosion est estimée à un quart de la production mondiale annuelle de fer. Les évaluations du coût des dégâts directs et indirects causés par la corrosion varient entre 2 et 4 % du PNB (Produit National Brut) dans les pays industrialisés. Ce coût comprend les pertes en métal, les frais d'entretien et de réparation, le coût des études et de la protection. Aux Etats-Unis, ce coût a été évalué entre 5 et 8 milliards de dollars, soit 1,5 à 2 % du PNB. En France l'évaluation du CEFRACOR (centre français de la corrosion) est de 4 % du PNB; ce qui est considérable et reflète l'importance du problème.

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

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

Il existe deux techniques pour abaisser ce potentiel, la première consiste à établir une liaison électrique entre la structure à protéger et une masse métallique moins noble qui va se corroder préférentiellement. Ce procédé se limite à la protection des ouvrages à courte distance, cette protection est dite protection cathodique par anode sacrificielle. La seconde consiste à utiliser un générateur qui débite un courant continu entre la canalisation et une électrode auxiliaire enterrée à proximité appelée déversoir. On parle alors d'une protection par soutirage de courant.

Généralement, la protection cathodique par un courant imposé est alimentée par un réseau local de distribution via un transformateur redresseur. Dans certaines situations où un tel réseau n'est pas disponible surtout en sites désertiques ou pour des raisons techniques et économiques..., le système solaire photovoltaïque est la meilleure alternative pour fournir du courant nécessaire à la protection cathodique.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, après une présentation sommaire de l'entreprise qui m'a permis de réaliser ce travail et aussi de prendre contact avec la réalité industrielle ; nous avons présenté quelques aspects théoriques sur les phénomènes de corrosion et protection des métaux.



Introduction générale

Le second chapitre est consacré à la description de la protection cathodique par courant imposé.

Le chapitre trois présente la partie expérimentale où on décrit le système de la protection cathodique avec une alimentation par l'énergie solaire photovoltaïque d'un projet de transport du Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL).

Le mémoire se termine par une conclusion générale et des perspectives.



Aspects Théoriques

I. 1 Présentation de l'entreprise

I.1.1 Historique

Issue de SONATRACH, (société nationale pour la recherche, le transport, la production, la transformation et la commercialisation des hydrocarbures), l'entreprise nationale de raffinage et de distribution de produits pétroliers (ERDP) à été crée par le décret N°80-101 du 06 avril 1980.

Le 04 mars 1985, les anciens districts (carburants, lubrifiants, pneumatiques et bitumes) ont été regroupés sous le nom UND (Unité NAFTAL de Distribution).

En 1987, l'activité raffinage est séparée de la distribution, conformément au décret n° 87-189 du 25 août 1987 modifiant le décret n° 80-101 du 06 avril 1980, modifié, portant création de l'entreprise nationale de raffinage et de distribution des produits pétroliers. Il est crée une entreprise nationale dénommée : « Entreprise nationale de commercialisation et de distribution de produits pétroliers », sous le sigle de « NAFTAL ».

A partir de 1998, elle change de statut et devient société par action, filiale à 100% de SONATRACH, en intervenant dans les domaines suivants:

- l'enfûtage GPL
- la formulation des bitumes
- distribution, stockage et commercialisation des carburants, GPL, lubrifiants, bitumes, pneumatiques, GPL/produits spéciaux.
- transport des produits pétroliers.

I.1.2 Organisation de la société

NAFTAL spa, filiale à 100% de SONATRACH est organisée en trois (03) branches.

Elle a pour mission principale, la distribution et la commercialisation des produits pétroliers sur le marché national.

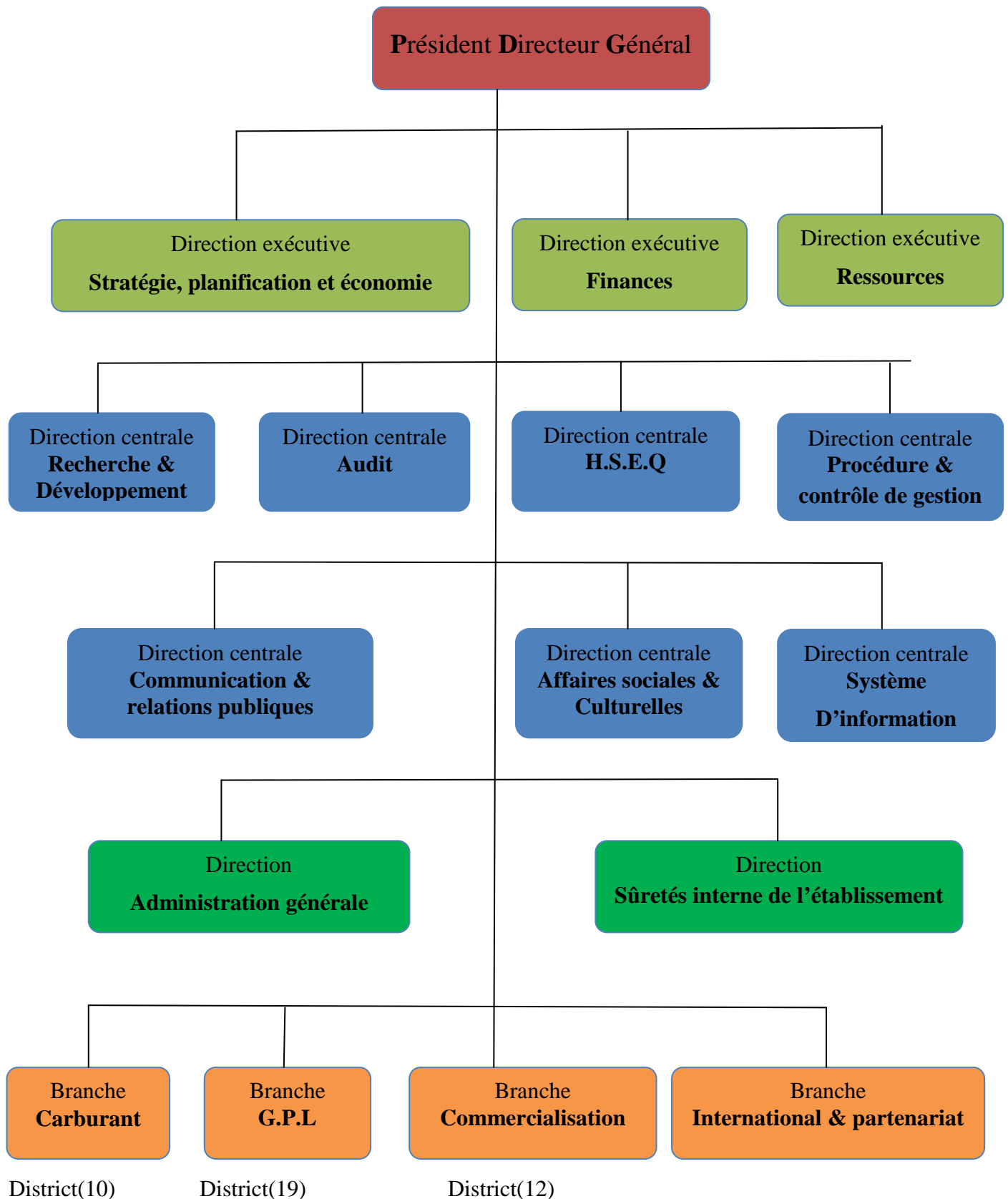


Figure I.1 Organisation générale de la société NAFTAL S.P.A

I.1.3 Présentation de la branche GPL

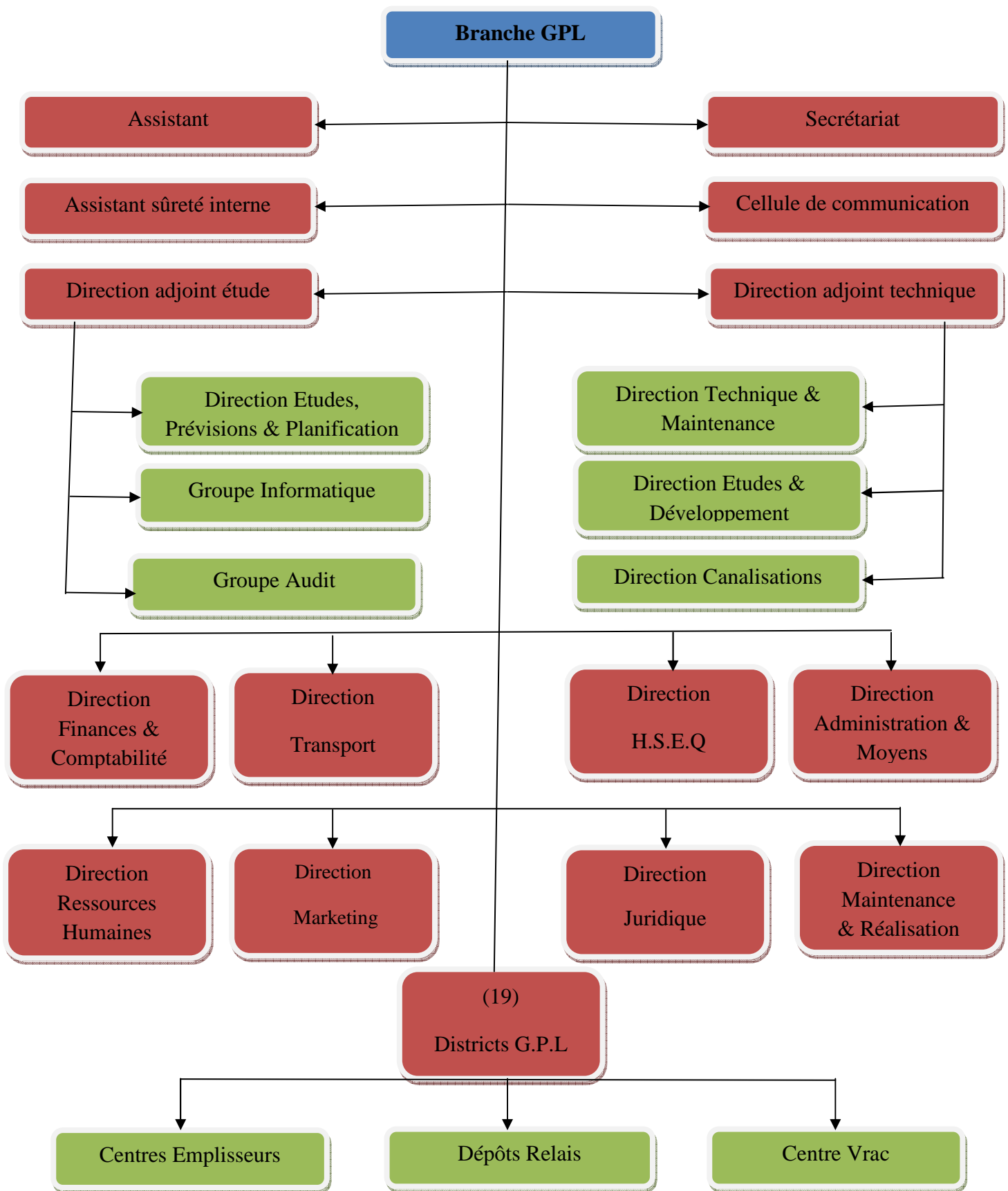


Figure I.2 Organigramme de la branche GPL

I.2 Phénomènes de corrosion

La corrosion d'un matériau est un phénomène complexe dont la définition exacte est délicate. Etudier un phénomène de corrosion c'est d'abord faire appel à plusieurs parties des sciences physiques et plus particulièrement la chimie et l'électrochimie. De plus l'aspect métallurgique et la thermodynamique sont tout aussi indispensables ainsi que les propriétés mécaniques du matériau qui peuvent jouer un rôle prépondérant [1-4].

I.2.1 Définition de la corrosion

La corrosion est parfois utile lorsqu'elle permet aux objets abandonnés dans la nature de se biodégrader ou lorsque la formation d'un produit de corrosion à la surface du matériau le protège d'une dégradation future.

Les matériaux métalliques et plus particulièrement les aciers et les aciers inoxydables constituent des matériaux de base à la construction de nombreuses structures. Ils sont fortement exposés à la corrosion qu'ils soient au contact d'atmosphères humides, immergés en eau douce ou saline, implantés dans les sols ou en présence de solutions plus ou moins agressives [5].

Avant d'aller plus loin posons-nous la question suivante : qu'est ce que la corrosion?

La corrosion métallique est un phénomène qui existe depuis que les hommes ont réussi à préparer des métaux qui ne se trouvaient pas à l'état pur dans la nature. Elle désigne le phénomène par lequel, les métaux tendent à revenir à l'état sous lequel ils se trouvent dans la nature. Autrement dit sous forme d'oxydes de sulfates, carbonates, ... : minerais

Le fer, par exemple, est présent, à l'état naturel, sous forme d'oxydes. Il doit être réduit dans des hauts-fourneaux. En revanche, les métaux qui, comme l'or, se trouvent dans le sol à l'état natif résistent très bien à la corrosion.

La corrosion est l'interaction destructive d'un matériau (alliage métallique, plastique, béton, etc...) avec un milieu agressif. Le phénomène se traduit par une réaction chimique ou électrochimique obligatoirement hétérogène qui se produit à la surface du matériau.

Selon le point de vue de l'ingénieur constructeur ; la corrosion est une dégradation du matériau ou de ces propriétés par réaction chimique avec l'environnement. Cette définition admet que le phénomène de corrosion est nuisible. Corrosion et anticorrosion font appel à des propriétés et des réactions superficielles. Chaque couple matériau-environnement agressif donne lieu à une corrosion spécifique et doit par conséquent être étudié comme tel [6].

I.2.2 Différents processus de corrosion

La corrosion désigne l'ensemble des phénomènes par lesquels un métal ou un alliage métallique tend à s'oxyder sous l'influence d'agents oxydants. Il faut, en outre, faire une distinction entre la corrosion à chaud (sèche) et la corrosion aqueuse :

- oxydants gazeux (**corrosion sèche**)
- en solution (**corrosion humide**)

La **corrosion sèche** ou à chaud se développe à température élevée (plusieurs centaines de °C) quand le métal est exposé à un gaz oxydant tel que le dioxygène, le soufre ou les halogènes. Ce type de corrosion se produit en l'absence d'électrolyte.

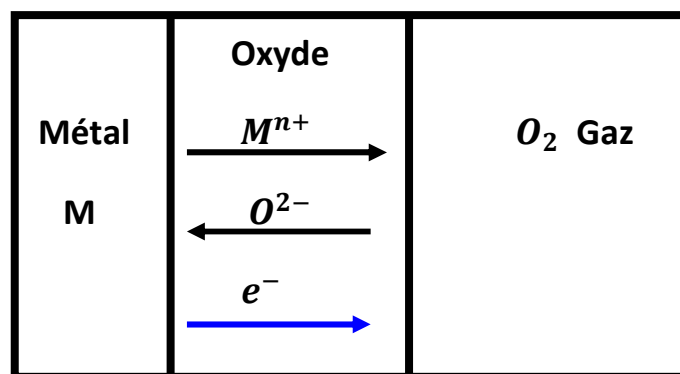


Figure I. 3 Mécanisme de l'oxydation d'un métal à haute température

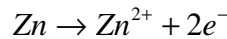
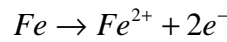
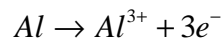
La **corrosion aqueuse ou humide** peut, malgré la température peu élevée, se révéler très insidieuse car elle ne résulte pas d'une suite simple de mêmes processus physiques et chimiques. Il existe une dizaine de types de corrosion aqueuse, on y reviendra en détail dans les paragraphes suivants.

I.2.3 Aspects morphologiques de la corrosion

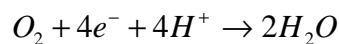
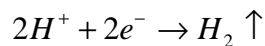
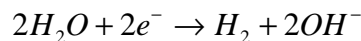
Si on considère, par exemple, les métaux employés dans le génie civil ; ils sont des donneurs d'électrons et constituent l'anode. L'eau, additionnée de fondants éventuellement, les protons et le dioxygène sont, quant à eux, des accepteurs d'électrons et constituent la cathode. C'est la présence de ces éléments qui va provoquer l'oxydation des métaux et donc leur corrosion.

Le phénomène de corrosion met en jeu des réactions d'oxydoréduction. Si on considère les principaux couples rencontrés en milieu aqueux tels que Al, Fe et Zn, les réactions qui sont susceptibles de se produire sont:

A l'anode :



A la cathode:



Il est intéressant, pour faciliter l'étude des phénomènes de corrosion, de distinguer les zones où se font les oxydations des zones où s'effectuent les réductions, de manière à pouvoir mesurer le nombre d'électrons échangés entre anode et cathode.

