

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي « برج بوعرييرج »

Université Mohamed El Bachir Elibrahimi –Bordj Bou

Arreridj Faculté des Sciences et de la Technologie

Département des Sciences de la Matière

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم علوم المادة



# Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLOME DE: Master

**Filière : Chimie**

**Option : Chimie des matériaux**

## THÈME

**La protection cathodique des ouvrages enterrés.**

**Procédure de diagnostic de l'état de revêtement d'une  
conduite de transport d'hydrocarbure.**

**Préparé par : GASMI Hocine**

**Soutenu le : 10 07 2021**

**Devant le jury :**

**Président : Dr M. BOUBATRA**

**Rapporteur : Dr S. DAOUDI**

**Examineur : Dr Med-R KHELLADDI**

**Année Universitaire 2020-2021**

# Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

## Première partie

### Introduction générale

Introduction générale. .... 1

### Chapitre I Notion de corrosion

I-1 Définition ..... 3

I-2 Nature électrochimique de la corrosion ..... 3

I-3 Différentes formes de corrosion ..... 3

I-4 Facteurs de corrosion ..... 7

### Chapitre II Aspect thermodynamique de la corrosion

II-1 Principe de la corrosion électrochimique ..... 8

II-2 Potentiel d'électrode des métaux : ..... 8

II-3 Electrode de référence : ..... 9

II-4 Mesure du potentiel d'un métal dans un électrolyte : ..... 9

II-5 Equilibre d'un métal dans une solution: ..... 11

II-6 Equilibre de deux métaux différents dans une solution : ..... 11

II-7 Diagramme de stabilité de l'eau : ..... 12

II-8 Diagramme tension-pH du fer : ..... 13

### Chapitre III Aspect cinétique de la corrosion

III-1 Processus électrochimiques développés sur une électrode en contact avec un électrolyte : 15

III-1-1 Couche double à l'interface métal-électrolyte : ..... 15

III-1-2 Potentiel du métal dans l'électrolyte : ..... 15

III-1-3 Processus de la corrosion : ..... 15

III-2 Courant et potentiel de corrosion : ..... 16

III-3 Facteurs agissant sur la corrosion des ouvrages métalliques enterrés : ..... 17

III-3-1 Le sol comme électrolyte.....	17
III-3-1-1 Propriétés physiques des sols :.....	17
III-3-1-2 Propriétés chimiques des sols :.....	17
III-3-1-3 Mesure de l'agressivité : .....	18
III-3-2 Piles dues à l'électrolyte :.....	18
III-3-3 Piles dues à l'association de métaux différents (Couplage galvanique) :.....	19
III-3-4 Corrosion bactérienne :.....	21
III-3-5 Corrosion par les courants vagabonds :.....	21

## **Chapitre IV Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés**

IV-1 Principe de la protection cathodique : .....	22
IV-2 La protection passive :.....	22
IV-3 La protection active : .....	23
IV-3-1 Protection par anodes sacrificielles :.....	23
IV-3-2 Protection par courant imposé :.....	27
IV-4 Réalisation pratique d'un système de protection cathodique par courant imposé.....	29
IV-4-1 Réalisation d'un poste de protection cathodique.....	29
a) Source d'énergie à courant continu :.....	29
b) Déversoir :.....	29
b-1) Familles de l'anode constituante du déversoir : .....	29
b-2) Caractéristiques de quelques types d'anodes utilisées : .....	30
b-3) Choix de l'emplacement du déversoir :.....	33
c) Câbles de liaison : .....	33
d) Appareillages électrique auxiliaires :.....	33
IV-4-2 Les différentes prises de mesure de potentiel installées le long de la conduite. ....	33
IV-4-3 Mesure des potentiels de protection cathodique.....	38
IV-4-4 Critères de protection cathodique.....	40
IV-4-4-1 Critère principale : .....	40
IV-4-4-2 Critères secondaires : .....	40

## **Deuxième partie**

### **Chapitre V Diagnostic de l'état de revêtement d'une conduite de transport d'hydrocarbure**

V-1 Introduction .....	42
V-2 Détermination du taux de dégradation d'un revêtement .....	42

V-2-1 Mesure de la résistivité du sol entre les prises de mesure de courant (PMC) .....	42
V-2-2 Détermination de la résistance caractéristique de chaque prise de mesure de courant (PMC) .....	43
V-2-3 Détermination du courant de protection de chaque tronçon compris entre deux PMC contiguës : .....	44
V-2-4 Relevé de potentiel on/off sur l'ensemble de l'ouvrage. ....	45
V-2-5 Calcul de la résistance d'isolement moyenne de chaque tronçon.....	45
V-3 Détermination du courant nécessaire pour polariser une plaque nue en acier au même potentiel <b>off</b> moyen obtenu sur chaque tronçon et comparaison de la densité de courant de la plaque à celle du tronçon :.....	46
V-4 Détermination du taux de surface nue de chaque tronçon : .....	47
V-5 Aspect économique de la procédure : .....	48
V-6 Etude de cas. ....	49

### **Conclusion et perspectives**

Conclusion et perspectives :.....	53
-----------------------------------	----

### **Références bibliographiques**

Références bibliographiques. ....	54
-----------------------------------	----

## Liste des figures

Figure 1 Corrosion uniforme (généralisée) .....	3
Figure 2 Corrosion localisée.....	4
Figure 3 Corrosion galvanique .....	4
Figure 4 Corrosion érosion.....	4
Figure 5 Corrosion par cavitation.....	5
Figure 6 Corrosion fretting.....	5
Figure 7 Corrosion intergranulaire .....	5
Figure 8 Corrosion intergranulaire .....	5
Figure 9 Corrosion sous contrainte ou fatigue .....	6
Figure 10 Corrosion à haute température .....	6
Figure 11 Mesure du potentiel du métal par rapport à une électrode de référence .....	9
Figure 12 Correspondance des différentes électrodes de référence.....	10
Figure 13 Equilibre d'un métal dans une solution.....	11
Figure 14 Equilibre de deux métaux dans une solution .....	11
Figure 15 Diagramme de stabilité de l'eau.....	12
Figure 16 Diagramme tension-pH du fer.....	13
Figure 17 Corrosion par aération différentielle .....	19
Figure 18 Corrosion par pile géologique.....	19
Figure 19 Corrosion par couplage galvanique.....	20
<b>Figure 20</b> Corrosion par courant vagabond .....	21
Figure 21 Protection cathodique par anode sacrificielle .....	23
Figure 22 Protection cathodique par courant imposé .....	28
Figure 23 Anode en Ferro-silicium chrome .....	30
Figure 24 Anode en graphite .....	31
Figure 25 Anode titane platiné .....	32
Figure 26 Prise de potentiel simple (PPS).....	34
Figure 27 Prise de mesure de courant (PMC) .....	34
Figure 28 Prise équipotentielle (PEP) parallélisme et croisement .....	35
Figure 29 Prise de mesure et contrôle de joint isolant (PJI).....	36
Figure 30 Types de raccords isolants .....	37
Figure 31 Electrode de référence.....	38
Figure 32 Valeurs de potentiel selon position d'électrode .....	39
Figure 33 Application du critère 100 mV.....	41
Figure 34 Schéma de principe de la méthode de Wenner .....	42

Figure 35 Schéma de principe mesure résistance caractéristique PMC .....	43
Figure 36 Schéma de principe mesure densité de courant de polarisation plaque .....	46
Figure 37 Courbes de potentiel on off .....	50
Figure 38 Résistance d'isolement de chaque tronçon .....	51
Figure 39 Taux de surface nue de chaque tronçon .....	52

## Liste des tableaux

Tableau 1 Potentiels standards .....	10
Tableau 2 Consommation de quelques métaux usuels .....	16
Tableau 3 Agressivité du sol par rapport à l'acier .....	18
Tableau 4 Caractéristique des anodes sacrificielles .....	24
Tableau 5 Domaines d'application des anodes sacrificielles .....	25
Tableau 6 Avantages et inconvénient des anodes sacrificielles .....	26
Tableau 7 Domaines de potentiels de protection préconisés .....	27
Tableau 8 Résistance caractéristique des PMC.....	44
Tableau 9 Courant de protection entre PMC contigües .....	44
Tableau 10 Relevé de potentiel on/off .....	45
Tableau 11 Résistance d'isolement moyenne des tronçons .....	46
Tableau 12 Rapport des intensités de courant.....	47
Tableau 13 Taux de surface nues .....	47

*Première*

*partie*



# *Introduction générale*

## Introduction générale

### **Introduction générale**

La plupart des métaux utilisés par l'homme ne se trouve pas dans la nature à l'état natif. Ils sont extraits de minerais dans lesquels ils sont combinés à d'autres corps simples sous forme d'oxydes, de sulfures, de carbonates, ...