La vitesse de corrosion dépend de nombreux facteurs et parmi les principaux qui interviennent dans la plupart des cas on peut citer:

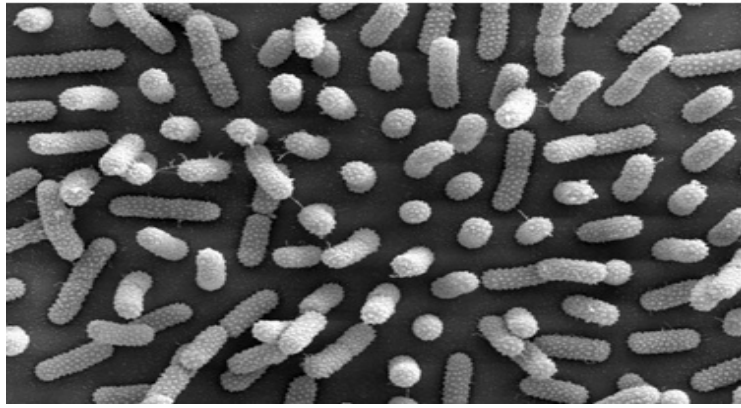
- Le renouvellement ou la stagnation du milieu : lorsque le milieu est constamment renouvelé, il y a apport continu d'éléments participant à la corrosion alors que sa stagnation conduit à une consommation de ces éléments pouvant aboutir à un équilibre.
- L'agitation ou le repos du milieu : l'agitation disperse les éléments participant à la corrosion et l'éventuel dépôt formé par ces produits ne peut pas protéger le métal.
- La température : la vitesse de corrosion croît généralement avec la température.
- Les hétérogénéités du métal et du milieu : l'état de surface du métal, sa composition chimique superficielle, le pH de la solution, l'oxygène dissous,... sont autant de facteurs d'influence.

De ce fait, la corrosion a donné et donne toujours lieu à de nombreuses études car les phénomènes de corrosion rencontrés sont complexes et souvent spécifiques. Différentes formes de corrosion dépendant de la nature du matériau et des caractéristiques de l'environnement ont ainsi pu être identifiées et répertoriées selon leurs principales manifestations visibles [2] :

- Corrosion généralisée (uniforme)
- Corrosions localisées :
 - Corrosion galvanique ou bimétallique
 - Corrosion caverneuse
 - Corrosion par piqûre
 - Corrosion sélective
 - Corrosion frottement
 - Corrosion inter granulaire
 - Fragilisation par l'hydrogène
- Corrosion liée à des effets mécaniques :
 - Fissuration par corrosion sous contrainte
 - Effets de l'érosion, de l'abrasion, de la cavitation
 - Fatigue corrosion
 - ❖ **Autres formes de corrosion**
 - **Corrosion bactérienne [7-10]**

Cette forme de corrosion est moins connue que les précédentes. L'attaque d'un matériau par des **micro-organismes** n'en est pas moins une source importante de dégradation. Les bactéries interviennent soit directement sur les sites anodiques ou cathodiques, soit indirectement en modifiant la résistance des films protecteurs des métaux ou alors en créant leur propre milieu corrosif.

On peut citer l'exemple simple de la présence d'algues sur une structure métallique immergée en mer ; celles-ci provoquent des réactions en chaîne. Le métabolisme interne des algues produit des acides favorisant la corrosion du matériau. Notons que simultanément, leur présence empêche le dioxygène d'accéder à certains sites et crée ainsi des conditions d'une aération différentielle. De ce fait, les sites pauvres en dioxygène entraînent alors le développement de colonies de bactéries qui agissent souvent comme dépolarisant de la cathode (autrement dit, elles consomment H_2 qui servent à réduire les sulfates en sulfures) donc d'augmenter la vitesse d'oxydation du métal à l'anode



Biofilm bactérien

Qu'est-ce qu'une bactérie?

Les bactéries sont des organismes d'une morphologie simple, de petite taille (de l'ordre du μm), découvertes seulement grâce à l'invention du microscope.

Les bactéries sont présentes dans tous les milieux :

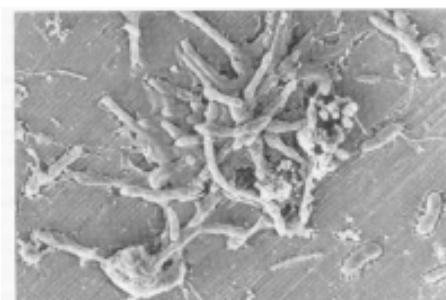
- ✓ Eau
- ✓ Air
- ✓ Terre

et dans toutes les conditions de pH, de température, d'oxygénation. Les bactéries peuvent modifier de façon drastique les conditions physico-chimiques du milieu dans lequel elles se trouvent par la formation du biofilm créé par leur métabolisme à la surface du matériau:

- ✓ Modification du pH, (certaines conduisent à la formation d'acide comme par exemple l'acide sulfurique)
- ✓ Modification de la concentration en oxygène
- ✓ Production de sulfures...

Les bactéries considérées actuellement comme les plus agressives vis-à-vis du matériau métallique sont les **bactéries sulfurogènes**:

- ✓ Bactéries Sulphato Réductrices (BSR)
- ✓ Bactéries Thiosulphato Réductrices (BTR)



Biofilm sur acier au carbone - Photo prise au MEB-

(Corrodys)

➤ Corrosion par des courants vagabonds

Les lignes de transport à traction électrique sous courant continu (SNTV, tramways, métro...), propagent généralement dans le sol des courants dits vagabonds. En effet, si des courants de ce genre pénètrent dans une structure métallique, ils causent la corrosion aux endroits où ils ressortent pour pénétrer dans le sol. Le courant amené par la caténaire, qui peut, pour certains trains, être de plusieurs milliers d'ampères, retourne à sous station émettrice par le rail de roulement. Ce rail plus ou moins bien éclissé, plus ou moins bien isolé du sol selon l'état du ballast, laisse s'échapper une partie importante du courant qui peut alors emprunter, sur les parcours de dizaines de kilomètres, des circuits peu résistants électriquement, tels que les conduites, avant de regagner le rail et le générateur à proximité de la sous-station [11].

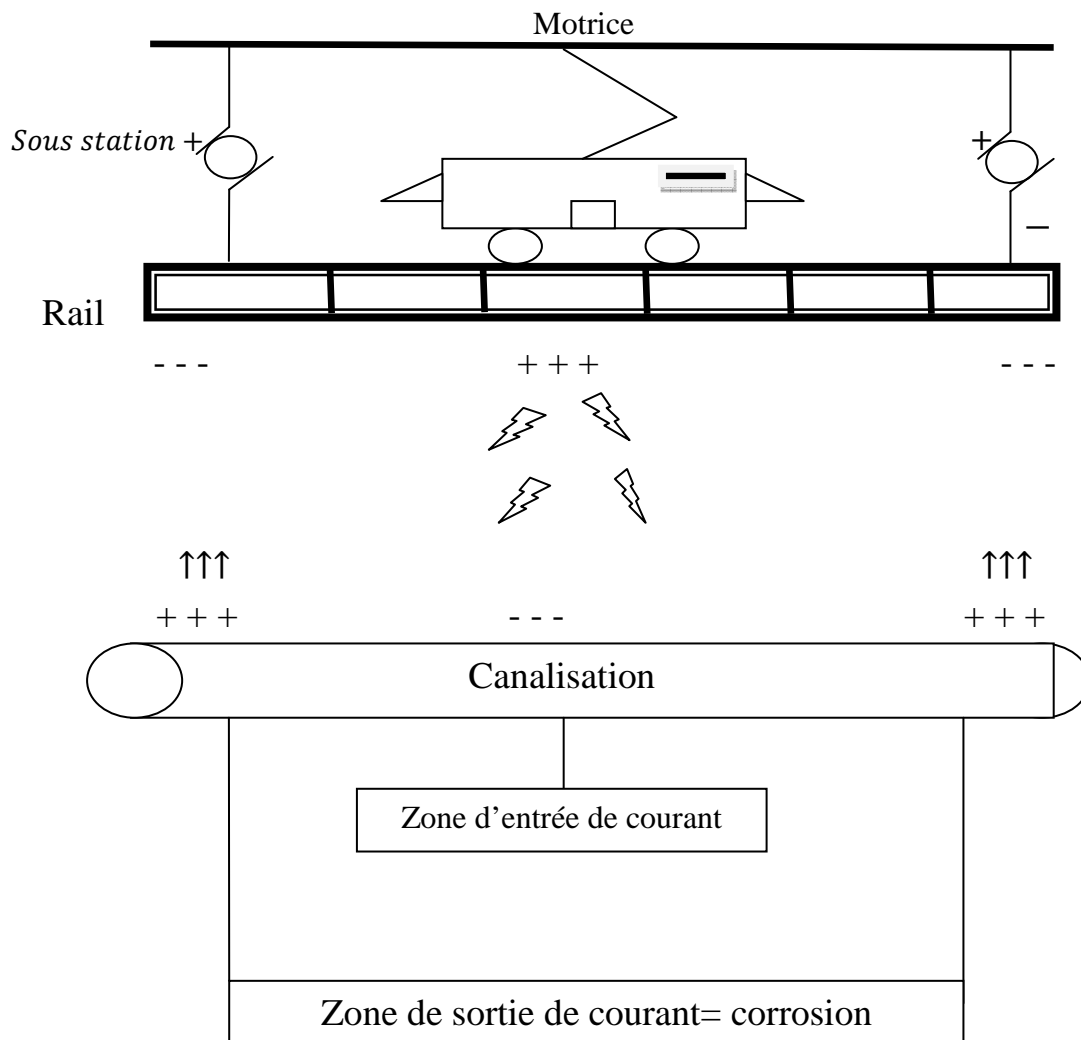
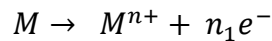


Figure I. 4 Corrosion par courants vagabonds

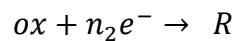
I.2.4 Mécanisme de corrosion

Bien que les formes de corrosion soient diverses, les mécanismes de base de la corrosion d'un matériau métallique en milieu aqueux sont au départ de nature électrochimique. Ils résultent d'un ensemble de réactions se produisant à l'interface métal-solution et mettant en jeu des électrons et des espèces chimiques. Les réactions électrochimiques simplifiées peuvent être décrites de la façon suivante [2]:

Réaction anodique de dissolution du métal M



Réaction cathodique de réduction d'une espèce Ox de l'électrolyte



L'espèce susceptible de se réduire doit être présente en quantité suffisamment importante dans le milieu. L'oxygène fait partie des éléments oxydants les plus abondants sur la planète et joue donc un rôle très important dans les mécanismes de corrosion des matériaux métalliques en eau de mer. La figure I. 5 représente, de façon très simplifiée, les différents processus anodique et cathodique se produisant à la surface d'un métal lors de la corrosion.

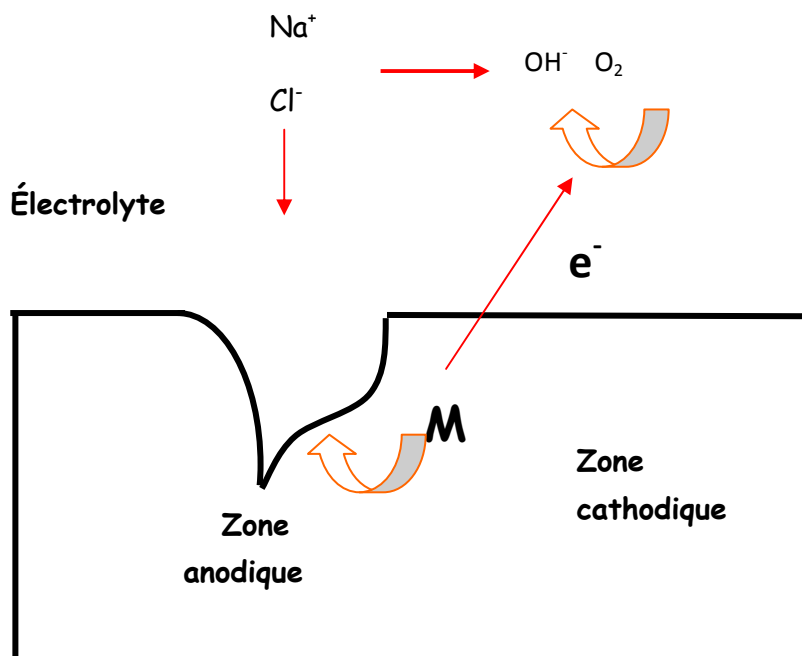


Figure I. 5 Représentation schématique d'un processus électrochimique de corrosion

La corrosion a toujours pour cause un phénomène électrochimique : galvanique ou électrolytiques. Dans le premier cas, elle est due à la formation locale d'éléments galvaniques dans lesquels des réactions chimiques entre le métal et les agents corrosifs entraînent un passage de courant. Dans d'autres cas c'est le passage du courant primaire qui provoque une véritable électrolyse avec la dissolution anodique du métal. Il convient de les examiner séparément.

Dans le premier cas, la corrosion est due à une ou plusieurs réactions chimiques qui se produisent à l'interface métal -substances de nature électrolytiques dissoutes dans le milieu. La présence de l'eau ou d'un autre solvant est essentielle pour que la corrosion se produise. Dans de nombreux cas où le métal n'est en contact qu'apparent avec l'eau, l'humidité atmosphérique provoque, par condensation, la formation d'un film liquide suffisant pour agir comme solvant.

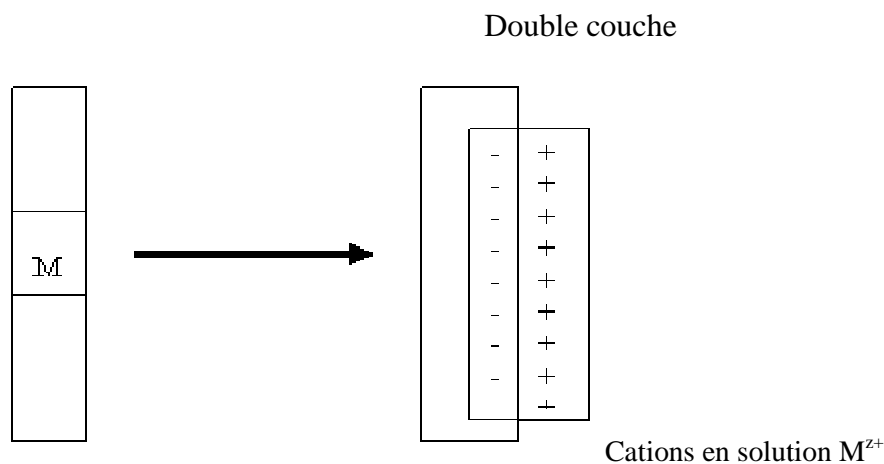
I.2.5 Aspects thermodynamiques de la corrosion

La corrosion électrochimique se produit lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal soit dans le milieu environnant (ou les deux). Cette hétérogénéité va produire une différence de potentiel entre différents points du métal et si ce matériau se trouve dans un milieu où une électrolyse peut se produire alors il y aura formation de piles qui vont débiter dans la masse métallique car elles sont en court-circuit. Le processus de dissolution des zones anodiques est entamé [4].

I.2.5.1 Fonctionnement de la pile de corrosion

a- Potentiel d'un métal par rapport à un électrolyte

Si un métal M de valence z plonge dans un électrolyte, il y a des ions M^{z+} qui passent dans la solution et des charges négatives apparaissent.



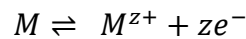
Pour quitter le métal, les ions M^{z+} doivent vaincre une double force, d'une part s'arracher à la couche (-) à la surface du métal et d'autre part franchir la barrière des charges (+). Il s'établit un équilibre qui sera caractérisé par une d.d.p entre la couche métallique (+) et la couche (-), c'est le potentiel d'électrode qui dépend du métal et de la nature d'électrolyte.

- **Potentiel d'équilibre**

C'est le potentiel que prend le métal par rapport à un de ses sels

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \text{Log} (M^{z+})$$

L'électrode ainsi constituée est réversible, c'est à dire :



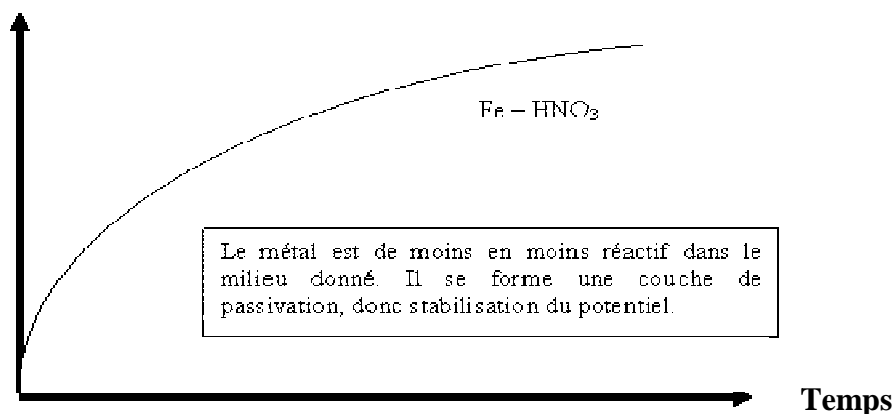
- **Potentiel de dissolution ou potentiel de corrosion [1]**

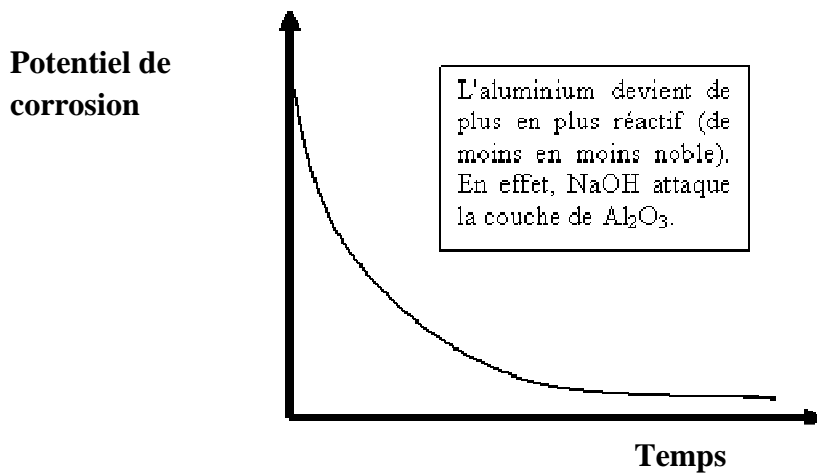
C'est le potentiel que prend un métal par rapport un électrolyte quelconque. Le potentiel n'est plus caractéristique du métal, il dépend des conditions expérimentales : nature, concentration et température de l'électrolyte et aussi de l'état solide du métal M. Il y a modification progressive de la couche externe donc le potentiel de corrosion est un système irréversible. La d.d.p varie avec le temps et tend vers une valeur stationnaire.

On propose différents exemples de la variation temporelle du potentiel de corrosion libre d'une électrode métallique en contact avec un milieu corrosif

Exemple 1 Un morceau de Fer dans l'acide nitrique (HNO_3)

E (potentiel de corrosion)



Exemple 2 L'aluminium dans l'hydroxyde de sodium (NaOH)**I.2.6 Agressivité du sol [11, 2]**

L'agressivité du sol est considérée comme la principale caractéristique qui contribue directement au processus de corrosion des structures enterrées. 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 fissuration sur les conduites.

Le caractère corrosif des sols dépend des paramètres suivant :

- La conductivité électrique ;
- La composition chimique et la nature des sels dissous ;
- Le taux d'humidité ;
- Le PH (alcalinité et acidité) ;
- L'hétérogénéité physico-chimique.

Tableau I.1 Corrosivité du sol selon la résistivité

Plage de résistivité du sol (Ωm)	agressivité
$\rho > 100$	peu corrosif
$50 < \rho < 100$	faiblement corrosif
$\rho < 50$	très corrosif

I.2.7 Diagramme potentiel-pH du fer (diagramme Pourbaix)

Les nombreuses réactions chimiques ou électrochimiques intervenant dans les phénomènes de corrosion dépendent du pH de la solution. POURBAIX [13] a établi des diagrammes potentiel-pH qui délimitent différents domaines :

- Un domaine de corrosion où le fer se dissout dans la solution et forme des sels et des hydroxydes solubles.
- Un domaine de passivation où le fer est protégé par un film superficiel qui l'isole du milieu ambiant. C'est un domaine où le métal est protégé contre la solution, si le film a pu se former d'une manière uniforme, s'il reste adhérent et si, mécaniquement, rien ne vient le détruire.
- Un domaine d'immunité où le fer reste à l'état métallique et ne peut donc se corroder, les réactions d'oxydation n'étant plus possibles. C'est le domaine de la protection cathodique.

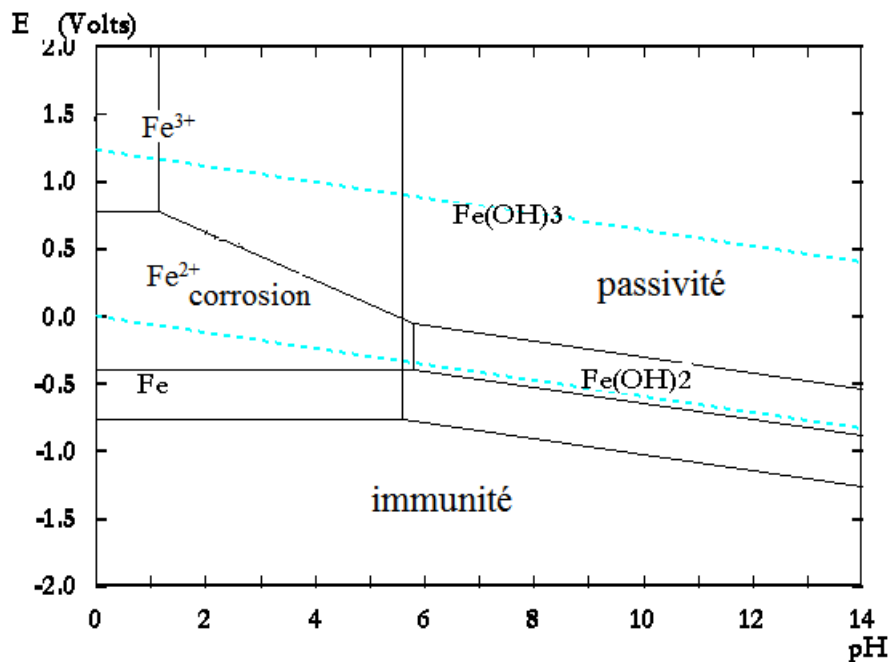


Figure I.7 Diagramme E-pH du système fer-eau à 25 °C

I. 3 Moyens de lutte contre la corrosion

La présence permanente de la conduite dans un sol agressif, augmente la probabilité d'activité des cellules de corrosion. C'est ainsi que l'application des procédures de protection contre l'évolution de la corrosion est indispensable. En termes de protection, il existe cinq moyens pour lutter contre la corrosion [14].

I.3.1 Protection passive

Il s'agit d'isoler la conduite électriquement et d'éliminer tout contact direct avec le milieu environnant. Ainsi, ce revêtement permet d'augmenter la durée de vie des installations et de réduire les besoins en courant de protection par coupure du circuit ionique entre le métal et le sol. Mais cette isolation ne fournit pas une protection absolue et définitive en raison des défauts susceptibles de se produire lors de la pose ou au cours de la vie de l'ouvrage [15]

I.3.1.1 Propriétés principales des revêtements

Le choix d'un revêtement anticorrosion doit répondre aux impératifs suivants [16]:

- Résistance d'isolement élevée,
- Imperméabilité à la vapeur d'eau et à l'air,
- Faible transmission d'espèces ioniques,
- Inertie chimique et bactériologique,
- Adhérence et mouillabilité à la surface métallique,
- Résistance mécanique, afin que les propriétés d'anticorrosion puissent être maintenues de façon durable.

I.3.1.2 Les différents types de revêtements

Plusieurs types de revêtements sont destinés à la protection des structures métalliques enterrées. On peut citer :

- Revêtement à liants hydrocarboné de type C (brai de bouille) ;
- Revêtement par bande adhésive ;
- Revêtement en PE extrudé ;
- Revêtement par gaine thermo rétractable;

Le tableau ci-dessous donne la comparaison de ces différents revêtements

Tableau I.2 Comparaison entre ces revêtements

Type de revêtement	Brai de houille	Bandes adhésives	PE extrudé	Gaine thermo rétractable
caractéristiques				
Résistance d'isolement ($\Omega \cdot m^2$)	M ($10^3 - 10^{10}$)	B ($10^5 - 10^9$)	TB ($10^{13} - 10^{14}$)	B ($10^7 - 10^9$)
Adhérence (N/Cm)	B (<20)	B (4 à 10)	TB (35 à 100)	B (8 à 20)
Étanchéité à l'eau (% en poids)	M (0.2-4)	B (<4%)	TB (<0.1%)	TB (<0.2%)
Comportement à la haute température ($^{\circ}C$)	F (<60 $^{\circ}C$)	B (<60%)	B (<80 $^{\circ}C$)	B (<100 $^{\circ}C$)

I.3.2 Protection par inhibiteur

Un inhibiteur de corrosion est une substance qui, lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration, retarde la corrosion [2]. Il peut être utilisé pour une protection permanente ou plus couramment en vue d'une protection temporaire, durant une période où la pièce est particulièrement sensible à la corrosion (stockage, décapage, nettoyage...). Les inhibiteurs sont composés soit de molécules organiques soit de produits minéraux. Selon leurs modes d'action, on distingue les inhibiteurs cathodiques, anodiques ou mixtes. Ces substances sont adsorbées par la surface du substrat et forment ainsi une couche barrière qui modifie les réactions électrochimiques en bloquant soit les sites anodiques, soit les sites cathodiques. Les inhibiteurs anodiques doivent être utilisés avec précaution car si le film protecteur est altéré par une rayure ou par une dissolution, la partie exposée se corrode sévèrement (piqûre profonde)

I.3.3 Protection anodique

Elle repose sur la propriété qu'ont certains matériaux à se passiver dans des milieux corrosifs lorsque leur potentiel est maintenu à une valeur correcte. Nous rappellerons rapidement les conditions devant être remplies pour qu'un métal puisse être passif:

- La courbe courant-potentiel présente un palier de passivation;
- Le film passif est conducteur électronique et son épaisseur est de l'ordre de 10 nm;
- Sa formation ne doit pas nécessiter une quantité d'électricité supérieure à $10^{-2} \text{ C.cm}^{-2}$;
- Il doit être relativement insoluble dans les acides ;

La protection anodique peut être envisagée dans des milieux tels que les acides oxygénés (nitrique, sulfurique, ou phosphorique), les nitrates alcalins, pour des métaux tels que l'acier ordinaire ou inoxydable, le titane, le zirconium, le hafnium, ou le niobium. Les alliages à base de cuivre ne sont pas passivés.

Parmi les exemples industriels d'utilisation, on peut citer la protection d'une cuve de camion citerne en acier inoxydable destinée au transport d'acide sulfurique.

Avant d'utiliser cette méthode, il est nécessaire d'avoir recours à des essais préliminaires permettant de déterminer la densité de courant correspondant à l'établissement de l'état passif ainsi que le domaine de potentiel pour lequel le matériau reste passif, c'est-à-dire l'étendue du palier de passivation [15] .

I.3.4 Protection en présence de courants vagabonds

Cette technique de protection n'est pas au vrai sens de la protection cathodique, on ne cherche pas à porter le métal de la conduite à son potentiel d'immunité. Mais il est nécessaire d'établir une liaison électrique entre la conduite et la source émettrice pour éviter les risques de corrosion. Cette liaison, autrement dit, le drainage s'effectue entre l'ouvrage et le pôle négatif de la source [6].

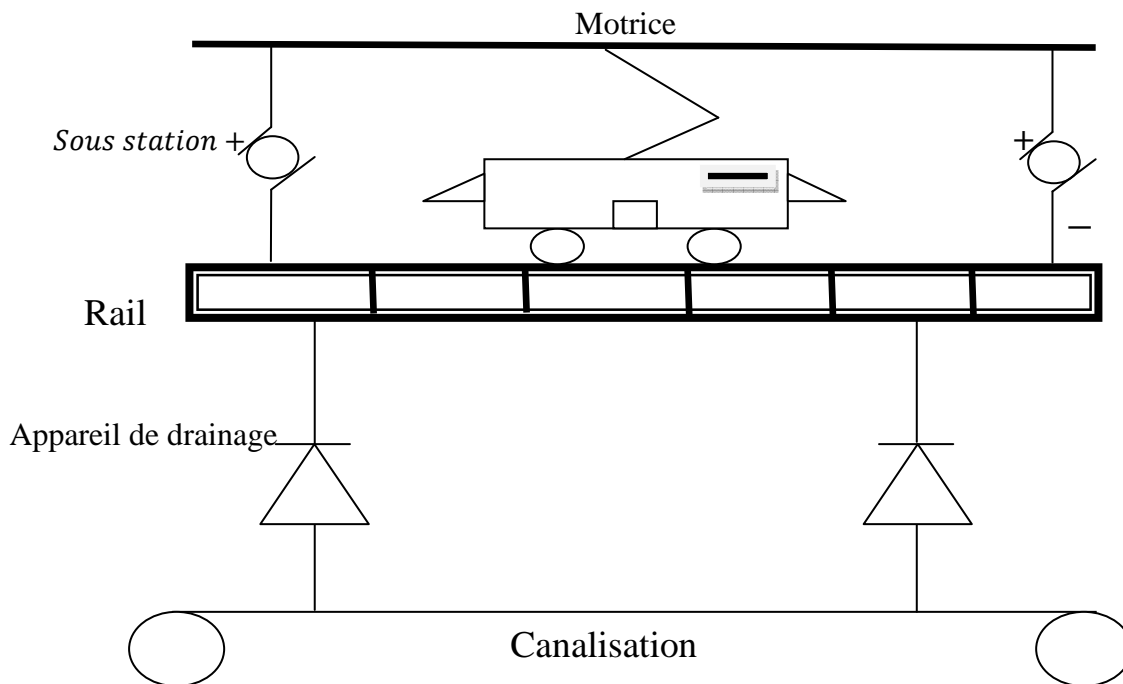


Figure I. 8 Principe du drainage de courant électrique

I.3.5 Protection cathodique

La lutte contre la corrosion des ouvrages métalliques enterrés par le moyen de la protection cathodique revêt une importance primordiale pour leurs longues durées de vie d'exploitation. La protection cathodique est la méthode la plus efficace pour lutter contre la corrosion. Elle offre l'avantage pratique d'obtenir des informations sur le comportement du matériau par de simples mesures [6, 3].

I.3.5.1 Principe de la protection cathodique

La protection cathodique d'un ouvrage métallique en contact avec un électrolyte consiste à placer cet ouvrage à un potentiel électrique négatif tel que la corrosion devienne thermodynamiquement impossible. C'est le potentiel, au dessous duquel l'acier ne peut se corroder dans un milieu ayant un pH compris entre 4 et 9. On admet le critère de -850mV (Cu/CuSO_4) [6].

I.3.5.2 Types de protection cathodique

Deux techniques de protection cathodique sont utilisées pour fournir le courant nécessaire pour contrer les phénomènes de corrosion:

- l'anode sacrificielle appelée encore anode réactive
- le soutirage de courant ou dispositif à courant imposé

I.3.5.2.1 Protection par anodes sacrificielles

La protection cathodique par anodes sacrificielles a pour but de mettre à profit l'effet du couple galvanique (pile) créée par l'association, dans un même électrolyte, de deux métaux différents: le métal à protéger et un métal moins noble qui constitue l'anode.

Dans ce type de protection, l'anode se consomme par dissolution en portant la surface du métal à protéger dans son domaine de potentiel d'immunité. La réalisation est schématisée dans la figure I. 2

Pour que la protection existe, il faut :

- Que la pile débite, donc que l'anode soit reliée électriquement au métal,
- Que la surface à protéger et l'anode soient plongées toutes les deux dans le même milieu électrolytique,
- Que l'installation soit adaptée à la surface à protéger (dimensions, nombre, répartition des anodes).