La métallurgie, au moyen de réactions chimiques ou électrochimiques, élabore les métaux à partir de leurs minerais, ces réactions consomment une énergie importante, on comprend donc que les métaux ne soient pas stables intrinsèquement.

Sous l'action des éléments extérieurs tels que l'eau, l'oxygène, et plus généralement de facteurs physiques ou chimiques (Contraintes mécaniques, température, hétérogénéité de structure, gradient de concentration de corps chimique en présence, courants vagabonds,...) ils s'oxydent et se dégradent, tendant ainsi à retourner à l'état de minerais. Ce phénomène d'oxydation ou de dégradation est appelé corrosion des métaux [11].

Des statistique récentes ont révélé la réalité déconcertante que les coûts attribués aux dommages de corrosion de toutes sortes estimés être de l'ordre de 3 à 5% du produit national brut (PNB) pour les pays industrialisés [1], les coûts directs et indirects de la corrosion sont considérables ceci comprend les pertes en métal, les frais d'entretien et de réparations, le coût des études et de la protection.

La demande de plus en plus accrue d'énergie dans les pays industrialisés a contribué de manière décisive au développement des moyens de transport de la matière première.

Le transport par canalisation s'est avérés efficace et rentable, aussi les réseaux de pipelines sont devenus denses, et ont précipité les études et les mises en place de la protection cathodique comme moyen de lutte contre la corrosion.

L'Algérie étant un pays à économie basé essentiellement sur l'exportation des matières premières énergétiques, dispose d'un nombre important de canalisations de transport d'hydrocarbure, cette situation impose des conditions particulières d'étude et de mise en place de la protection cathodique avec une bonne maîtrise.

Nous aborderons dans notre travail deux parties essentielles, l'une portera sur le phénomène de la corrosion des ouvrages enterrés et la protection cathodique comme moyen de lutte, l'autre se focalisera sur le diagnostic de l'état de revêtement des canalisations enterrées, et ceci avec des techniques de mesure que devrait effectuer un technicien sur site.

La première partie de ce mémoire comprend quatre chapitres à travers lesquels nous parlerons de la corrosion, ces aspects thermodynamiques et cinétiques ainsi que la réalisation

## **Introduction générale**

pratique de la protection cathodique comme moyen de lutte contre la corrosion des ouvrages enterrés. Dans la deuxième partie nous aborderons une procédure détaillée concernant le diagnostic de l'état de revêtement d'une conduite de transport d'hydrocarbure en utilisant plusieurs techniques de mesures.

Une conclusion générale comprenant des perspectives complète ce mémoire.

# *Chapitre I*

## *Notion de corrosion*

## Chapitre I : Notion de corrosion

### I-1 Définition

Une définition générale de la corrosion est la dégradation d'un matériau par interactions dans son milieu environnant. Cette définition englobe tous les matériaux, à la fois naturels et synthétiques et comprend les plastiques, la céramique et les métaux [2].

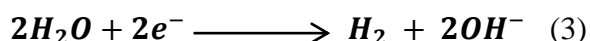
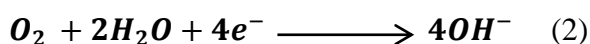
Il existe trois types (processus) de corrosion, corrosion chimique (sèche), corrosion électrochimique (humide) et corrosion bactérienne.

Dans ce mémoire nous mettons l'accent sur la corrosion des métaux en particulier sur la corrosion des aciers au carbone et faiblement alliés utilisés dans les pipelines souterrains de transport d'hydrocarbures.

### I-2 Nature électrochimique de la corrosion

La plupart des problèmes de corrosion rencontrés est liée à la présence d'eau en contact des métaux. C'est le cas des environnements naturels.

Les canalisations de transport d'hydrocarbure souterraines sont soumises à des différents phénomènes de corrosion qui sont tous d'origine électrochimique quelle que soit la forme d'attaque où le métal s'oxyde en libérant des électrons selon la réaction (1) le cas du fer et la consommation de ces électrons se fait selon les réactions (2) ou (3) c'est la réduction de l'oxygène ou de l'eau [2].



### I-3 Différentes formes de corrosion

Les trois catégories suivantes regroupent neuf formes de corrosion [3].

#### Première catégorie

Problèmes de corrosion identifiable par examen visuel.

1- Corrosion uniforme ou généralisée :

Caractérisée par une perte régulière de métal de la surface corrodée.

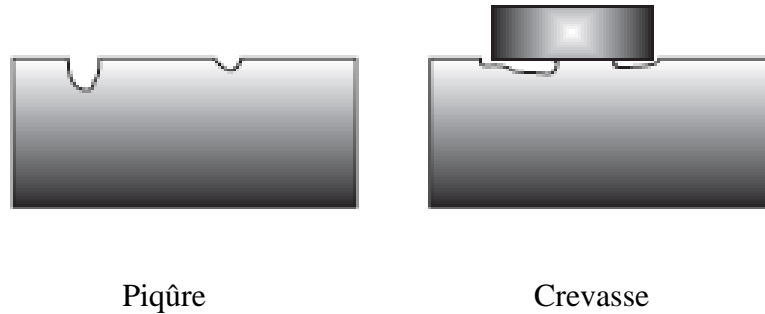


**Figure 1** Corrosion uniforme (généralisée) [3]

## Chapitre I : Notion de corrosion

### 2- Corrosion localisée :

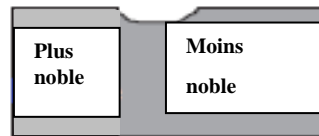
Telles que la corrosion par piqûre ou corrosion crevasse, c'est une corrosion au cours de laquelle une partie ou la totalité du métal sera perdue.



**Figure 2** Corrosion localisée [3]

### 3- Corrosion galvanique :

Causée par contact électrique entre deux conducteurs différents dans l'électrolyte.



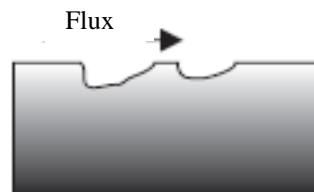
**Figure 3** Corrosion galvanique [3]

## **Deuxième catégorie**

Problèmes de corrosion qui nécessitent des moyens pour les identifier.

### 4- Les effets de vitesse comprennent :

- Corrosion-érosion qui est une forme d'attaque causée par un écoulement à grande vitesse.



**Figure 4** Corrosion érosion [3]

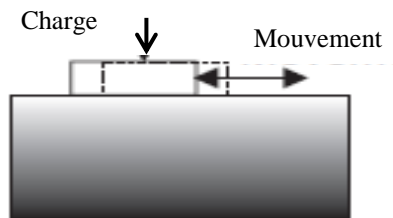
## Chapitre I : Notion de corrosion

- Cavitation : écoulement par effondrement de bulles formées dans des zones de basse pression.



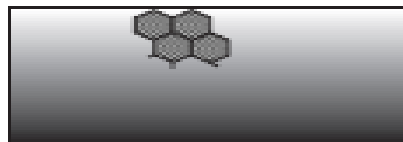
**Figure 5** Corrosion par cavitation [3]

- Fretting : causé par les vibrations (mouvement relatif de deux surfaces en contact étroit sous charge).



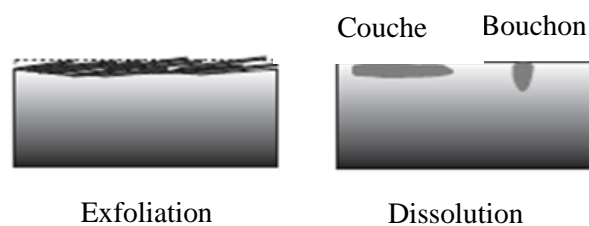
**Figure 6** Corrosion fretting [3]

- 5- Corrosion intergranulaire :  
Se passe aux joints de grains.



**Figure 7** Corrosion intergranulaire [3]

- 6- Corrosion due à la dissolution sélective d'un composant d'alliage :



**Figure 8** Corrosion intergranulaire [3]

## Chapitre I : Notion de corrosion

### Troisième catégorie

Corrosion qui doit être vérifiée par microscope.

#### 7- Corrosion sous contrainte ou fatigue :

Forme de corrosion qui provoque la fissuration du matériau.

##### Craquage



Corrosion sous contrainte



Corrosion fatigue

**Figure 9** Corrosion sous contrainte ou fatigue [3]

#### 8- Corrosion à haute température (entartrage, attaque interne) :

##### Attaque à haute température



Entartrage



Attaque interne

**Figure 10** Corrosion à haute température [3]

#### 9- Corrosion causée par certains types de bactéries :

C'est une forme de corrosion d'origine bactérienne.