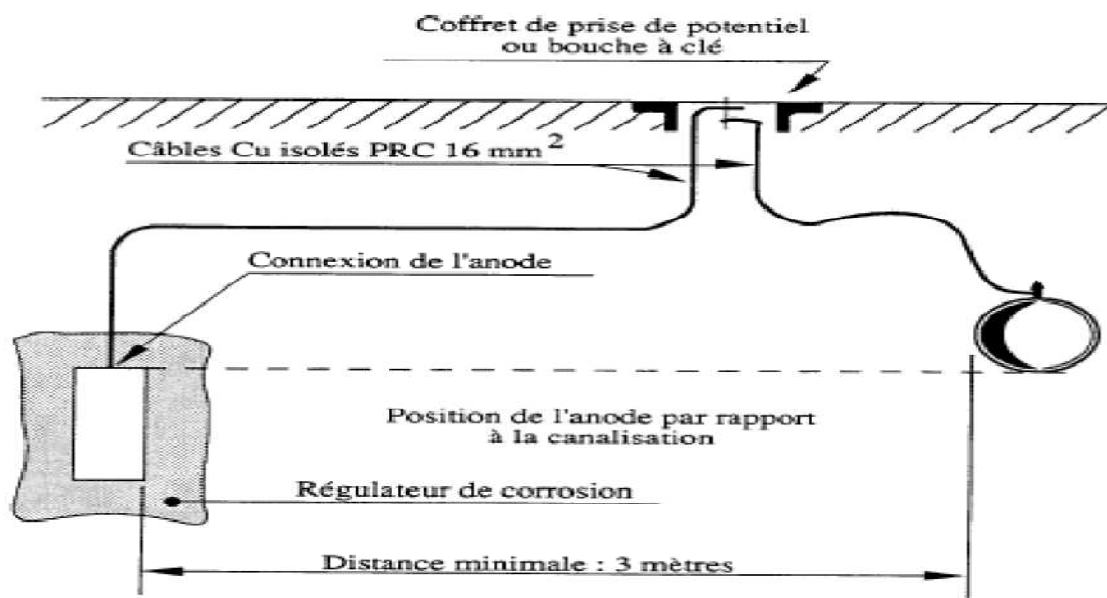


Figure I. 9 Principe de la protection cathodique par anodes sacrificielle

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

Ainsi, le taux de consommation de l'anode (g/A.ans) dépend de l'intensité de courant émis par l'anode, de la taille de l'anode et sa composition chimique ainsi que de la structure à protéger et de l'environnement [15]. La loi de Faraday est exprimée par la formule suivante :

$$m = \frac{M}{nF} \times (I \times t)$$

où :

m : masse de métal dissous;

M : masse molaire;

n : nombre d'électrons en jeux;

F : le nombre de Faraday;

I : courant (A);

t : temps de consommation;

❖ **Choix d'anodes sacrificielles**

Il existe plusieurs types d'anodes dont les caractéristiques et les applications sont différentes. Les principales caractéristiques (valeurs typiques) des anodes les plus utilisées [17].

➤ **Anode de magnésium**

Les anodes de magnésium pour la protection cathodique ne sont pas en magnésium pur, mais à base d'alliage. Plusieurs types sont utilisés ayant des compositions et des caractéristiques électrochimiques différentes : (addition de Zn et Al) dont les propriétés sont les suivantes :

- Potentiel : -1.3V (Cu/CuSO₄)
- Consommation : entre 6.5 et 8Kg/A.an

➤ **Anodes aux alliages d'aluminium**

Les anodes d'aluminium se recouvrent très rapidement d'une couche d'oxyde qui s'oppose au fonctionnement du couple fer-aluminium, empêchant ainsi l'aluminium de jouer son rôle d'anode sacrificielle. On utilise donc des alliages pour éviter cet inconvénient. Ces alliages présentent des caractéristiques électrochimiques (dues à la passivation d'Aluminium dans l'eau aérée) intéressantes du point de vue de la protection cathodique en eau de mer.

- potentiel : -0.5V (Cu/CuSO₄)
- Consommation réelle : 3 à 4 Kg/A.an

➤ **Anode de zinc**

Élabore à partir de zinc de haute pureté avec une teneur en fer particulièrement faible

- Potentiel : -0.8V (Cu/CuSO₄)
- Consommation réelle : 13 Kg/A.an

❖ Installation des anodes

La protection par anode réactive ne s'applique qu'aux réseaux de petites longueurs (2 à 3km) et bien isolées dont la résistance d'isolement des conduites par rapport au sol est bonne (au moins $5000\Omega.m^2$).

L'efficacité d'une anode sacrificielle dépend de sa position par rapport à l'ouvrage et son environnement. Son rendement sera meilleur si elle est posée dans les conditions suivantes:

- Au milieu de l'ouvrage à protéger, de manière à ce que sa portée englobe l'ensemble de l'ouvrage ;
- A une distance supérieure à 3 mètres de la conduite à protéger et de tout autre ouvrage métallique enterré ;

La partie supérieure de l'anode doit être située sous le niveau de la génératrice de la canalisation.

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

I.3.5.2.2 Protection cathodique par courant imposé

La protection cathodique par un courant imposé, encore appelée par soutirage de courant, consiste à relier les structures 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). Le courant continu débité par le générateur est diffusé dans l'électrolyte ambiant par le déversoir et est capté par les structures à protéger qui sont ainsi portées à un potentiel électronégatif par rapport au milieu dans lequel elles se trouvent. Le déversoir de courant doit être constitué d'un métal le moins corrodable possible pour avoir une durée de vie assez longue. Les matériaux les plus utilisés sont :

- l'acier (rails de chemin de fer, vieux tubes ou tiges de forage rebutés...);
- le graphite ;
- le Ferro silicium ;
- le titane platiné ;
- etc.

Une installation de soutirage de courant comprend donc :

- Un générateur de courant
- Un lit anodique (déversoir de courant)

- Un conducteur électrolytique
- La structure à protéger

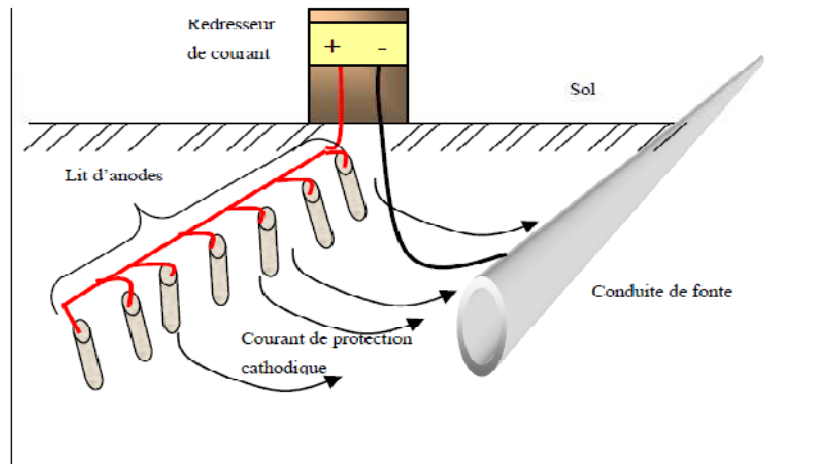


Figure I.10 Principe de la protection cathodique par courant imposé

Le choix d'un système par rapport à un autre doit être établi en tenant compte des comparaisons techniques et des critères économiques (conception, équipement, installation, maintenance, consommation en matière et en énergie) [11].

I.3.5.3 Principaux domaines d'application

Le soutirage de courant s'emploie chaque fois que l'intensité nécessaire à la protection est importante ou que la portée demandée est élevée. Les applications du système de protection cathodique concernent un grand nombre de domaines [18] :

- Conduites enterrées ou émigrées, revêtu ou non ;
- Casing de forage ;
- Structures marines importantes (appontements, quais métallique, coques de navire, plates formes pétrolière ;
- Réservoirs de stockage de grande dimension ;
- Ouvrages concentrés (station de pompage ou de compression terminaux) ;
- Intérieur des capacités d'eau douce ;
- Boites à eau d'échangeurs thermique.

Tableau I.3 Comparaison entre anodes sacrificielles et anode à courant imposé

	anodes sacrificielles	courant imposé
Complexité de l'installation	simple	complexe
Source d'énergie	non nécessaire	nécessaire
Distribution du courant sur la structure	homogène	souvent hétérogène
Poids de la structure	importante surcharge en poids pour des longues durées de vie	peu d'accroissement
Influence de la résistivité du milieu	non envisageable si la résistivité du milieu est trop grande	pas de difficulté
Débit par anode	faible	élevé
Nombre d'anodes	important	faible
Facilité d'adapter le courant consommé en fonction de la demande	adaptation possible à travers une liaison résistante	Adaptation facile
Risque de surprotection	pratiquement aucun	possible
Interférence avec d'autres structures	non	possible
Risques humains	non	possible (poste de soutirage)
Surveillance	aisée et occasionnelle	surveillance fréquente requise par un spécialiste

I.3.6 Critères de la protection cathodique

Si le principe de la protection cathodique est simple, l'application est plus difficile : c'est pourquoi les praticiens ont adopté plusieurs critères de protection souvent basés sur l'expérience, qui selon leurs auteurs, sont valables pour tel ou tel cas particulier.

- *Le national bureau of standard (NBS)* aux Etats-Unis a fait de nombreux essais tant en laboratoire que dans les sols naturels très divers et admis pour l'acier dans le sol la valeur

minimale de -850 mV (Cu/CuSO₄) ce chiffre est retenu dans les documents standards de NACE (National Association of Corrosion Engineers).

- Une chute ohmique créée entre l'électrode de référence et la structure à protéger peut influencer la valeur du seuil de potentiel (-850 mV). Pour réduire cette chute ohmique, l'électrode doit être très proche de la structure.
- Pour tenir compte des variations de potentiel dans le sol dues à la nature de ce dernier la valeur du potentiel servant de base aux mesures de contrôle est fixée à -1000 mV en marche et à -850 mV en l'arrêt par rapport à l'électrode de référence : Cu/CuSO₄

I.3.7 Les facteurs affectant la validité de ces critères

Les domaines d'applications de la protection cathodique peuvent être modifiés par plusieurs paramètres environnementaux, structuraux tel que la température, la bactérie, l'influence du courant alternatif et la qualité du métal de la structure.

A) Température

À une température supérieure à 60°C, les critères de PC ne sont plus jugés satisfaisants et au quel cas le seuil de protection doit être ajusté à -950 mV (Cu/CuSO₄) [19].

B) Bactérie Sulfato-réductrice

En présence de la bactérie Sulfato-réductrice à la température ambiante, le critère du potentiel de protection passe à -950 mV (Cu/CuSO₄) au lieu de -850 mV. Cependant, lorsque la température atteint les 60 °C en présence de bactéries, le critère du potentiel de protection passe à -1000 mV.

C) Courant alternatif

Les investigations réalisées pour l'évaluation du niveau d'interférence des sources de courant alternatif indésirables ont révélé que l'effet d'interférence est proportionnel à la densité du courant présent à l'interface métal/ électrolyte. Éventuellement, une densité de courant (i) de 20 A/m² n'affecte pas les critères de protection alors que pour une densité supérieure à 100A/m², le dommage de corrosion est considérable [11].

D) Type de métal

Chaque métal est défini par son propre potentiel de corrosion. Ainsi, les seuils de protection sont ajustés convenablement pour chaque type de métal.

I.3.8 Paramètres influant sur l'efficacité de la protection cathodique

L'efficacité d'un système de protection cathodique appliqué peut être diminuée par certains facteurs mécaniques, physiques et environnementaux qui peuvent se manifester sous différentes formes [11] :

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

Conditions expérimentales

II.1 Mise au point d'une protection cathodique par courant imposé

Le soutirage de courant est la base de la protection cathodique des canalisations enterrées. On fait appel, en général, à ce type de protection dès que les réseaux atteignent un ou plusieurs kilomètres. Pour les grands réseaux enterrés, on utilise des soutirages de courant répartis sur des distances plus ou moins grandes et débitant en parallèle.

L'intérêt du soutirage de courant réside dans le fait qu'il peut être réglé manuellement ou automatiquement de façon à suivre l'évolution, dans le temps, des structures protégées [1].

II.1.1 Densité de courant de protection

La densité de courant nécessaire pour obtenir une protection complète dépend du métal et du milieu. La densité de courant appliquée doit toujours être supérieure à la densité de courant correspondant à la vitesse de corrosion mesurée dans le même milieu. Ainsi plus la vitesse de corrosion est grande, plus la densité de courant appliquée pour la protection doit être grande [2].

II.1.2 Potentiel d'injection

Le potentiel d'injection est défini comme étant le potentiel d'abaissement qu'on doit assurer au point de soutirage afin d'avoir, aux extrémités de la conduite, des valeurs conformes où critère de protection (c'est-à-dire -850 mV par rapport à l'électrode de référence Cu/CuSO₄) [3].

II.1.3 Choix de l'emplacement d'un poste de soutirage

Le meilleur emplacement pour un poste de soutirage est celui qui permet d'assurer une protection la plus efficace sur la plus grande portée avec une puissance minimale. Ce mode de protection est appliqué en fonction des paramètres suivants [2]:

- dimension et géométrie des structures à protéger;
- le point le plus favorable pour l'installation du déversoir (terrain de faible résistivité);
- l'encombrement du sous sol en structures métalliques diverses;
- proximité d'une source électrique BT;

De plus, cet emplacement doit être choisi au centre du réseau afin d'obtenir une bonne répartition des potentiels et en un point du réseau où le diamètre des conduites est important pour avoir la conductibilité longitudinale la plus favorable. Ceci permet de diminuer autant que possible le nombre de redresseurs à poser

II.1.4 Composition d'un système de protection cathodique

Une installation de protection cathodique est composée de quatre parties essentielles:

II.1.4.1 Source d'énergie

Les sources d'énergie conçues pour la protection cathodique doivent débiter sur les anodes un courant continu et en permanence pendant la durée de vie estimée pour la structure à protéger.

La source d'énergie peut être constituée par [1]:

- la source locale de distribution;
- les groupes électrogènes: le générateur électrique (alternateur ou dynamo) est entraîné par un moteur thermique;
- les turbogénérateurs : le combustible, provenant d'une source extérieure ou du fluide véhiculé, transmet directement son énergie à une turbine entraînant un alternateur ;
- les turbines entraînées par le fluide. Ce dispositif est intéressant lorsqu'il y a une perte de charge disponible (poste de détente de gaz par exemple) ;
- les générateurs thermoélectriques ;
- les piles à combustible, dont le prix est très élevé ;
- les piles au lithium qui sont prévues pour 10 ans avec un débit de quelques ampères ;
- des éoliennes ;

L'énergie photovoltaïque est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus importantes [4]. C'est le produit de la conversion directe du rayonnement solaire à travers les cellules photovoltaïques (effet photovoltaïque), qui fut observé la première fois en 1839 par le physicien français Antoine Becquerel. L'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité [5]. Ce phénomène dépend du matériel semi conducteur et de la longueur d'onde de la lumière incidente [6].

✓ Constituant d'un générateur solaire

Un système solaire photovoltaïque est un ensemble complet d'équipement pour transformer la lumière du soleil en électricité. Ce système est composé de quatre éléments principaux :

- **La cellule photovoltaïque**

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), génère de l'électricité. C'est l'effet photovoltaïque qui est à l'origine de ce phénomène. Le courant obtenu est fonction de la lumière incidente [7].

- **Module photovoltaïque (PV)**

Le module comprend plusieurs cellules photovoltaïques assemblées les une aux autres grâce à un circuit électrique. C'est l'élément central d'un système photovoltaïque [8].

- **Système de stockage**

L'utilisation de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque est très délicate car elle varie précisément comme le rayonnement. C'est pourquoi il faut penser à stocker cette énergie pour être utilisée lorsque les panneaux ne créent pas d'énergie. Le stockage de cette énergie est assuré par des batteries en général de type plomb-acide [9].

- **Régulateur**

Le régulateur de charge dans un système photovoltaïque est familial. Il est le composant de jonction entre le générateur solaire et la batterie de stockage. Il a pour rôle de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes et assure de ce fait et le mieux possible le bon fonctionnement de la batterie ainsi que la gestion du système autonome solaire photovoltaïque [9].

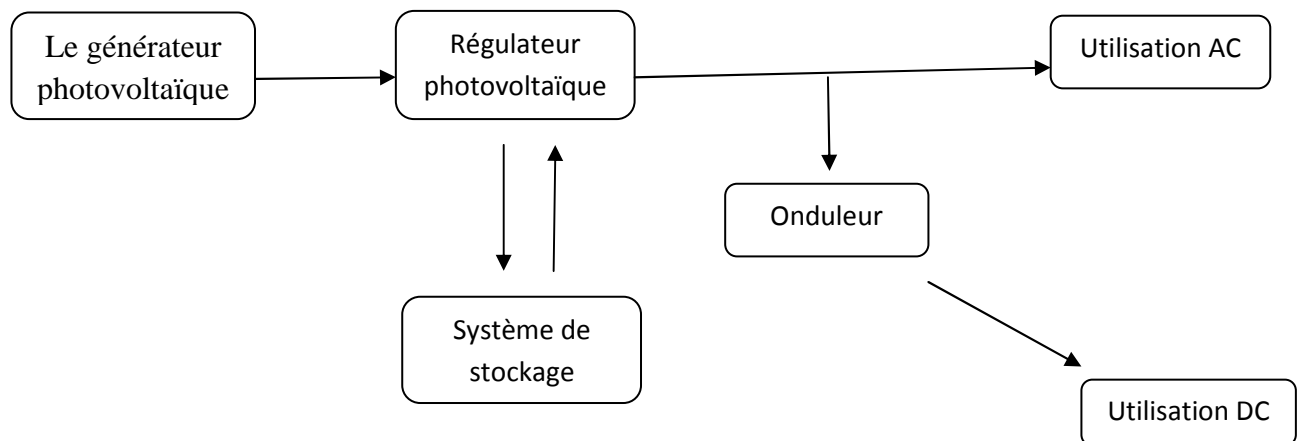


Figure II.1 Schéma d'un système photovoltaïque

- ✓ **Différents types de systèmes photovoltaïques**

Les systèmes photovoltaïques peuvent être autonomes, hybrides, ou connectés au réseau [10,11].