## Chapitre I : Notion de corrosion

### **I-4 Facteurs de corrosion**

Les formes de corrosion mentionnées dans le paragraphe précédent, se sont déclenchées à cause de différentes combinaisons de facteurs ; L'initiation et la progression des processus de corrosion dépendent de l'interaction de complexe d'une multitude de facteurs tels que [3] :

- Nature du métal ou de l'alliage ;
- Présence d'inclusion ou d'autres corps étrangers à la surface du métal ;
- Homogénéité de la surface métallique ;
- Nature du milieu corrosif ;
- Influence des facteurs environnementaux, tels que les variations de la présence d'oxygène dissout, de température et de la vitesse d'écoulement que ce soit du milieu ou du système lui-même ;
- Autres facteurs telle que la fatigue ;
- Les couches des oxydes ;
- Présence de dépôts sur la surface ;
- Défauts de surface et possibilité de la présence de corrosion crevasse ;
- Corrosion galvanique en présence de deux métaux différents ;
- Présence occasionnelle de courant vagabond provenant de sources externes.

## *Chapitre II*

# *Aspect thermodynamique de la corrosion*

## Chapitre II : Aspect thermodynamique de la corrosion

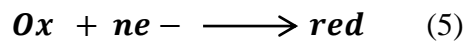
### II-1 Principe de la corrosion électrochimique

La corrosion d'un métal comme le fer c'est son passage en solution de l'état atomique à l'état ionique selon la réaction (1), d'une manière générale un métal se corrode selon la réaction d'oxydation :



La conservation de la neutralité d'un milieu impose que les électrons libérés par la réaction de dissolution (4) soient consommés dans une deuxième réaction qui peut être (2) ou (3) selon le milieu électrolytique [4].

D'une manière générale cette réaction peut être schématisée par la réaction suivante :



### II-2 Potentiel d'électrode des métaux

Les échanges de courant électrique à l'interface métal électrolyte sont régis par des différences de potentiel. A chaque réaction correspond un potentiel dit d'électrode selon l'équation de Nernst [4] :

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{red}}{a_{ox}} \quad (6)$$

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{ox}}{a_{red}} \quad (7)$$

L'activité  $a$  est généralement égale à la concentration d'où :

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[ox]}{[red]} \quad (8)$$

$E^0$  : Potentiel standard (normal) en V par rapport à une électrode de référence.

Par convention le potentiel standard de la réaction  $2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2$  est pris égal à zéro.

L'électrode standard à hydrogène constitue l'électrode officielle de mesure des potentiels d'électrode.

$R$  : Constante des gaz parfait  $8,314570 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ .

$T$  : Température en Kelvin.

$a$  : L'activité chimique de l'oxydant et du réducteur (généralement égale à la concentration).

$F$  : Constante de Faraday  $96485 \text{ C.mol}^{-1} = 1 \text{ F}$ .

## Chapitre II : Aspect thermodynamique de la corrosion

$n$  : Nombre d'électron mis en jeu.

$[ox]$  : Concentration de l'oxydant.

$[red]$  : Concentration du réducteur.

Appliquant la loi de Nernst pour les réactions (4) et (5) on aura :

$$E1 = E^01 + \frac{RT}{nF} \ln[M^n] \quad (9)$$

$$E2 = E^02 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[ox]}{[red]} \quad (10)$$

Par convention on dit qu'il y a corrosion si  $E2 > E1$

### II-3 Electrode de référence

On ne peut pas mesurer physiquement le potentiel d'une électrode métallique plongée dans un électrolyte. En effet on ne peut mesurer que la différence de potentiel d'une pile composée d'une électrode métallique et une électrode de référence au contact du même électrolyte.

Dans la pratique industrielle on utilise des électrodes de références autres que l'électrode standard à hydrogène (ESH) utilisée dans les laboratoires de recherche.

Pour les canalisations de transport d'hydrocarbure on utilise l'électrode cuivre-sulfate de cuivre saturé (Cu/CuSO<sub>4</sub>). Pour les eaux de mer on utilise une électrode de référence Ag/AgCl.

### II-4 Mesure du potentiel d'un métal dans un électrolyte

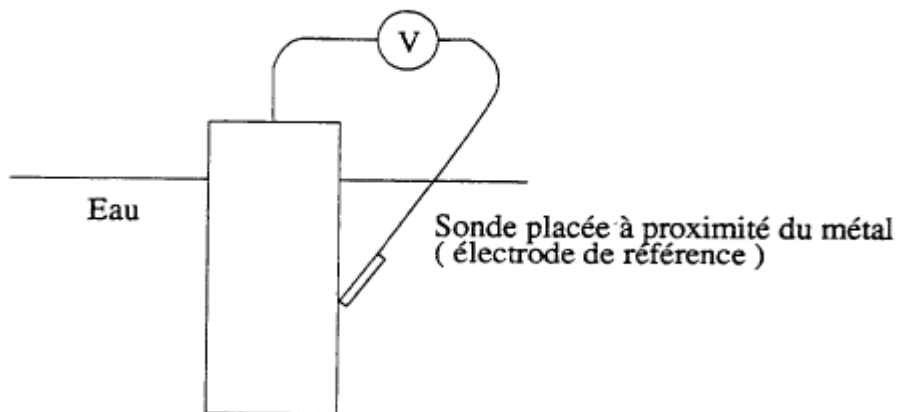


Figure 11 Mesure du potentiel du métal par rapport à une électrode de référence [6]

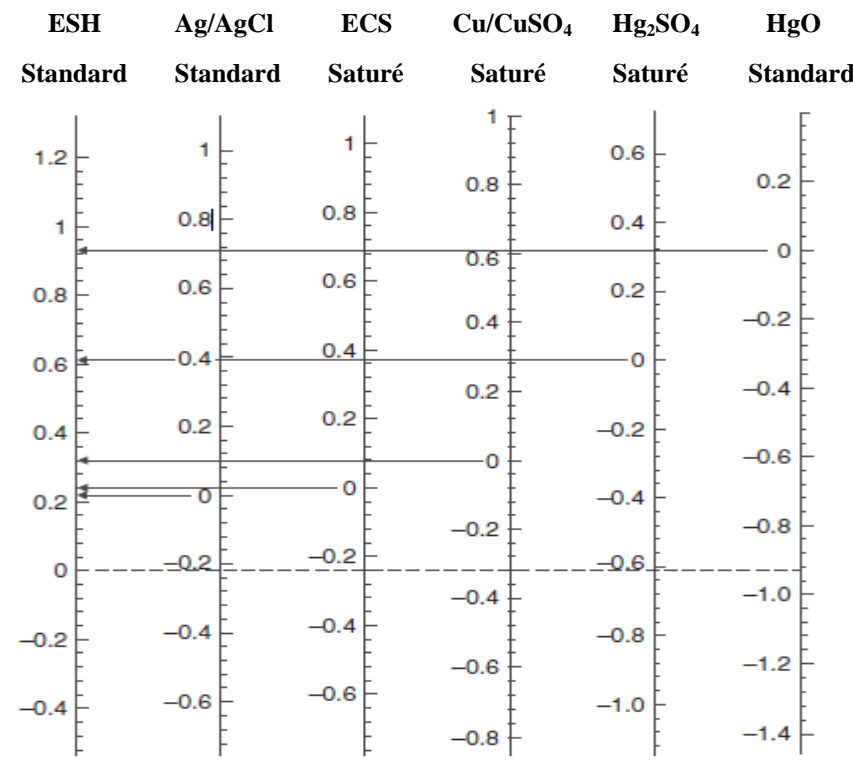
## Chapitre II : Aspect thermodynamique de la corrosion

Le tableau suivant donne les potentiels standards des principales réactions électrochimiques :

Electrode		Potentiel par rapport à l'électrode d'hydrogène (V)
Or	Au /Au <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup>	+1,50 Métaux
Platine	Pt /Pt <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	+1,20 Nobles
Argent	Ag /Ag <sup>+</sup> + e <sup>-</sup>	+0,80
Oxygène	O <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O + 4e <sup>-</sup> /4OH <sup>-</sup>	+0,40
Cuivre	Cu /Cu <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	+0,34
Inox - Duplex		0 (après qq jours)
Hydrogène	2H <sup>+</sup> /H <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup>	0
Plomb	Pb /Pb <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-0,13
Nickel	Ni /Ni <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-0,26
Fer	Fe /Fe <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-0,447
Chrome	Cr /Cr <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup>	-0,74
Zinc	Zn /Zn <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-0,76
Titane	Ti /Ti <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-1,63
Auminium	Al /Al <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup>	-1,66
Magnésium	Mg /Mg <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-2,37

**Tableau 1** Potentiels standards [4]

Le schéma ci-après représente la correspondance entre les différentes électrodes de référence couramment utilisées :

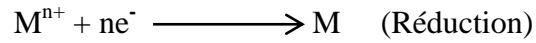
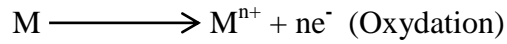