- Les systèmes autonomes, utilisés dans les sites isolés ou difficiles d'accès au réseau électrique, est la solution économique la plus requise pour assurer l'électricité.

- Dans les systèmes photovoltaïques connectés aux réseaux, des panneaux solaires sont reliés à un réseau par des convertisseurs
- ✓ **Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque**

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables la plus prometteuses. Elle connue par ses multiples avantages en tant qu'énergie inoffensive, la plus convenable pour les sites isolés. La durée de vie des générateurs photovoltaïques peut dépasser 30 ans et ainsi que d'autres avantages qui vont être cités par la suite. Cependant, les systèmes photovoltaïques présentent quelques inconvénients qui sont dus principalement à leur efficacité et leur coût élevé. Même si le coût a diminué considérablement ces dernières années, un système PV demeure encore très coûteux [12,13]. Le tableau II.1 présente les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques :

Tableau II.1 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • La source d'énergie est vaste et infinie • Aucune émission, aucune combustion ou carburant radioactif, ne contribue pas au changement climatique ou à la pollution globale, c'est une énergie verte. • Faibles frais d'exploitation • Aucune pièce mobile • Opérationnelle en température ambiante • Fiabilité élevée dans les modules • Ne présente pas un danger (côté sécurité) • Installation rapide 	<ul style="list-style-type: none"> • La lumière du soleil est une énergie relativement à basse densité • Coût élevé d'installation • Problème d'ombrage partiel • Faible fiabilité des éléments auxiliaires (les batteries de stockage) • Manque de stockage de l'énergie efficace et économique • Manque d'intégration et d'installation de système dans le commerce répandu

II.1.4.2 Le déversoir ou masse anodique

Le déversoir est un matériau conducteur d'électricité, il est soumis à la corrosion du système électrochimique conduite-sol-déversoir. Son rôle est d'injecter le courant de protection dans l'électrolyte. Il est relié à la borne positive de la source électrique. La valeur mesurée de son potentiel dans le sol, est souvent positive [1, 3].

➤ **Choix des matériaux d'anodes**

Plusieurs matériaux sont utilisés comme anodes déversoirs. Le choix de type d'anodes à installer dépend des facteurs suivants [3]:

- le milieu;
- la consommation (durée de vie d'exploitation);
- la densité de courant admissible;
- le prix (fournitures et mise en œuvre);

Les matériaux les plus couramment utilisés sont :

➤ Ferrailles (anodes à forte consommation) [14]:

- milieu : conviennent à tous les milieux
- consommation : 9kg/A.an
- densité de courant admissible : illimitée
- masse spécifique : 7.8 kg/cm³

L'inconvénient de ces anodes réside dans leur taux de consommation très élevé.

➤ Ferro-silicium (anodes à faible consommation) [15]:

- milieu : conviennent dans tous les milieux
- consommation : 0.5 kg/A.an
- densité de courant admissible : 0.2A/dm²
- masse spécifique : 6.8 à 7 kg/cm³

On trouve dans cette famille les anodes en graphite, Ferro-silicium, argent ou en magnétite. Les plus utilisées sont les anodes en Ferro-silicium.

➤ Graphite [14,15]

- milieu : tous milieux sous réserve de la présence d'un backfill
- consommation : 1kg/A.an
- densité de courant : 0.08 kg/A.an
- masse spécifique : 16g/cm³

➤ Milieu entourant l'anode

C'est un milieu qui assure une corrosion uniforme de l'anode et maintient autour d'elle une humidité constante ainsi que la résistance de contact anode-sol. Généralement, ces anodes sont livrées dans un sac contenant le régulateur (Backfill) qui est composé d'un mélange de bentonite, de gypse et d'eau, avec une longueur de câble suffisante pour le raccordement.

Une anode de 20 kg livrée sans Backfill nécessite [3]:

- 50 kg de bentonite ;
- 12.5 kg de gypse (sulfate de calcium) ;
- une grande quantité d'eau.

II.1.4.3 Câbles de liaison et joints isolants

Pour qu'une structure garde toute son efficacité, le système doit être complété de :

➤ Câbles de liaison

Dans le système de protection cathodique, les câbles de liaison doivent être soigneusement choisis pour éviter des pertes de courant. Les principaux critères de choix de câblages sont :

Faible résistance au passage électrique ;

Un très bon isolement par rapport au sol

Des câbles électriques spécifiques assurent le raccordement entre le générateur, le déversoir et la structure à protéger.

Les câbles électriques les plus utilisés actuellement, pour connecter les différents éléments du système, sont ceux à double isolement type unipolaire avec isolation en polyéthylène, gaine de bourrage et enveloppe extérieur en PVC. Le tableau II.2 présente quelques caractéristiques des câbles utilisés.

Tableau II.2 Sections des câbles électriques en fonction de l'intensité de courant.

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

➤ les joints isolants

Les joints isolants sont des organes de raccordement électriquement discontinu, installés pour assurer une discontinuité électrique entre deux longueurs de canalisation comportant ou non une protection cathodique.

En général, dès qu'une canalisation sort du sol pour se raccorder à des installations aériennes, il faut mettre un joint isolant. Parmi les matériaux couramment employés pour la constitution de ces joints figurent les matières plastiques thermodurcissables ou thermoplastiques, Ces dernières permettent grâce à leur résistance élevée, une discontinuité électrique.

II.1.4.4 Appareillages électriques auxiliaires

Il s'agit essentiellement des appareils de coupure, de protection et de mesure installés à poste fixe [3].

- Appareils de coupure : ce sont de simples interrupteurs qui permettent d'établir ou d'interrompre l'alimentation du poste de soutirage.
- Appareils de protection : lorsque le poste est raccordé à un réseau de distribution, un disjoncteur doit être installé. Cet appareil joue le double rôle d'appareil de coupure et de protection contre les surcharges et sur intensités.

En aval du poste, sur le circuit d'utilisation, on prévoit des fusibles calibrés.

Dans les zones orageuses, ou à proximité de lignes électriques à haute tension, on peut installer parfois, en amont et en aval du poste, des limiteurs de tension.

- Appareils de mesure : les appareils de mesure installés à poste fixe ont pour but d'indiquer :

La tension d'alimentation ;

La tension d'utilisation ;

L'intensité débitée ;

Le potentiel de la structure ;

Le temps de fonctionnement ;

II.1.5 Contrôles et maintenance de la protection cathodique

Le contrôle de la protection porte essentiellement sur les points suivants:

- le fonctionnement correct et permanent des dispositifs produisant ces potentiels,

- la mesure du potentiel de la structure,
- la vérification du maintien de ce potentiel à des valeurs acceptables sur toute la surface à protéger.

Deux grandeurs électriques mesurables sont représentatives de l'état électrique d'une structure par rapport à son milieu. Il s'agit des courants électriques reçus par la structure et des potentiels engendrés [1]

Mesure de potentiel

La mesure du potentiel d'une canalisation se fait aux points accessibles du réseau. Ces points de mesure sont constitués par tous les accessoires de réseau isolés du sol (vannes, robinet de branchement...) par des postes de détente et comptage, par les prises de potentiel réalisées à l'aide d'un câble électrique soudé sur la conduite. On prévoit en général au moins un point de mesure tous les 500 m en zone urbaine et tous les 2 à 4 Km selon les accessibilités en dehors.

- La protection cathodique étant en service, on mesure le potentiel dit à courant établi, ou potentiel « ON » qui est le potentiel du métal sous applications du courant de protection cathodique.
- A la coupure du courant de protection, on mesure le potentiel à courant coupé, ou potentiel « OFF ». Si cette mesure pouvait se faire instantanément, quelques microsecondes après la coupure, ce potentiel pourrait représenter le potentiel réel du métal sous protection cathodique, sans prendre en compte les chutes de tension dues à la circulation des courants de protection dans le sol
- Un certain temps après la coupure du courant de protection, on mesure le potentiel de polarisation du métal [1].

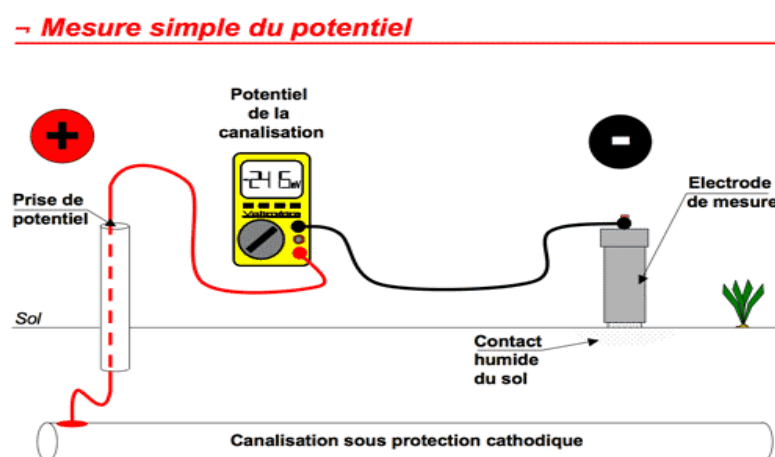


Figure II.2 Mesure de potentiel

Mesure de courant

Les courants électriques produits par le phénomène de corrosion ou par la protection cathodique constituent des éléments appréciables dans le contrôle anticorrosion. Ils se mesurent:

- dans les interconnexions entre divers systèmes,
- dans les structures longilignes, pour apprécier le sens et l'intensité d'un courant,
- par l'extérieur sur les canalisations,
- dans l'électrolyte, par des mesures de champ électrique. (Cette méthode ne donne que la direction et l'importance des courants),
- dans l'électrolyte, par la détection du champ électromagnétique engendré par le courant de protection issu d'un redresseur.

Contrôle des joints isolants

Les joints isolants doivent être vérifiés périodiquement. Leur bon état est primordial pour le bon fonctionnement de la protection cathodique. En effet toutes les déficiences d'un joint se répercutent par un affaiblissement de la protection des ouvrages.

- **Contrôles des joints isolants:**

- on mesure le potentiel conduite /sol par rapport à Cu/CuSO₄ en amont du joint isolant soit E1 ;
- on mesure le potentiel conduite /sol par rapport à Cu/CuSO₄ en aval du joint isolant soit E2 ;

En conclusion on peut que [1]:

- ❖ le joint est en bon état si la valeur de E1 avoisine celle de l'acier dans le sol.
- ❖ le joint est douteux si E2 varie de quelques dizaines de millivolts dans le même sens que E1.
- ❖ le joint est mauvais si $E_2 = E_1$.

Résultats et discussions

III.1 Données de base de l'étude

III.1.1 Description de l'ouvrage

Le tracé du pipe GPL 8" entraîne une occupation des sols de plus en plus contraignante compte tenu de l'urbanisation sans cesse croissante et des difficultés inhérentes à la nature même des terres traversées. La canalisation GPL qui relie la raffinerie RA1K TD SKIKDA au centre de stockage et de distribution (CSD) de BERRAHAL franchit, tout au long de son parcours, plusieurs obstacles (oueds, voies ferrées, routes, autoroutes...).

III.1.2 Présentation de la canalisation à protéger

La validité de l'étude d'un système de protection cathodique dépend essentiellement de la validité des informations obtenues concernant la structure à protéger. Le tableau III.1 présente les caractéristiques des canalisations à utiliser dans l'installation d'un oléoduc d'alimentation en GPL.

Tableau III.1 Présentation de la canalisation GPL

Type de conduite	Oléoduc
Matériau	Acier
Longueur de la conduite	79891 m
Diamètre	8"(203.2mm)
Epaisseur moyenne	9.11 mm
Nuance d'acier	API 5L X52
Résistivité électrique du matériau	$0.18 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}^2$
Type de revêtement	PE tri couches $E_p : 2.5\text{mm}$
Coefficient de vieillissement du revêtement	0.126 an^{-1}
Résistance initiale du revêtement	$15000 \Omega \text{ m}^2$
Potentiel naturel de la conduite	-450 mV
Potentiel de protection maximal	-1250 mV
Potentiel de protection minimal	-950 mV

III.1.3 Caractéristiques de l'électrolyte

Les résistivités du sol ont été réalisées par la méthode des quatre piquets.

➤ **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 : non destructive, capacité de fournir de hautes résolutions, relevé de mesure rapide et données facilement interprétables.

La figure III.2 présente une illustration de cette technique qui consiste à disposer quatre piquets dans le sol. On s'assure à ce que les piquets soient équidistants (distance **d**). Les deux piquets externes sont reliés à un milliampèremètre (A) monté en série avec un générateur (G). Quant aux deux piquets internes, ils sont reliés à un millivoltmètre (V). Le branchement étant réalisé, on règle ensuite le générateur à une tension. On note l'intensité du courant **I** qui passe dans le sol et on relève la tension ΔU , dans le sol. On fait varier la tension aux bornes du générateur de sorte à effectuer plusieurs mesures. Une fois les mesures effectuées, la valeur numérique de la résistivité du sol est déterminée à l'aide de la relation suivante:

$$\rho = 2\pi dR$$

Où :

ρ : Résistivité du sol ($\Omega \cdot \text{cm}$) ;

d : espacement entre deux piquets (cm) ;

R = résistance du sol (Ω) ;

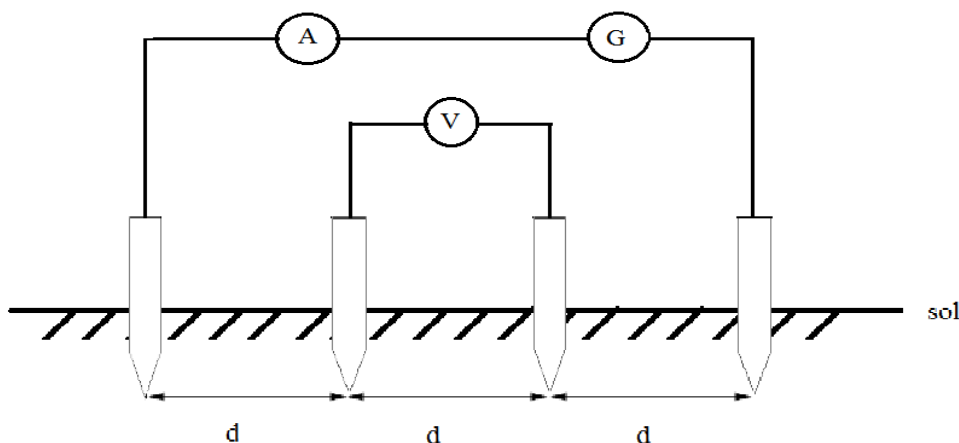


Figure III.1 Principe de fonctionnement de la méthode de Wenner

Le tableau III.2 présente la résistivité du sol relevée le long de la conduite.

Tableau III.2 Relevé de la résistivité des sols

PK(Km)	$\rho(\Omega m)$	PK(Km)	$\rho(\Omega m)$	PK(Km)	$\rho(\Omega m)$	PK(Km)	$\rho(\Omega m)$
0.000	187.2	16.500	110.27	33.000	8.98	49.500	16.7
0.500	111.48	17.000	9.79	33.500	13.55	50.000	25.37
1.000	89.4	17.500	22.23	34.000	32.14	50.500	46.47
1.500	77.4	18.000	11.17	34.500	17.25	51.000	23.48
2.000	25.44	18.500	42.82	35.000	7.16	51.500	13.56
2.500	25.92	19.000	5.27	35.500	6.15	52.000	11.05
3.000	18.6	19.500	19.84	36.000	16.95	52.500	10.55
3.500	22.68	20.000	14.19	36.500	6.65	53.000	7.66
4.000	8.76	20.500	47.85	37.000	14.14	53.500	4.9
4.500	48.6	21.000	32.54	37.500	41.44	54.000	5.15
5.00	63.36	21.500	48.98	38.000	6.65	54.500	4.77
5.500	42.72	22.000	5.02	38.500	16.58	55.000	6.02
6.000	47.35	22.500	10.29	39.000	11.18	55.500	34.8
6.500	43.7	23.000	10.04	39.500	8.66	56.000	25.87
7.000	63.05	23.500	27.63	40.000	15.7	56.500	4.9
7.500	28.88	24.000	14.19	40.500	13.7	57.000	5.15
8.000	28.38	24.500	11.89	41.000	29.9	57.500	37.68
8.500	43.83	25.000	14.82	41.500	25.12	58.000	51
9.000	23.84	25.500	13.25	42.000	12.18	58.500	11.55
9.500	27.54	26.000	6.78	42.500	13.19	59.000	9.67
10.000	96.58	26.500	16.32	43.000	11.3	59.500	7.78
10.500	104.75	27.000	13.56	43.500	15.7	60.000	38.05
11.000	43.7	27.500	20.09	44.000	5.65	60.500	21.85
11.500	10.55	28.000	26.37	44.500	9.3	61.000	16.58
12.000	6.78	28.500	10.67	45.000	11.93	61.500	18.59
12.500	14.44	29.000	3.51	45.500	11.43	62.000	15.07
13.000	85.91	29.500	7.53	46.000	7.16	62.500	10.92
13.500	27.5	30.000	9.04	46.500	8.16	63.000	10.55
14.00	19.84	30.500	28.88	47.000	12.05	63.500	9.3
14.500	28.13	31.000	20.59	47.500	7.16	64.000	10.17
15.000	6.78	31.500	11.65	48.000	10.98	64.500	9.54
15.500	12.81	32.000	29.25	48.500	7.41	65.000	9.16
16.000	9.67	32.500	12.12	49.000	19.09	65.500	10.17

PK(Km)	$\rho(\Omega m)$	PK(Km)	$\rho(\Omega m)$	PK(Km)	$\rho(\Omega m)$	PK(Km)	$\rho(\Omega m)$
66.000	10.92	70.000	8.91	73.500	7.03	77.000	49.48
66.500	8.29	70.500	10.67	74.000	8.66	77.500	40.19
67.000	8.92	71.000	8.16	74.500	9.42	78.000	25.24
67.500	11.68	71.500	9.54	75.000	11.8	78.500	55.26
68.000	7.28	72.000	8.54	75.500	5.77	79.000	46.47
68.500	5.27	72.500	7.66	76.000	5.4	79.500	20.96
69.000	5.77	73.000	7.91	76.500	31.4	79.800	30.9
69.500	4.77						

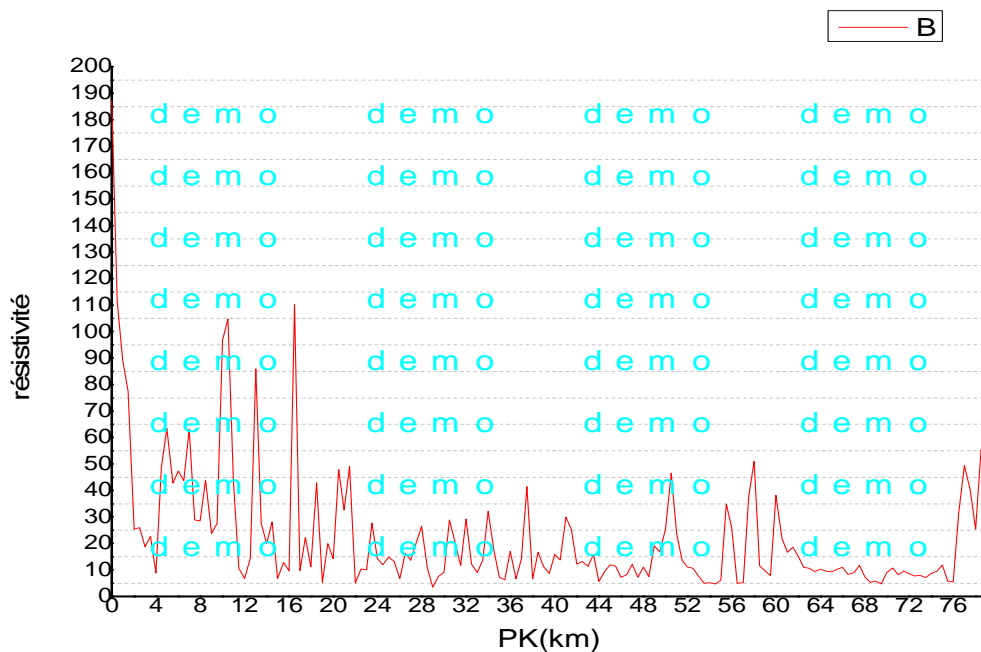


Figure III.2 Diagramme de résistivité du sol

D'une manière générale, la résistivité (ρ) du sol nous renseigne sur la conductivité électrique de ce dernier. Le classement est établi en fonction de la valeur de ρ (Ωm) :

- $\rho > 100$: caractérise un sol non agressif
- $50 < \rho < 100$ caractérise un sol moyennement agressif
- $\rho < 50$ caractérise un sol agressif

A la lecture des résultats de la résistivité relevés le long du tracé de l'oléoduc, on note que les valeurs sont très faibles. Autrement dit, nous avons affaire à un sol agressif.

➤ Les points particuliers

L'étude du tracé révèle l'existence de routes ainsi que des croisements avec d'autres conduites. Ces points sont considérés comme des points spéciaux.

En croisements

- Traversées de routes.
- Croisement de pipelines.
- Croisement de conduites d'eau et autres ouvrages.
- Croisements des lignes électriques aériennes à haute tension.

En parallélismes

- Du PK : 8.800 au 15.120 (RGK1) nappe de pipe existante).
- Du PK : 20.625 au 22.898 avec une conduite GAZ-Ø4".
- Du PK : 25.755 au 54.225 avec deux conduites GAZ-Ø20" et 28".

Il est essentiel d'éviter tous ces points qui vont influencer sur la structure à protéger. Quelques précautions sont nécessaires pour réduire ces effets.

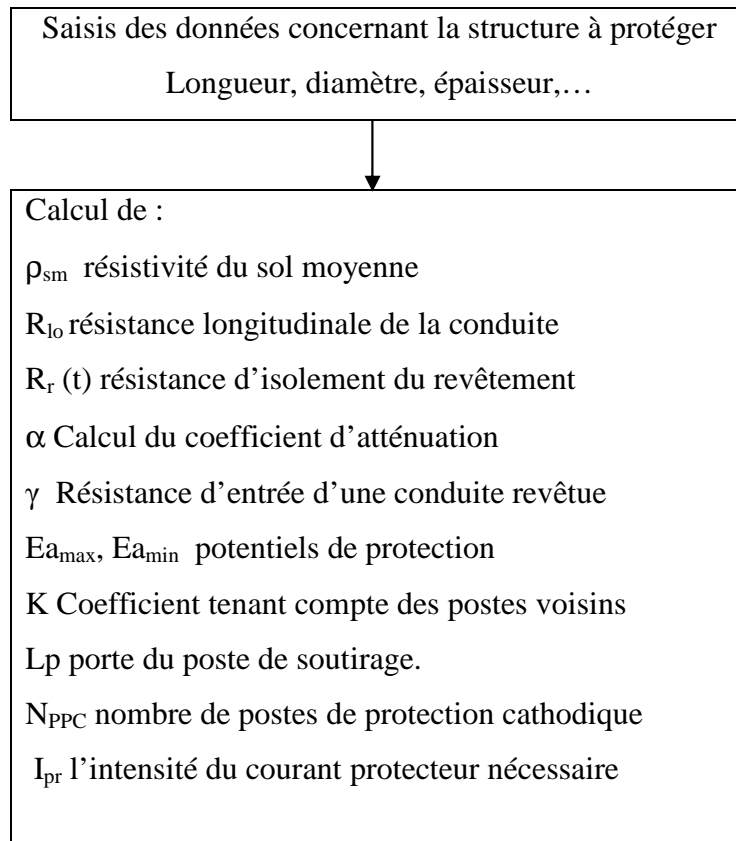
III. 2 Etude du projet de dimensionnement du système de protection cathodique de l'oléoduc « SKIKDA-BERRAHAL »

Dans cette étude, on fixe la valeur de potentiel minimum à -950 mV par rapport (Cu/CuSO₄). Pour avoir une certaine gamme de sécurité. L'application des principales relations pour le calcul des paramètres de la protection cathodique nécessite certaines hypothèses :

- sol est homogène le long de la canalisation,
- le diamètre, l'épaisseur de la paroi et la résistance électrique des tubes sont constants,
- le revêtement isolant est appliqué uniformément, c'est-à-dire que l'épaisseur ainsi que les propriétés électriques du revêtement sont constantes le long de la canalisation.

A partir des données de base de l'étude concernant la structure à protéger et les éléments de protection, nous avons effectué les calculs de dimensionnement de la protection cathodique de l'ouvrage en question.

III.2.1 Organigramme du calcul



III.2.2 Calcul des paramètres caractéristiques

- **Calcul de la résistivité du sol moyenne ρ_{sm}**

Tout au long du tracé, on effectue plusieurs mesures et on détermine la résistivité moyenne, par la relation suivante:

$$\rho_{sm} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \rho_i$$

Où :

N : nombre de tronçons =162

ρ_{sm} : résistivité moyenne du sol (Ωm)

ρ_i : résistivité du sol de tronçon

$$\rho_{sm} = 22.7 \Omega m$$

- **Calcul de la résistance longitudinale de la conduite R_{l0}**

Les structures métalliques traversées par le courant de protection sont considérées comme des conducteurs et tout conducteur présente une résistance au passage d'un courant électrique.

Dans le cas des canalisations, cette résistance est appelée résistance longitudinales et dépend de la nature du matériau et de ses dimensions.

Autrement dit, c'est la résistance transversale, par unité de longueur. Elle s'exprime en Ωm^{-1} et elle est donnée par :

$$R_{l0} = \frac{\rho_a}{S}$$

Où :

S : surface de la canalisation : $(S = \pi(D_{ext} - e)e)$

ρ_a : résistivité électrique du matériau (Ωm)

D_{ext} : diamètre extérieur de la conduite (m)

e : épaisseur moyenne de la conduite (m)

soit :

$$R_{l0} = \frac{\rho_a}{\pi(D_{ext} - e)e}$$

On obtient alors :

$$R_{l0} = 3.23 \times 10^{-5} \Omega m^{-1}$$

- **Calcul de la résistance spécifique d'isolement après une durée d'exploitation (Ωm^2)**

La résistance d'isolement diminue en fonction du temps d'exploitation et le besoin en courant de protection augmente. Cette variation en fonction du temps est donnée par l'équation suivant :

$$R_{iso}(t) = R_{iso} \frac{1 - e^{-\beta t}}{\beta t}$$

R_{iso} : résistance d'isolement du revêtement initial (Ωm^2)

β : Coefficient de vieillissement ($1/an$) = 0.126

t : durée d'exploitation (25 ans)

Par application de cette formule, on trouve :

$$R_{iso}(t) = 4.55 \times 10^3 \Omega m^2$$

- **Calcul de la résistance d'isolement d'un revêtement par unité de longueur (Ωm)**

Elle s'exprime en (Ωm) et est notée $R_r(t)$ pour une durée d'exploitation t :

$$R_r(t) = \frac{R_{iso}(t)}{\pi D_{ext}}$$

Au début de l'installation du système de protection ($t = 0$), la résistance d'isolement du revêtement est donnée par :

$$R_r(0) = 22.89 \times 10^3 \Omega m$$

La valeur de la résistance d'isolement du revêtement à la fin d'exploitation $t = 25$ ans

$$R_r(25) = 6.95 \times 10^3 \Omega m$$

- **Calcul du coefficient d'atténuation α**

Est appelé aussi la constante de la distribution du potentiel le long de la conduite, il traduit l'abaissement du potentiel le long de bras de potentiel. Il est donné par la relation suivante :

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

α = coefficient d'atténuation (m^{-1}).

La valeur numérique de ce coefficient est :

$$\alpha = 6.81 \times 10^{-5} m^{-1}$$

- **Résistance d'entrée d'une conduite revêtue γ**

La résistance d'entrée est considérée comme une résistance moyenne d'entrée du courant pour une durée d'exploitation du système de protection :

$$\gamma = \frac{\sqrt{R_{lo} R_r(t)}}{2}$$

$$\gamma(0) = 0.43\Omega$$

$$\gamma(25) = 0.23\Omega$$

- **Valeurs des potentiels**

Dans les calculs de protection cathodique, on distingue en général pour les conduites enterrées trois potentiels. Ils sont donnés par rapport à l'électrode au cuivre-sulfate de cuivre (Cu/CuSO₄)

- **Potentiel naturel**

Ce potentiel est noté « E_n », c'est le potentiel stationnaire du métal dans le sol

- **Potentiels de protection ($E_{p_{max}}$, $E_{p_{min}}$)**

Les potentiels de protection sont considérés comme un intervalle entre une valeur de protection maximum (E_{max}) et une valeur de protection minimum (E_{min}) auxquelles le métal ne s'oxyde pas.

Le potentiel $E_{p_{max}}$ est choisi en fonction du type de revêtements. Car certains revêtements ne supportent pas des potentiels trop négatifs. Donc le potentiel de protection est limité. Tandis que le potentiel $E_{p_{min}}$ est relevé à partir du diagramme de Pourbaix. Pour l'acier la plus petite valeur (valeur absolue) est de 850 mV.

- **Gain de potentiel (Ea_{max} , Ea_{min})**

C'est la différence du potentiel que prend le métal par rapport au potentiel naturel lorsqu'il connecte au poste de soutirage. On distingue un gain de protection maximum et minimum, notés respectivement Ea_{max} et Ea_{min} .

$$Ea_{max} = Ep_{max} - E_n \quad \text{et} \quad Ea_{min} = Ep_{min} - E_n$$

Les valeurs numériques de potentiels

Potentiels	(mV)/Cu/CuSO ₄)
Potentiel naturel (E_n)	-450
Potentiel de protection maximum (Ep_{max})	-1250
Potentiel de protection minimum (Ep_{min})	-950
Gain de potentiel max (Ea_{max})	-800
Gain de potentiel min (Ea_{min})	-500

- **Coefficient, K, tenant compte des postes voisins**

Dans la plupart des temps les canalisations de transport d'hydrocarbures sont assez longues. Un seul poste de soutirage ne suffit pas à livrer le courant nécessaire pour protéger la canalisation. C'est pourquoi on tient compte d'un facteur, K, dans les calculs de la longueur de protection. Ce coefficient est donné par la relation suivante :

$$K = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{Ea_{min}}{Ea_{Pmax}}\right)^2 \left(\frac{2\pi\gamma y + \rho_{sm}}{2\pi\gamma y}\right)}}$$

Où y représente la distance entre la masse anodique et la conduite à protéger (m).

$$K = 0.567$$

- **Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage Lp**

La longueur de protection, Lp, représente la longueur maximale de conduite qui peut être protégée à l'aide d'un courant fourni par un poste de soutirage. En d'autre terme c'est la porte du poste de soutirage.

Un poste de soutirage à deux bras de protection, c'est-à-dire, il est judicieux de placer le poste de soutirage au milieu afin d'assurer une portée de protection plus importante.