**Figure 12** Correspondance des différentes électrodes de référence [3]

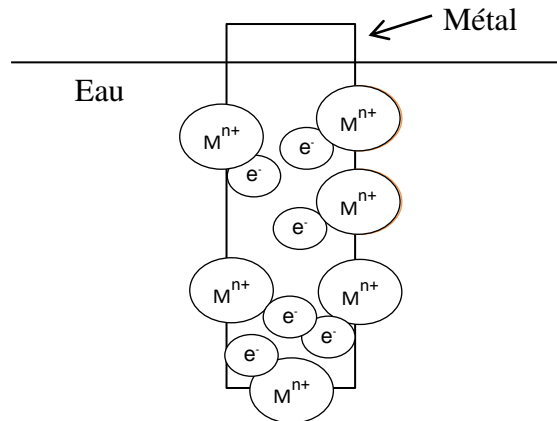
## Chapitre II : Aspect thermodynamique de la corrosion

### II-5 Equilibre d'un métal dans une solution

Il y a équilibre entre le métal ses ions et ses électrons selon les deux demi réactions :



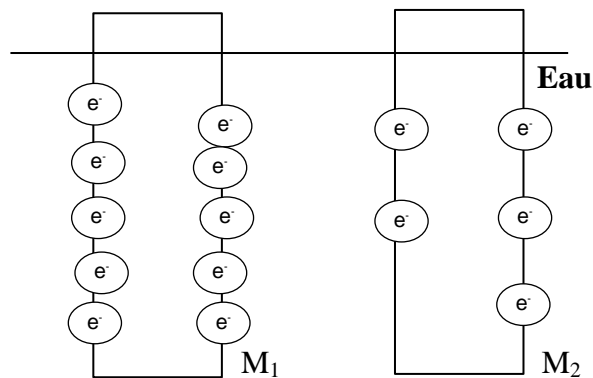
Et avec établissement d'un potentiel entre le métal et la solution.



**Figure 13** Equilibre d'un métal dans une solution [6]

### II-6 Equilibre de deux métaux différents dans une solution

Chaque métal à son propre potentiel dans la solution, le métal  $M_1$  représenté dans la figure suivante qui a le plus tendance à s'ioniser, à un potentiel plus faible que le métal  $M_2$ .



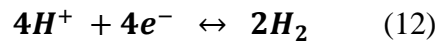
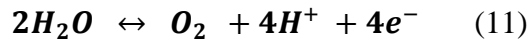
**Figure 14** Equilibre de deux métaux dans une solution [6]

## Chapitre II : Aspect thermodynamique de la corrosion

### II-7 Diagramme de stabilité de l'eau

Les diagrammes tension-pH nous permet de prévoir les réactions thermodynamiquement possible lorsque l'on met en présence différents réactifs ou solutions et de connaître les espèces prédominants une fois l'équilibre établis [5].

L'eau étant le solvant le plus répandu à la température ordinaire se décompose en dihydrogène et en dioxygène selon les deux demi-réactions :



Appliquant la loi de Nernst pour les réactions (6) et (7) lorsque la pression de l'oxygène et de l'hydrogène est égale à 1 atm on obtient :

$$E(11) = 1.230 - 0.059\text{pH}$$

$$E(12) = -0.059\text{pH}$$

$E(\text{V/ESH})$

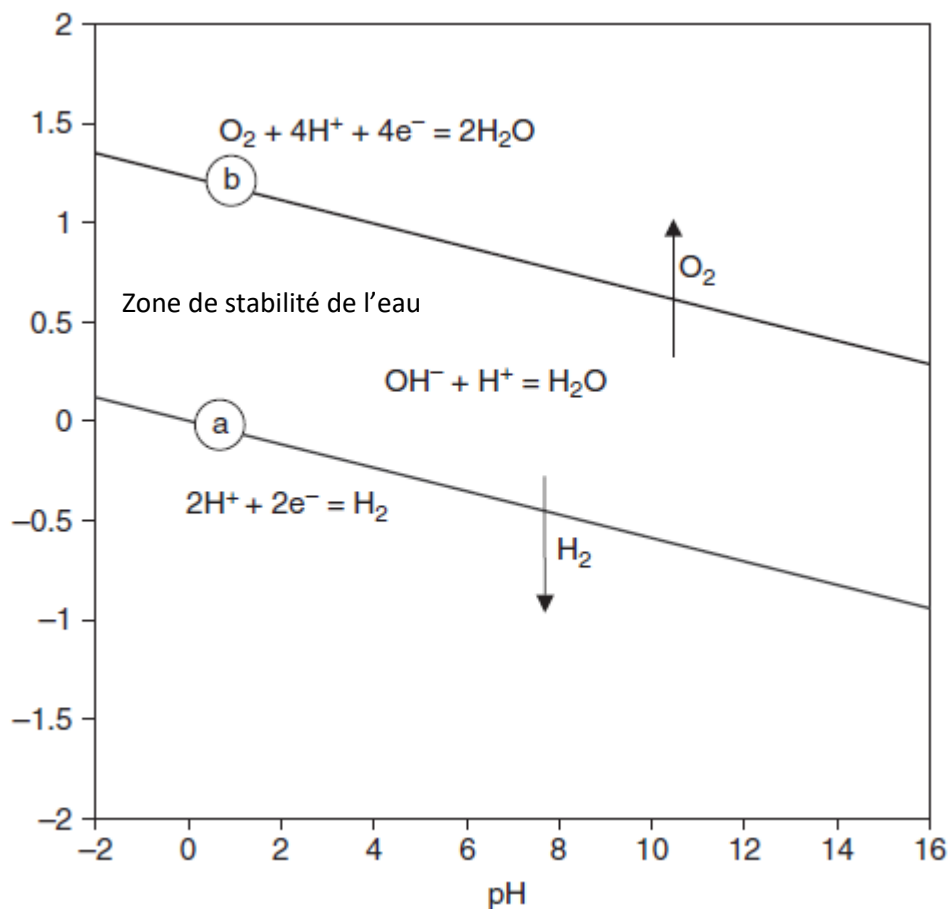


Figure 15 Diagramme de stabilité de l'eau [3]

## Chapitre II : Aspect thermodynamique de la corrosion

### II-8 Diagramme tension- $pH$ du fer

Les diagrammes de «MARCEL POURBAIX» aussi appelés diagrammes tension- $pH$  indiquent sur un plan  $E - pH$  les domaines d'existence ou de prédominance d'un élément, ils sont construits à partir de données thermodynamiques [4].

Domaine d'immunité : le métal est thermodynamiquement inattaquable en l'absence de courant extérieur. Cet état n'est observé en pratique que pour les métaux nobles (Or, Platine), pour le reste des métaux il faut abaisser leurs potentiels. C'est le principe de base de la protection cathodique.

Domaine de passivité : le métal est attaqué, il peut être protégé par la formation d'une couche protectrice d'oxyde ou d'hydroxyde.

Domaine de corrosion : le métal est attaqué, il se corrode.

La figure suivante représente le diagramme tension- $pH$  du fer on ne considérant que les corps solides  $Fe$ ,  $Fe_3O_4$ ,  $Fe_2O_3$  à  $25^\circ C$  [6] :