Lp s'exprime en mètre (m) et est déterminé à l'aide de la relation suivante :

$$Lp = \frac{2}{\alpha} \ln \left(\frac{2\pi\gamma y}{K \left(\frac{Ea_{min}}{Ea_{max}}\right) (2\pi\gamma y + \rho_{sm})} \right)$$

Donc la portée du poste de soutirage est de:

$$Lp = 28234m$$

- **Calcul du nombre de postes de protection cathodique N_{PPC}**

Connaissant la longueur de la conduite et la longueur de protection d'un seul poste de soutirage. Donc on peut déterminer facilement le nombre de postes nécessaire pour assurer la protection de toute la conduite.

$$N_{PPC} = \frac{L}{Lp + 1}$$

L : longueur de la conduite

L_p : porte d'un seul poste de soutirage

$$N_{PPC} = 3 \text{ postes}$$

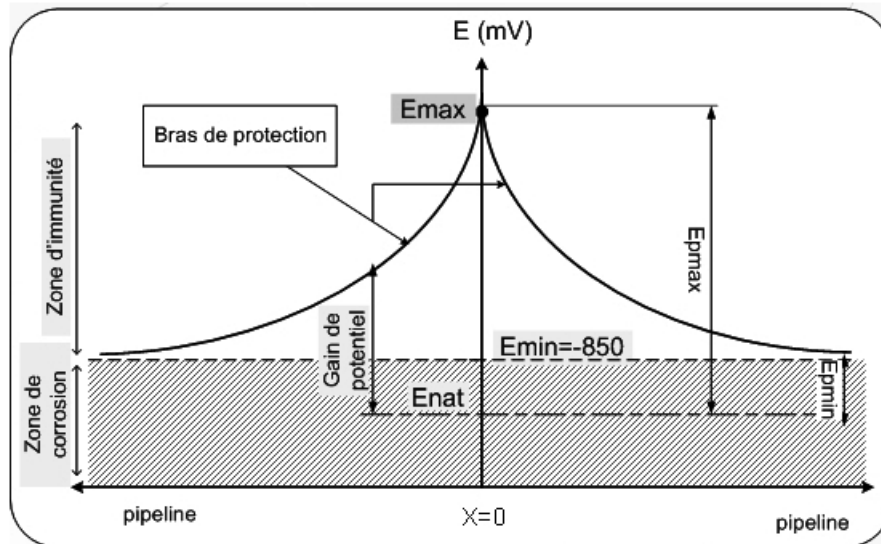


Figure III. 3 Variation du potentiel de protection le long d'une conduite

- **Calcul de l'intensité du courant protecteur nécessaire au début et à la fin de l'exploitation**

$$I_{pro}(t) = \frac{|E_{pmax}|}{\gamma(t) \cdot [1 + 2Exp(-\alpha L_p)] + \frac{\rho_{sm}}{2\pi y}}$$

$$I_{pro}(0) = 1.43 \text{ A}$$

$$I_{pro}(25) = 2.61 \text{ A}$$

On remarque que le courant à la fin de l'exploitation est relativement élevé par rapport à celui nécessaire au début de l'exploitation; cela serait dû au revêtement. En effet au début de l'exploitation, le revêtement à toutes ses caractéristiques donc il participe fortement à la protection. Ce qui réduit l'impact de la protection active, mais au fil du temps le revêtement (la protection passive) perd de ses qualités, et donc il faut plus de courant pour assurer la protection de la structure.

- Dimensionnement des anodes

Les anodes utilisées dans le cadre de cette sont en fer silicium FeSi ; leurs caractéristiques sont reportées dans le tableau III.3.

Tableau III.3 Caractéristique des anodes

Composition chimique	14.2%-14.7% de silicium ; 0.6%-0.7% manganèse ; 0.4%-0.8% carbone ; et le reste c'est de fer
Longueur de l'anode	1520 mm
Consommation massique	0.5 Kg/A.an
Profondeur de pose	1.5 m
Espace entre anode	6m
Coefficient d'utilisation	0.5
Durée d'exploitation	25 ans
Masse unitaire	23.5 Kg

- Calcul du nombre d'anodes minimal pour la protection N_a

Connaissant la durée de vie de la protection et les caractéristiques de l'anode choisie, nous pouvons estimer le nombre d'anodes nécessaire à la protection contre la corrosion d'une structure par la relation :

$$N_a = 10 \times \frac{I_{pro} \times t \times m}{\mu \times Ma}$$

Où :

I_{pro} Courant de protection (A)

t Durée de l'exploitation (Ans)

μ Coefficient d'utilisation d'anode

Ma Masse d'une anode (Kg)

m Consommation massique de l'anode (Kg/A.an)

Le nombre d'anodes minimal nécessaire à la protection de la structure doit être un nombre entier.

$$N_a = 27.76 \text{ anodes}$$

On prendra donc au minimum 28 anodes.

- **Etude de sensibilité**

- **Influence de la résistivité du sol**

En utilisant les équations établies précédemment, et pour une distance entre le lit anodique et la conduite maintenue à 200m, avec les caractéristiques de l'oléoduc, on effectue une simulation en utilisant Microsoft Office Excel.

Le tableau III.4 présente l'influence de la résistivité du sol sur le nombre de postes de protection cathodique (N_p), l'intensité du courant nécessaire pour la protection cathodique (I_{pro}) et le nombre d'anodes (N_a).

Tableau III.4 Influence de la résistivité du sol sur N_p , I_{pro} et N_a

$\rho_{sol} (\Omega m)$	N_p (postes)	I_{pro} (A)	N_a (anode)
10	3	2.66	29
20	3	2.62	28
50	4	2.49	27
100	4	2.26	24
150	5	2.03	22
200	7	1.8	19
250	10	1.58	17
300	18	1.36	15

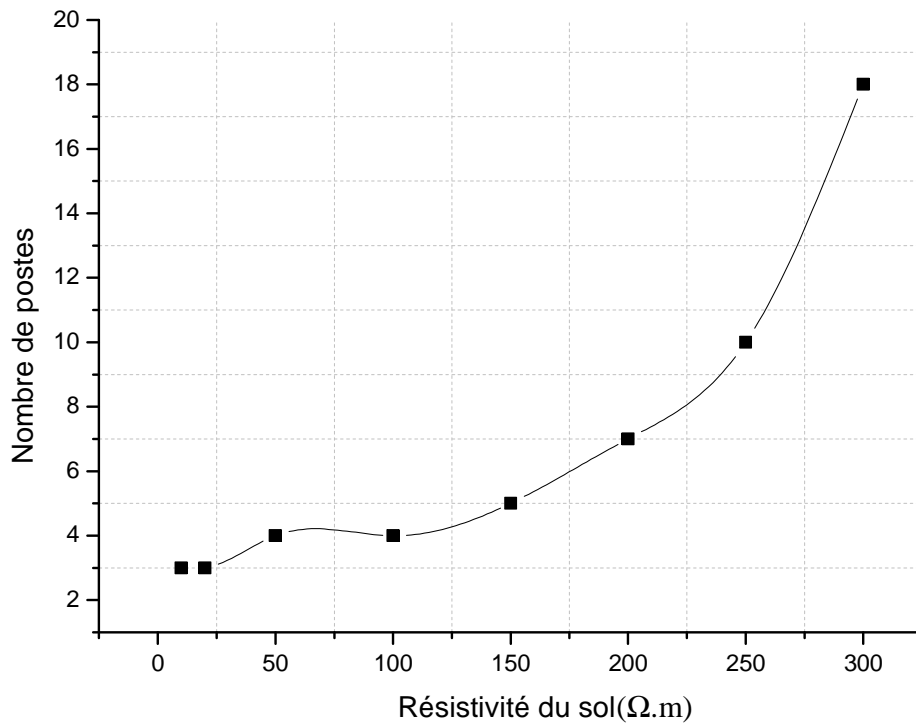


Figure III.4 Variation du nombre de postes en fonction de la résistivité du sol

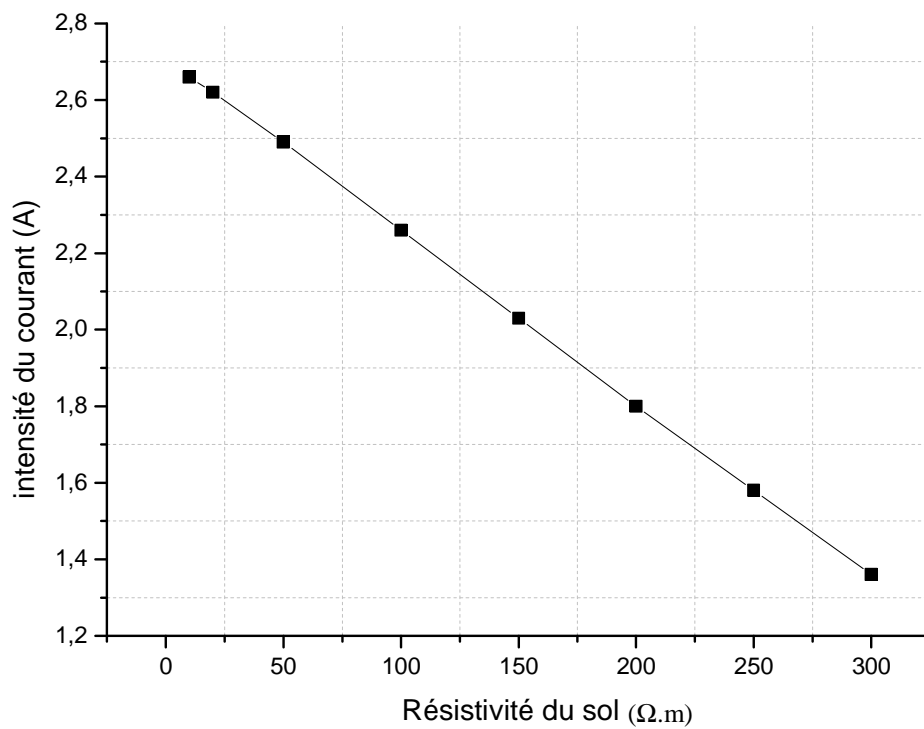


Figure III.5 Variation de l'intensité du courant en fonction de la résistivité du sol.

La courbe de la figure III. 4 met en évidence l'effet de la résistivité du sol sur le nombre de postes de protection. On remarque que le nombre de postes de protection croît avec la résistivité du sol. En effet pour des sols de résistivité assez élevée, la propagation du courant reste faible. Autrement dit, la résistivité du sol est la capacité de celui-ci à s'opposer au passage du courant ; c'est pourquoi il est nécessaire d'augmenter le nombre de postes de protection pour couvrir toute la longueur de la structure.

Si maintenant on considère la figure III.5, on constate que le courant est inversement proportionnel à la résistivité du sol. C'est-à-dire que, pour de faibles valeurs de la résistivité du sol, l'intensité du courant protecteur est importante. En effet, pour de faibles résistivités, le terrain est plus agressif donc il est nécessaire de prévoir un courant plus grand pour contenir cette agression.

- **Influence de la distance Y (m) entre le déversoir et la conduite**

Le tableau III.5 présente l'influence de la distance de déversoir sur le nombre de postes de protection, l'intensité du courant protecteur et le nombre d'anodes nécessaire.

Tableau III.5 Influence de « Y » sur le système de protection

$Y(m)$	N_p (postes)	I_{pro} (A)	N_a (anode)
40	4	2.2	24
60	4	2.37	25
80	3	2.46	26
100	3	2.51	27
150	3	2.57	28
200	3	2.61	28
250	3	2.63	28
400	2	2.65	29

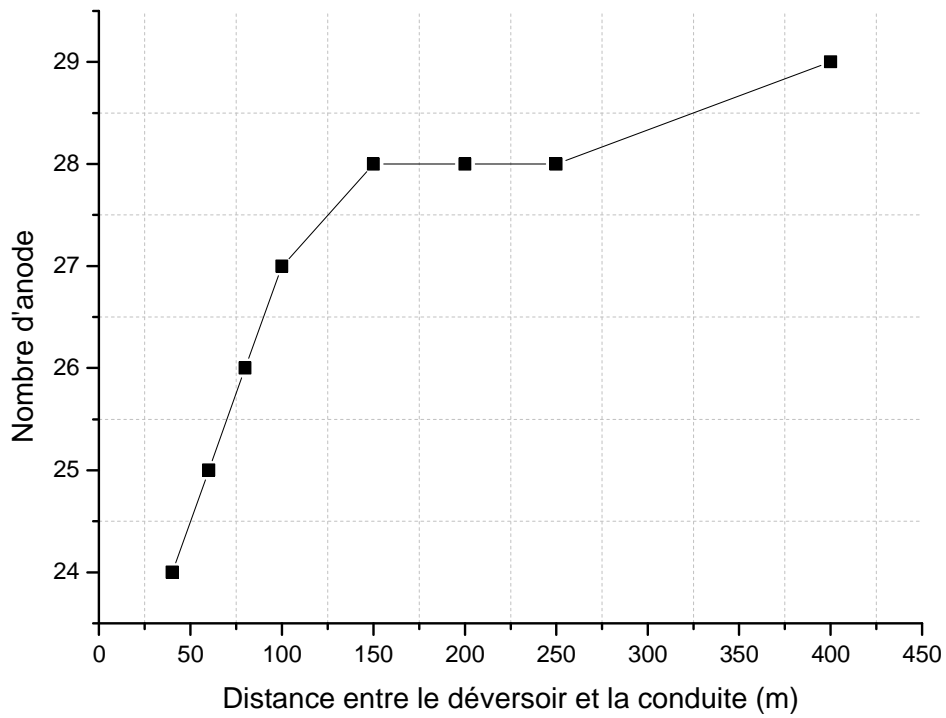


Figure III.6 Variation du nombre d'anodes en fonction de « Y ».

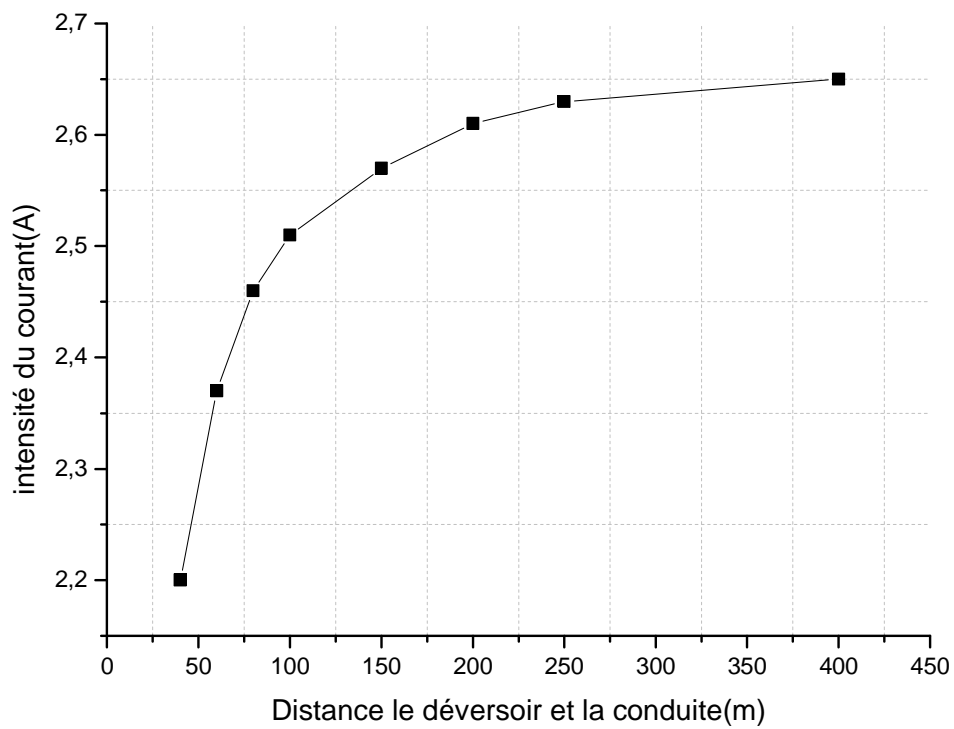


Figure III.7 Variation de l'intensité du courant en fonction de « Y ».

Dans la pratique, on remarque que l'augmentation de la distance entre le lit anodique et la canalisation permet d'augmenter le bras de protection. Ce qui permet par la suite de diminuer le nombre de postes de soutirage. Malheureusement ceci entraîne aussi une augmentation de l'intensité du courant dans le point de drainage d'où la nécessité d'augmenter la puissance du poste de soutirage, c'est-à-dire une augmentation des frais réduits, rapportés de la longueur de la canalisation

- **Influence de la résistance initiale du revêtement sur l'intensité du courant protecteur**

Le tableau III.6 présente l'influence de la résistance initiale du revêtement sur l'intensité du courant de protection

Tableau III.6 Influence de la résistance initiale du revêtement

Résistance initiale du revêtement (Ωm^2)	Intensité du courant (A)
5000	4.39
10000	3.17
15000	2.61
20000	2.27
25000	2.03
30000	1.86

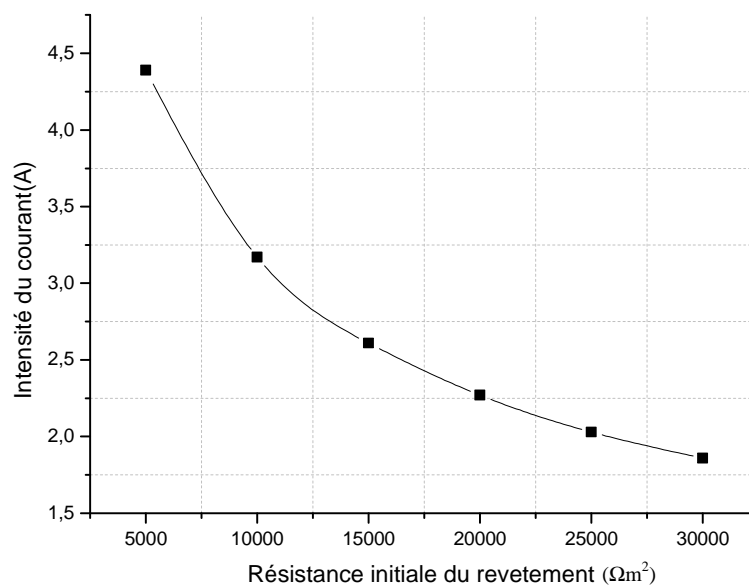


Figure III. 8 Variation de l'intensité du courant en fonction de la résistance du revêtement

Les résultats présentés ci-dessus révèlent que l'intensité du courant de protection varie inversement avec la résistance initiale du revêtement. Pour assurer une protection avec moins d'énergie électrique, il faut par conséquent utiliser un revêtement de bonne qualité avec une mise en œuvre rigoureuse.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le choix du transport des hydrocarbures par les canalisations enterrées reste le moyen le plus efficace, notamment lorsqu'il s'agit de l'évacuation de quantités importantes sur de longues distances. Donc il est important de les préserver et de lutter contre le phénomène de corrosion car il représente un problème majeur pour ces canalisations. L'expérience, dans le domaine de l'industrie pétrolière, a démontré que la sécurité de ces ouvrages repose plus particulièrement sur la fiabilité du système de protection anticorrosion.