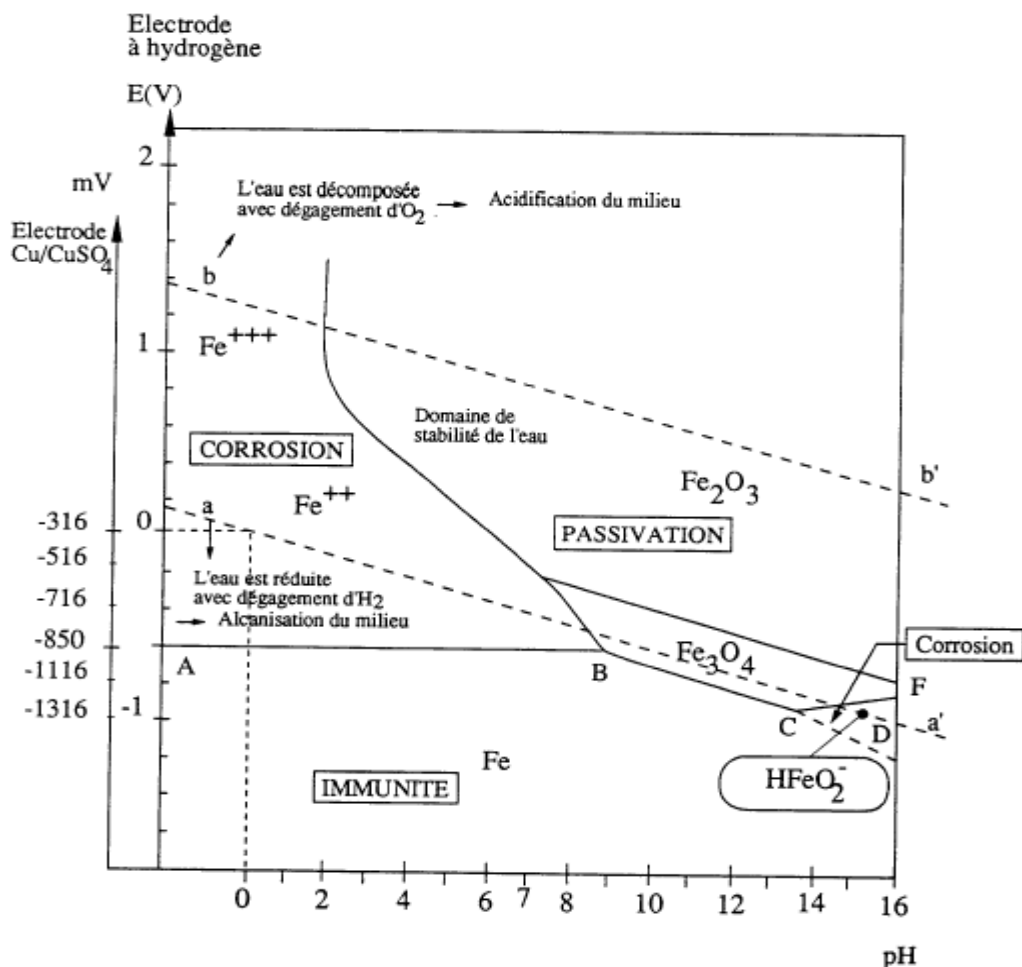


Figure 16 Diagramme tension- $pH$  du fer [6]



## **Chapitre II : Aspect thermodynamique de la corrosion**

Remarque : D'une manière générale il y a corrosion d'un métal par l'eau lorsque son domaine d'immunité n'a pas de partie commune avec le domaine de stabilité de l'eau dans le cas contraire il n'y a pas de corrosion.

# *Chapitre III*

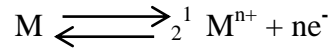
## *Aspect cinétique de la corrosion*

## Chapitre III : Aspect cinétique de la corrosion

### III-1 Processus électrochimiques développés sur une électrode en contact avec un électrolyte

#### III-1-1 Double couche à l'interface métal-électrolyte

Si on plonge un métal dans un électrolyte, les ions de son réseau métallique tendent à passer en solution ; ce passage s'effectue jusqu'à ce que la charge des électrons s'oppose à celles des ions positifs, il s'établit alors un équilibre réversible entre le métal, ses ions et ses électrons.



Les réactions 1 et 2 ont lieu simultanément, ce phénomène se traduit par la création à l'interface métal-solution d'une double couche électrochimique responsable de l'existence d'un potentiel du métal dans l'électrolyte.

#### III-1-2 Potentiel du métal dans l'électrolyte

Dans le cas où le métal est plongé dans un électrolyte normal d'un de ses ions, on peut, en utilisant les lois de la thermodynamique, calculer ce potentiel. Ce potentiel a une valeur déterminée pour un métal donné et permet le classement des métaux suivant leur aptitude à s'ioniser. L'échelle de Nernst permet ainsi le classement des métaux selon leur noblesse.

Un métal noble s'ionise peu, car il existe des forces de cohésion importantes entre les atomes.

Plus son potentiel est élevé, plus le métal considéré est noble.

L'or, le platine, dont les potentiels normaux d'oxydoréduction sont les plus élevés, sont très nobles, donc peu corrodables, le magnésium est l'un des métaux les plus vils.

#### III-1-3 Processus de la corrosion

Si nous faisons passer un courant dans cette électrode métallique à l'aide d'une source extérieure et une électrode auxiliaire (contre électrode) qui sert à assurer le passage du courant ; selon le sens du courant l'électrode métallique fonctionne en anode ou en cathode.

Le sens métal-solution est le déplacement de l'équilibre en favorisant l'oxydation, le processus de corrosion est établi.

On dit que le métal est polarisé et on peut tracer à l'aide d'un enregistreur la courbe de polarisation du métal  $E = f(i)$   $E$ : [V]  $i$ : [A/m<sup>2</sup>]

### Chapitre III : Aspect cinétique de la corrosion

#### Loi de faraday

La masse de métal déposée sur une cathode (courant passe de la solution vers le métal) ou consommée à l'anode ( $m$ ) est proportionnelle à l'intensité de courant traversant les électrodes et à la masse atomique du métal et inversement proportionnelle à sa valence [6].

$$m = \frac{M I t}{n F} \quad (13)$$

$M$  : Masse atomique de l'élément métallique en gramme par mole.

$I$  : Intensité de courant en ampère.

$t$  : Temps en seconde.

$n$  : Valence du métal (Nombre d'électrons mis en jeu).

$F$  : Nombre de faraday.

#### III-2 Courant et potentiel de corrosion

On considère maintenant un métal ou un alliage quelconque plongé dans un électrolyte quelconque, il ne s'établit plus d'équilibre au sens thermodynamique et le potentiel pris par le métal n'est plus calculable. Ce potentiel appelé potentiel de corrosion (spontané ou naturel) reste néanmoins mesurable par rapport à une électrode de référence à l'aide d'un millivoltmètre.

Le processus de corrosion se traduit par deux réactions l'une d'oxydation avec un courant anodique l'autre de réduction avec un courant cathodique égal en valeur absolu au courant anodique, ces deux réactions s'effectuent avec des vitesses égales et opposées.

On parle ici du courant de corrosion qui permet de déterminer par la loi de Faraday la quantité de métal dissoute (réaction anodique).

Le tableau suivant représente les équivalents électrochimiques (consommations) de quelques métaux usuels :

Métal	Consommation (kg/A.an)
Fer	10
Cuivre	10.4
Zinc	10.7
Plomb	34

**Tableau 2** Consommation de quelques métaux usuels [6]

## **Chapitre III : Aspect cinétique de la corrosion**

### **III-3 Facteurs agissant sur la corrosion des ouvrages métalliques enterrés**

Nous venons d'établir les principes fondamentaux de la corrosion des métaux, en montrant qu'elle résultait de la destruction de l'équilibre métal-solution. Examinant maintenant ce que deviennent les circonstances de destruction de l'équilibre lorsque l'on a affaire dans la pratique à une canalisation de transport d'hydrocarbure et un électrolyte qui est le sol.

#### **III-3-1 Le sol comme électrolyte**

Le sol est un amalgame complexe de solide, liquide et gaz qui font qu'il est parfois agressif, ce qui conduit à des corrosions extrêmement rapides, mais qu'il est, dans certain cas, parfaitement inerte et n'a qu'une action tout à fait négligeable.

##### **III-3-1-1 Propriétés physiques des sols**

Le sol contient de grandes quantités de minéraux différents de granulométrie variable selon leur provenance. Les sables contiennent des particules pouvant atteindre 2 mm, les particules constitutives de l'argile n'ont que quelques microns de diamètre.

Les sols contiennent de l'eau :

- Une eau libre amenée par les mouvements de la nappe phréatique à profondeur entre 1 à 100 m qui joue un rôle important pour les structures enterrées verticales comme les puits.

- Une eau libre qui s'infiltré depuis la surface du sol ; eaux pluviales, d'irrigation ou d'inondation.

- Une eau interstitielle qui migre par capillarité, dont la quantité dépend de la nature de la terre et fixe le taux d'humidité d'un sol.

Les sols contiennent des gaz :

A la profondeur des conduites, il y a presque toujours de l'air, donc de l'oxygène, beaucoup dans les sols sableux ou poreux, moins dans les sols compacts argileux.

##### **III-3-1-2 Propriétés chimiques des sols**

Elles sont mises en évidence par la mesure du pH. La plupart des sols ont un pH entre les valeurs 5 et 8.

Les sols contiennent des sels dissous à des concentrations de 100 à 1500 ppm.

La teneur en sel est fonction des précipitations. Des pluies abondantes lavent les terrains et leur salinité est faible. Dans les régions arides, au contraire, où l'eau remonte du sol pour s'évaporer, la concentration en sel peut devenir très importante.

### Chapitre III : Aspect cinétique de la corrosion

Les cations les plus réponsus, cause d'agressivité, sont les ions potassium, sodium, magnésium et calcium.

Les anions présents, chlorure et sulfates, augmente la conductibilité de l'électrolyte et facilite donc les transferts électriques causant les corrosions.

#### **III-3-1-3 Mesure de l'agressivité**

La mesure de l'agressivité du sol pour les métaux peut être déduite de la mesure de leur résistivité électrique. C'est le critère d'appréciation le plus fréquemment utilisé.

Le tableau suivant résume l'agressivité des sols par rapport à l'acier :

Nature du sol	Résistivité ( $\Omega.m$ )	Agressivité
Terrain argileux	<50	Agressif
Terrain salé		
Terrain agricole, limoneux, légèrement sableux	50 - 100	Moyennement agressif
Terrain pierreux, calcaire ou sable sec	>100	Peu agressif

**Tableau 3** Agressivité du sol par rapport à l'acier [6]

Si l'on s'intéresse à la résistivité de l'eau, on constate que l'eau de mer à une résistivité de 0,3  $\Omega.m$  ce qui en fait un électrolyte très conducteur et très agressif. Une eau douce, une eau de ville ainsi que des eaux de rivières chargées de limons, ont des résistivités de l'ordre de 25  $\Omega.m$ .