Parmi les techniques de protection contre la corrosion, on parle des efficacités de la protection cathodique qui ont été démontrées à travers une quarantaine d'années d'expérience. En fait, dans certains pays il a été même conféré un caractère réglementaire et obligatoire à son application dans le cas des conduites de gaz et de produits pétroliers.

Dans l'optique de ce travail, on s'est intéressé à l'étude de la protection cathodique par un courant imposé. Ainsi, les avantages d'une telle protection sont:

- L'augmentation des durées d'exploitation.
- La réduire les frais d'entretien.
- L'évitement des arrêts imprévus.

Les résultats de cette présente étude indiquent que l'efficacité du système de protection cathodique serait assurée par :

- Une bonne qualité du revêtement.
- Un bon dimensionnement.
- Une maintenance des installations.
- Une élimination des courants vagabonds par le drainage.
- Une continuité électrique.

Les résultats obtenus nous ont permis de mettre en évidence l'influence de certains paramètres tels que :

- L'influence de la résistance initiale du revêtement sur l'intensité du courant protecteur.
- L'influence de la distance entre le déversoir et la conduite.
- L'influence de la résistivité du sol sur l'efficacité les paramètres de protection cathodique.

En perspectives :

A la lumière de ce modeste travail, trois pistes de recherche nous sont apparues et pourraient faire l'objet de travaux ultérieurs et aussi de compléter ce travail à savoir:

- Dimensionnement de la source d'énergie (système photovoltaïque) auquel les électrotechniciens auraient intérêt.
- Il est utile de se pencher sur d'autres travaux en visant un dimensionnement du système de protection cathodique de plusieurs conduites par un seul poste de soutirage
- L'influence des courants vagabonds sur l'efficacité du système de protection cathodique est un problème majeur dans le secteur de transport des hydrocarbures par canalisation. Pour les études avenir, il faut étudier l'influence de ces courants sur l'efficacité du système de protection cathodique. Cela peut se faire par des enregistrements magnétiques (suivre l'évolution de ces courants sur le système (PC)

ANNEXES

Annexes

PROTECTION CATHODIQUE DEFINITIVE GPL SKIKDA BERRHAL

LISTE TRAVERSEES POINTS SPECIAUX

DESIGNATION	PK
	GPL
Route	/
Route	0,219
Voie d'accès	0,610
Voie ferrée	0,788
Voie D'accès	1,103
Route	1,472
Canal	2,434
Route	3,189
Canal	3,347
Voie d'accès	3,500
Canal	3,561
Route communale Hammadi Hamrouche	5,490
Route Filfila	6,288
Carrefour RN 44	6,944
Oued Saf-Saf	7,296
CW 104	7,800
Voie ferrée	7,816
Croisement nappe de pipes	12,156
Croisement nappe de pipes	15,195
CW 104	19,717
Voie ferrée	19,739
Oued Saf-Saf	19,909
CW 46	20,625
RN 44	22,898
Voie ferrée	23,222
Route nationale n° 44AC	24,436
Oued Haddarat	25,755
Oued Benarada	29,966
Route nationale n° 3 AB	31,695
Oued Ras El Ma	33,262
Route communale	33,355
Autoroute Est/Ouest 1	37,241

Annexes

DESIGNATIONS	PK
	GPL
Route communal	37,556
Ouled El Fendek	38,775
CW 6	39,990
Route communale	42,366
Autoroute Est /Ouest 2	44,000
Route communale	44,841
Oued Graffer	45,829
Oued Adjoul 1	47,280
RN 44	47,474
Voie ferrée	47,508
Oued Adjoul 2	47,891
Voie ferrée	49,149
RN 44	49,537
Route communale	51,686
Oued Hammimine	51,782
Oued Charchar	55,181
Route communale	55,241
RN 80	57,929
Voie ferrée	57,958
Oued Lemchekel	58,300
Oued El Kebir	61,818
Oued Maboun	63,478
CW 128	63,780
Voie Ferrée	63,929
CW 13	73,861
Route communale	78,662
Voie ferrée	79,636
Voie ferrée	79,696

Annexes

Tableau récapitulatif pour maintenance des installations de protection cathodique

Défauts constante	causes	remèdes
Installation hors service. Pas de tension de secteur au redresseur	Déclenchement du disjoncteur fusible défectueux	Réenclenché le disjoncteur. change le fusible
Absence du courant de protection ou courant de protection trop faible	rupture de câble de liaison ou de contact résistance d'anode très élevée	mesurer la résistance conduite/anodes localisé défaut de câbles. vérifier les bornes de connexion augmenter la tension du redresseur ou installe une autre anode déversoir. Vérifier la connexion de l'anode
courant de protection très important	Baisse de la résistance d'anode due à l'humidité du sol (généralement en hiver) Contact avec d'autres canalisations étrangères non protégées	Modifier légèrement le réglage du redresseur de manière de débite le courant nécessaire de protection Localiser les points de contacts et éliminer la cause de défaut sur la canalisation
Drainages du courant Courant nul ou trop important Pas de protection cathodique Pas de réglage du potentiel	trafic SNTV à l'arrêt câble de liaison des rails et la conduite ne sont pas coupés sous station en plein régime rupture de câble de liaison résistance élevée des anodes augmentation en courant protecteur du aux contacts métallique avec structure étrangère redresseur défaillant	s'assurer réellement que le trafic est à l'arrêt rétablir les connexions discuter avec l'exploitant SNTF mesure la résistance des câbles de liaison (anode conduite...) . réajuster la tension de redresseur et vérifier l'installation d'anode. localiser le défaut et éliminer les contacts métalliques avec les structures étrangères. vérifier le réglage des instruments de mesures. vérifier la présence de la tension alternative aux bornes du redresseur et le remplacer s'il ya lieu

Annexes

Tableau : donne les domaines de potentiel généralement recommandés, pour différents métaux dans différent milieux :

METAL	Domaines de protection préconisés	
	Dans les sols (électrode Cu/CuSO ₄)	En eau de mer (électrode Ag/AgCl)
Acier et carbone :		
1) Environnement aérobie	<-0,85 V	<-0,80 V
2) Environnement anaérobie	<-0,95 V	<-0,90 V
Alliages cuivreux	<-0,50 V à -0,65 V	< -0,45 V à -0,60 V
Aluminium	Entre -0,95 V et -1,50 V	Entre 0,90 V et -0,15 V
Plomb	Entre -0,60 V et -1,50 V	Entre -0,55 V et -1,45 V

Annexes

potentiels de corrosion libre(ou naturels) potentiel de protection et potentiel limite critique de certains métaux courants dans le sol, l'eau douce et l'eau de mer.

Métal ou alliage	Milieu		E_{nat} V/ECS	E_{prot} V/ECS	E_{lim} crit. E_i V/ECS
Matériaux ferreux non alliés ou peu alliés	Eaux et sol en condition d'aérobiose	Condition normal, $T < 40^\circ C$	-0,66 à -0,40	-0,85	-
		$T > 60^\circ C$	-0,80 à -0,50	-0,95	-
		Sols sableux $100 < p < 1000 \Omega m$	-0,50 à -0,30	-0,70	-
		Sols sableux $p > 1000 \Omega m$	-0,40 à -0,2	-0,65	-
	Eaux et sol en condition d'anaérobiose		-0,80 à -0,66	-0,95	-
Acier inox ferritique et austénitique ayant une limite élastique $< 800 Nmm^{-2}$	Sols et eaux douces, neutres et alcalin	à $T^\circ C$ ambiante	-0,10 à +0,20	-,45	-
	Sols et eaux Douce, acides	à T° ambiante	-0,10 à +0,10	-	-
	Eaux de mer	à T° ambiante	-0,10 à +0,20	-0,45	-
Acier inox ferritique et austénitique ayant une limite élastique $< 800 Nmm^{-2}$ et $C_1 \geq 16\%$	Sols et eaux douce, neutre et alcalins	à $T^\circ C$ ambiante	-0,10 à +0,20	-0,20	-
Acier inox ferritiques et martensitique ayant une limite élastique $> 800 Nmm^{-2}$	Eau	à $T^\circ C$ ambiante	-0,10 à +0,20	-0,45	-
Cuivre et alliage du cupronickel	Eau et sol		-0,20 à +0,00	-0,20	-
plombe	Eau et sol		-0,50 à -0,40	-0,65	-0,95
Alliage d'aluminium	Eau de douce		-0,50 à -0,40	-0,65	-0,95
	Eau de mer		-0,70 à -0,50	-0,90	-1,15
	Eau et sol		-0,80 à -0,50	-0,90	-1,15
Acier dans le béton	Eau et sol		-0,00 à -0,10	-0,75	-
Acier galvanisée	Eau et sol		-1,10 à -0,90	-1,20	-

Annexes



point de mesure

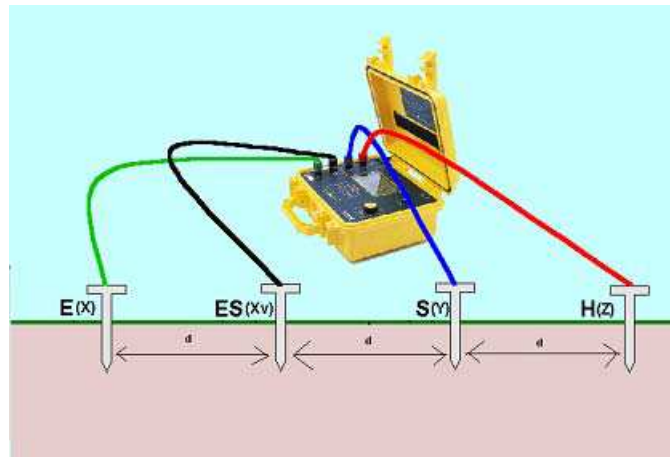


Multimètre

Annexes



Poste redresseur
Méthode de calcul de la résistivité du sol ρ



Méthode de WENNER

Annexes



Électrode de référence sulfate du cuivre

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Chapitre I

- [1] J. Benard, A. Michel, J. Philibert, J. Talbot, *Metallurgie générale*, Ed Masson, 1969
- [2] L.L Shrear, R.A. Jarman and G.T. Burstein *Corrosion. vol. 1 : Metal/environment reactions* “third ed. Butterworth Heinemann, 2000 ISBN 0-7506-1077-7
- [3] L L Shreir, R A Jarman, G T Burstein “*Corrosion Vol. 2, Corrosion Control*” third ed. Butterworth Heinemann, 2000 ISBN 0-7506-1077-8
- [4] D. Landolt « *Corrosion et chimie de surfaces des métaux* »(TM volume 12) PPUR - Collection : Traité des Matériaux - 3^e édition - 2003
- [5] G. G. Geesey, R. J. Gillis, R. Avci; D. Daly, M. Hamilton, P. Shope, G. Harkin, *Corro. Sci.* 38 (1996) 73.
- [6] V. S. Sasti, E. Ghali, M. Elboujdaini “*Corrosion Prevention and protection practical solutions*” ed J. Wiley & Sons LTD 2007 ISBN : 978-0-470-02402-7
- [7] Esra Kus, Kenneth Neelson, Florian Mansfeld *Electrochim. Acta* 54 (2008) 47–52
- [8] F. Teng a, Y.T. Guan a,b,c, W.P. Zhu a *Corro. Sci.* 50 (2008) 2816–2823
- [9] N. Washizu , Y. Katada, T. Kodama *Corro. Sci.* 46 (2004) 1291–1300
- [10] B. Little, P. Wagner, F. Mansfeld *Inter. Mat. Rev.* Vol.: 36, 6 (1991) 253-272
- [11] M. E. Parker, E.G. Peattie “*Pipe Line Corrosion and Cathodic Protection*” Third Ed. G.P.P. Elsevier Science (USA) 1999 ISBN 0-87201-149-6
- [12] B. Normand, N. Pébère, C. Richard; B. Balland « *Prévention et lutte contre la corrosion : une approche scientifique et technique* » Presses polytechniques et universitaires romandes, 2004.
- [13] M. Pourbaix « *Atlas des équilibres électrochimiques* » Paris, Gauthier-Villars, 1963.
- [14] S. W. Guan ,46th AUCSC Water and Wastewater Program West Virginia University, PA May 15, 2001
- [15] B.S. Wyatt Shreir's Corrosion Vol.4 (2010) 2801–2832
- [16] *Les canalisations d'eau et de gaz* éd. Tech. & doc. Lavoisier, 1987
- [17] M. BOUNOUGHAZ , thèse de doctorat en métallurgie, ENP, 2006
- [18] *Manuel de protection cathodique* », édition Technip, 1970.
- [19] T. Barlo, J. Thomas and B. We. *Mater. Perfo. Corrosion Prevention and Control Worldwide Nace International*, vol. 23, no 9 (1984) p.9-16

Références bibliographiques

Chapitre II

- [1] Les canalisations d'eau et de gaz éd. Tech. & doc. Lavoisier, 1987
- [2] L.L. Shreer, R.A. Jarman and G.T. Burstein Corrosion. vol. 1 : Metal/environment reactions "third ed. Butterworth Heinemann, 2000 ISBN 0-7506-1077-7
- [3] M. E. Parker, E.G. Peattie "Pipe Line Corrosion and Cathodic Protection" Third Ed. G.P.P. Elsevier Science (USA) 1999 ISBN 0-87201-149-6
- [4] Li-Shiang Lai, Wen-Chieh Hou, Ya-Tsung Feng, Yu-An Chen, "Novel Grid-connected Photovoltaic Generation System," The 3rd Inter. Conf. on Elec. Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Nanjing, Chine, Avril 2008.
- [5] Guan-Chyun Hsieh, Hung-Liang Chen, Yaohwa Chen, Chee-Ming Tsai, Shian-Shing Shyu, "Variable Frequency Controlled Incremental Conductance Derived MPPT Photovoltaic Stand-Along DC Bus System," Applied Power Electronics Conference and Exposition, Austin, Texas, Feb. 2008.
- [6] M. G Villalva, J.R. Gazoli, and E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," *IEEE Trans. Pow. Electr.* Vol. 24, 5, May 2009.
- [7] C. Ngô L'Énergie, ressources, technologies et environnement, Dunod CEA, 2002
- [8] N. Achaïbou , A. Malek et N. Bacha Rev. Energ. Ren. : Chemss (2000 61-66
- [9] Y.RAIS « Modélisation du rendement du convertisseur DC/AC dans un système photovoltaïque », mémoire de magister en génie électronique, ENP, 2012
- [10] M. H. RASHID, "Power Electronic Handbook," Academic press, California, USA, 2001
- [11] D. Das, R. Esmaili, L. Xu, D. Nichols, "An Optimal Design of a Grid Connected Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell System for Distributed Energy Production," 31st an. Conf. of IEEE Ind. Elec. Soc. Raleigh, North Carolina, Nov. 2005
- [12] K. S. M. Raza, H. Goto, H.J. Guo, "An Improved and Very Efficient MPPT Controller for PV Systems subjected to Rapidly Varying 107 Atmospheric Conditions and Partial Shading," Australian Universities Power Engineering Conference, Adelaide, Australia, Sept. 2009

Références bibliographiques

[13] Q. Zhang, X. Sun, Y. Zhong, M. Matsui, "A Novel Topology for Solving the Partial Shading Problem in Photovoltaic Power Generation System," IEEE 6th Inter. Power Electronics and Motion Control Conference, Wuhan, China, May 2009.

[14] B.S. Wyatt Shreir's Corrosion Vol.4 (2010) 2801–2832

[15] A. Kumar, and V. Hock, "Survey of Cathodic Protection Systems Using Ceramic Coated Anodes," Paper No. 284, Proceedings of the National Association of Corrosion Engineers (1989)

Références bibliographiques