#### **III-3-2 Piles dues à l'électrolyte**

Ce sont des piles créées par l'hétérogénéité du sol qui engendre sur une structure métallique enterrée pourtant homogène, les différences de potentiel locales, provoque la naissance d'un courant qui conduit à la corrosion de la partie la plus électronégative du métal.

- Phénomènes d'aération différentielle : les zones moins aérées se corrodent facilement par rapport au reste de l'ouvrage, pour les conduites enterrées ce phénomène est responsable des corrosions situées sur la génératrice inférieure en fond de fouille, là où l'oxygène de l'air diffuse le moins.

### Chapitre III : Aspect cinétique de la corrosion

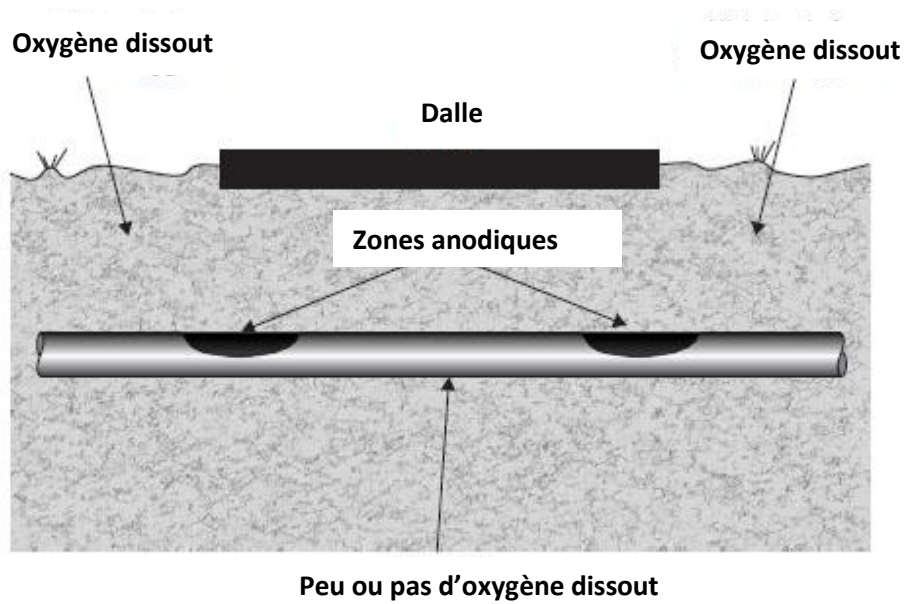


Figure 17 Corrosion par aération différentielle [3]

- Piles géologiques : ce phénomène est constaté sur les conduites enterrées traversant des sols de compositions différentes. En général les sols argileux, marécageux et les terrains humides constituent des zones anodiques vis à vis des autres terrains.

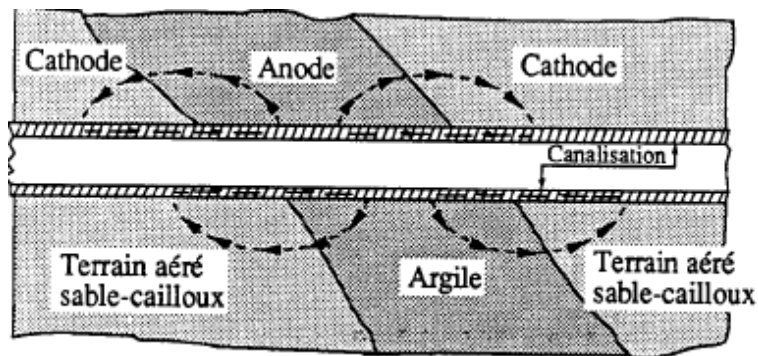


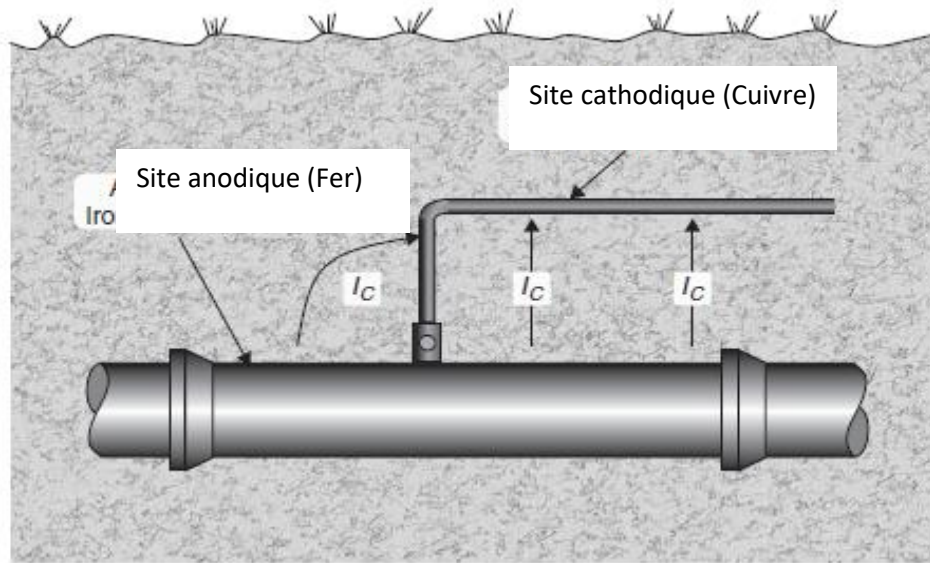
Figure 18 Corrosion par pile géologique [6]

#### III-3-3 Piles dues à l'association de métaux différents (Couplage galvanique)

Comme règle générale, si on met deux métaux différents dans un même électrolyte, celui qui a le potentiel le bas s'oxyde. Il est donc possible de prévoir le sens des réactions galvaniques en mesurant et en comparant les potentiels des métaux. En se rapportant au classement établi précédemment (Tableau-1-).

### Chapitre III : Aspect cinétique de la corrosion

La liaison électrique entre une conduite en acier et autre en métal différent, entraîne une corrosion, le cas du cuivre comme exemple provoque la corrosion de la conduite en acier.



**Figure 19** Corrosion par couplage galvanique [3]



## Chapitre III : Aspect cinétique de la corrosion

### III-3-4 Corrosion bactérienne

En milieu anaérobie, eaux stagnantes, terrains argileux, vaseux imperméables et riches en sulfates, certaines bactéries consomment l'hydrogène produit aux niveaux des microcathodes, permettant ainsi à la corrosion de se poursuivre, et transformant les sulfates en sulfures de fer.

### III-3-5 Corrosion par les courants vagabonds

Les lignes de transport à traction électrique sous courant continu (trains, tramways, métro), propagent dans le sol des courants importants dits vagabonds, en effet le courant amené par la caténaire retourne à travers le rail de roulement à la sous station émettrice. Ce rail plus ou moins isolé du sol, laisse s'échapper une partie importante du courant qui peut alors emprunter, sur des parcours de dizaines de kilomètres, des circuits peu résistants électriquement, tels que les conduites de transport avant de regagner le rail et le générateur à proximité de la sous-station.

A l'endroit des sorties de courant il va y avoir des corrosions inévitables sur la conduite.

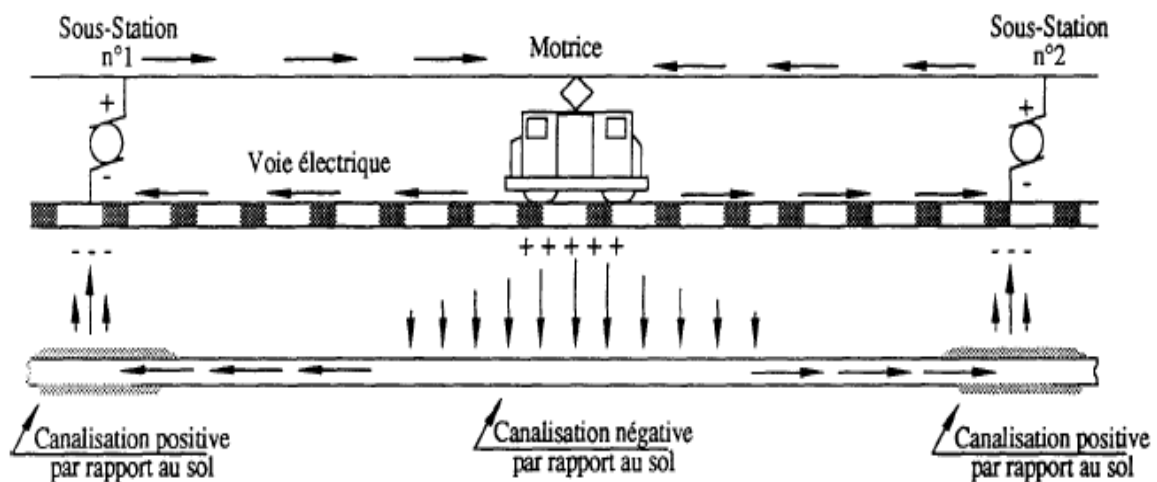


Figure 20 Corrosion par courant vagabond [6]

## *Chapitre IV*

# *Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés*

## Chapitre IV : Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés

Dans ce chapitre se focalise sur la protection cathodique comme moyen de lutte contre la corrosion des ouvrages enterrés en particulier les conduites de transport d'hydrocarbure.

### **IV-1 Principe de la protection cathodique**

A partir de ce qui a été mentionné ci-avant, on peut imaginer la possibilité de créer la circulation du courant dans le sens électrolyte (sol)-métal (conduite), et de favoriser ainsi la réaction cathodique au niveau de ce métal que l'on veut protéger, en reportant la réaction anodique sur un autre matériau, dont on accepte à priori la dégradation [6]. C'est le principe de la protection cathodique.

Il existe deux façons de réaliser cette protection soit par anode sacrificielle ou par courant imposé qu'on va les détaillées ci-après.

### **IV-2 La protection passive**

La protection cathodique des ouvrages enterrés est systématiquement utilisée dans un système duplex qui associe une protection passive (revêtement) et une protection active (anode sacrificielle ou courant imposé), la protection cathodique n'entre en fonction que s'il y a un défaut de revêtement et une partie de métal est en contact direct de l'électrolyte (sol ou eau) [4].

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

1. Offrir une protection supplémentaire contre la corrosion et d'une façon passive.
2. Aider la protection cathodique dans les rôles suivant :
  - Limiter le courant consommé ;
  - Réduire la consommation de la structure anodique ;
  - Assurer une polarisation plus rapide ;
  - Assurer une portée de la protection cathodique dans les structures complexes ;
  - Assurer une meilleure répartition du courant dans la structure à protéger ;
  - Réduire le coût global de protection cathodique.

#### **Type de revêtement**

On distingue trois grandes catégories de revêtements pour les conduites de transport [6] :

- Revêtement à base de produits hydrocarbonés ;
- Revêtements thermoplastiques ;
- Revêtement à base de produits thermodurcissable.

## Chapitre IV : Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés

La protection passive consiste aussi à isoler l'ouvrage à protéger des autres métaux qui pourraient amener des couplages galvanique, et des structures étrangères enterrées et de le délimité cathodiquement par l'utilisation des joints isolants.

### IV-3 La protection active

#### IV-3-1 Protection par anodes sacrificielles

Elle a pour but de mettre à profit l'effet du couple galvanique (pile) créée par l'association dans un même électrolyte (sol, eau) de deux métaux différents [6], le métal à protéger (cathode) connecté à un métal moins noble c'est-à-dire son potentiel dans l'électrolyte est plus négatif (anode), ce métal moins noble va se dissoudre par oxydation en émettant dans l'électrolyte un courant qui viendra abaisser le potentiel du métal et le protège contre la corrosion.

Le seuil de protection de l'acier est de  $-850\text{mV}$  par rapport à une électrode de référence au cuivre-sulfate de cuivre saturé ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ).

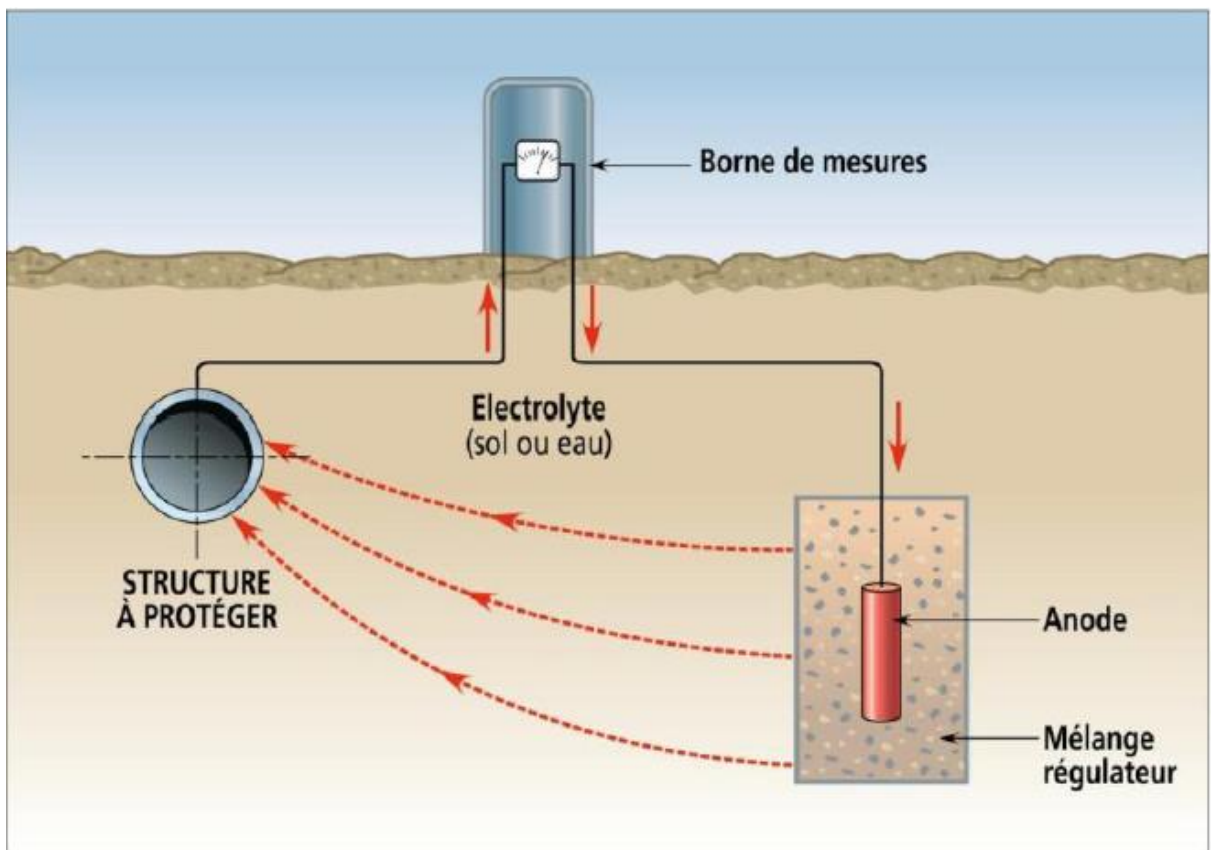


Figure 21 Protection cathodique par anode sacrificielle [7]

## Chapitre IV : Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés

### \* Différents types d'anodes sacrificielles

On utilise pour la protection cathodique de l'acier des anodes à base de zinc, d'aluminium ou de magnésium, leurs caractéristiques sont mentionnées dans le tableau suivant :

Type anode Caractéristiques	Anode à base de zinc	Anode à base d'aluminium à l'indium	Anode à base de magnésium
<b>Potentien charge (V)</b>	-1 à -1,05 en eau de mer -1,10 à terre	-1,05	-1,4 à -1,5 (type standard) -1,6 à -1,7 (type haut potentiel)
<b>Capacité pratique (Ah/kg)</b>	780 en eau de mer 740 à terre	2600	1100 (type standard) 1230 (type HP)
<b>Consommation pratique (kg/A.an)</b>	11,2 en eau de mer 11,9 en terre	3,4	6,5 à 8
<b>Rendement électrochimique (%)</b>	95 en eau de mer 90 à terre	87	55

**Tableau 4** Caractéristique des anodes sacrificielles [4]

## Chapitre IV : Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés

### \* Domaine d'application

<b>Anode à base de zinc</b>	<b>Anode à base d'aluminium à l'indium</b>	<b>Anode à base de magnésium</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Conduites enterrées de faible longueur</li><li>▪ Ouvrages immergés</li><li>▪ Capacités métalliques (intérieur ou extérieur)</li><li>▪ Réservoirs sous talus</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Plates-formes offshore</li><li>▪ Conduite offshore chaude</li><li>▪ Capacité métalliques (intérieur)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Conduites enterrées sur de faibles longueurs</li><li>▪ Conduites offshore sur plusieurs Km à partir des plates-formes</li><li>▪ Pré polarisation d'ouvrages offshore permettant de réduire la quantité d'anodes d'aluminium devant prendre le Relais</li><li>▪ Réservoirs sous talus</li></ul>

**Tableau 5** Domaines d'application des anodes sacrificielles [4]

## Chapitre IV : Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés

### \* Avantages des anodes

Anode à base de zinc	Anode à base d'aluminium à l'indium	Anode à base de magnésium
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Potentiel bien adapté à la protection des structures compactes en eau de mer</li> <li>▪ Comportement sûr dans les conditions diverses de fonctionnement (sol, eau de mer, vase, milieux confinés)</li> <li>▪ Excellent rendement</li> <li>▪ Peu sensibles aux salissures Marines</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Coût de l'A/an le plus faible (forte capacité pratique)</li> <li>▪ Potentiel bien adapté à la protection des structures complexes en eau de mer</li> <li>▪ Utilisation possible dans les citernes des tankers (pas d'étincelle en cas de chute)</li> <li>▪ Reste active aux températures élevées avec toutefois une chute du rendement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Portée élevée (fort potentiel)</li> <li>▪ Polarisation rapide de la structure (précipitation du dépôt calco-magnésien en eau de mer)</li> <li>▪ Faible poids spécifique</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Portée limitée (faible potentiel)</li> <li>▪ Température d'utilisation limitée à 60 °C</li> <li>▪ Coût A/an</li> <li>▪ Poids spécifique élevé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Moins adaptée dans les milieux faiblement renouvelés (chute de rendement en cas d'acidification du milieu)</li> <li>▪ Vulnérable aux salissures marines</li> <li>▪ Déconseillé pour la protection des ouvrages entièrement peints car il y a risque de passivation si l'anode n'est que faiblement sollicitée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Force électromotrice parfois surabondante pour la protection en eau salée (surconsommation, risque de cloquage de la peinture)</li> <li>▪ Faible durée de vie (remplacement fréquents nécessaires)</li> <li>▪ Rendement médiocre en eau de mer</li> <li>▪ Coût de l'A/an le plus élevé</li> </ul>

**Tableau 6** Avantages et inconvénient des anodes sacrificielles [4]

## Chapitre IV : Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés

### IV-3-2 Protection par courant imposé

#### \* Principe

La protection cathodique par courant imposé (par soutirage de courant) utilise une source d'énergie électrique en courant continu qui débite dans un circuit comprenant [4]:

- Un déversoir (masse anodique) ;
- L'électrolyte (sol ou eau) ;
- Structure à protéger (conduite de transport).

Le pôle positif de la source d'énergie est relié au déversoir alors que le pôle négatif est relié à la conduite, le courant venant du déversoir traverse l'électrolyte, puis entre dans la conduite créant ainsi un abaissement de potentiel recherché correspondant à l'immunité de métal qui est l'acier.

Un potentiel inférieur à  $-850 \text{ mV/Cu/CuSO}_4$  en tout point de la conduite est suffisant pour atteindre l'immunité du métal, en général et pour tenir compte de tout type de sol (présence de bactérie) la valeur limite que doit chercher est d'environ  $-1000 \text{ mV/Cu/CuSO}_4$ .

Le tableau suivant donne les domaines de potentiel généralement recommandés, pour différents métaux dans différents milieux :

Métal	Domaines de protection préconisés	
	Dans les sols Electrode (Cu/CuSO <sub>4</sub> )	En eau de mer Electrode (Ag/AgCl)
Acier et carbone		
1) environnement aérobie	<-085 V	<-080 V
2) environnement anaérobie	<-095 V	<-090 V
Alliage cuivreux	< -0,50 V à -0,65 V	< -0,45 V à -0,60 V
Aluminium	Entre -0,95 V et -1,20 V	Entre -0,90 V et -1,15 V
Plomb	Entre -0,60 V et -1,50 V	Entre -0,55 V et -1,45 V

**Tableau 7** Domaines de potentiels de protection préconisés [4]



## Chapitre IV : Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés

### \* Domaines d'application

La protection cathodique par courant imposé s'emploie chaque fois que l'intensité nécessaire à la protection est importante ou que la portée demandée est élevée :

- Conduites enterrées ou immergées, revêtues ou nues ;
- Casings de forage ;
- Structures marines importantes ;
- Réservoirs de stockage de grandes dimensions ;
- Ouvrages concentrés (station de pompage ou de compression ...).

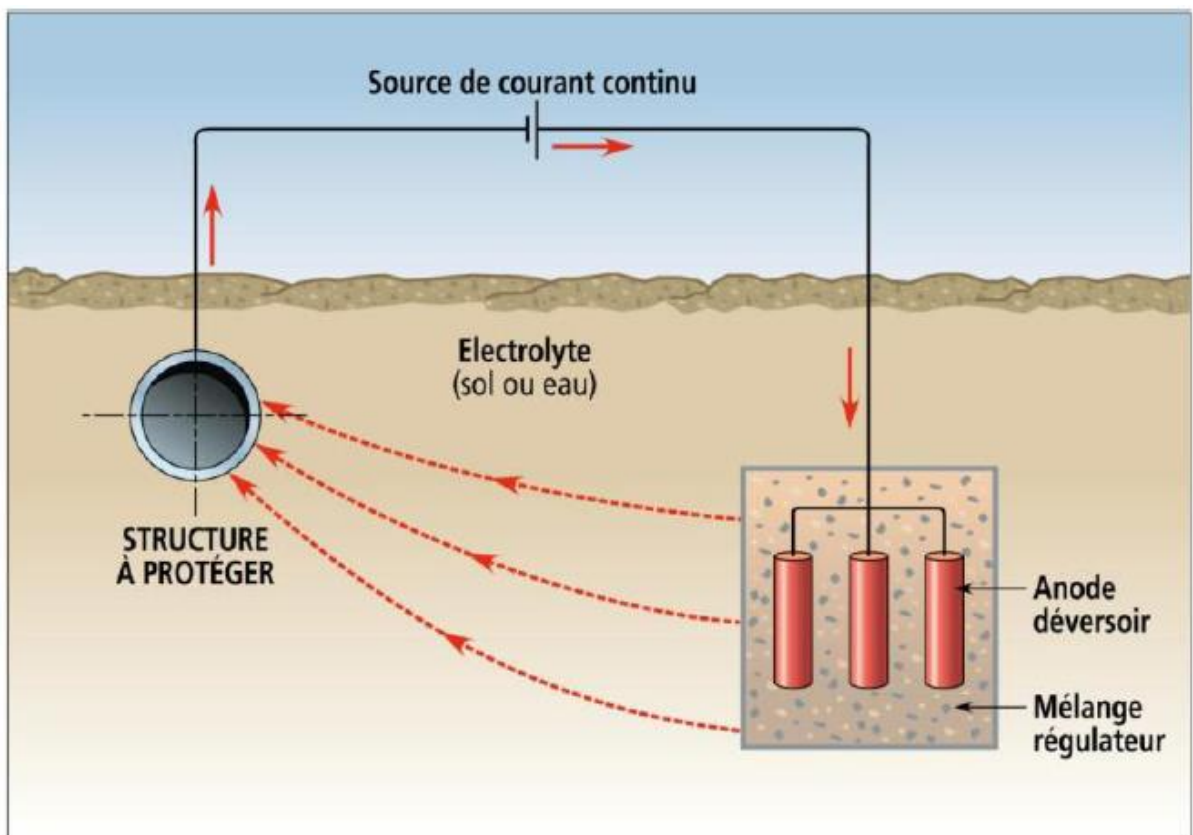


Figure 22 Protection cathodique par courant imposé [7]

## Chapitre IV : Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés

### IV-4 Réalisation pratique d'un système de protection cathodique par courant imposé

#### IV-4-1 Réalisation d'un poste de protection cathodique

En pratique un poste de protection cathodique par courant imposé comprend :

##### a) Source d'énergie à courant continu

Habituellement on utilise des transformateurs-redresseurs alimentés à partir du réseau électrique de « Sonelgaz », ils sont dotés d'un système pour le réglage de la tension et du courant de sortie, d'indicateurs pour le contrôle visuel de leur fonctionnement et de système de protection par fusible. Actuellement il existe des transformateurs-redresseurs télé gérables.

Dans certaines situations où l'énergie électrique n'est pas disponible, il est nécessaire d'avoir recours à d'autres sources d'énergie autonomes :

A- Energie solaire : il existe des installations de protection cathodique fonctionnant dans le sud avec panneaux de cellules solaires, délivrant des puissances modérées avec des batteries permettant une utilisation en continu.

B- Générateurs thermoélectriques : ces générateurs utilisent le principe de la conversion de l'énergie thermique en énergie électrique (principe du thermocouple) la source chaude est fournie par la combustion du gaz transporté, alors que la source froide est assurée par l'air ambiant. La puissance peut atteindre les 200 watt selon association des éléments du générateur (en série ou en parallèle).

Il arrive parfois d'utiliser des accumulateurs et piles pour des puissances faibles.

##### b) Déversoir

Le déversoir ou masse anodique sert à injecter un courant dans le sol, il doit être constitué de matériaux conducteur de courant, se comportant comme une anode, il est soumis aux phénomènes d'oxydation, le choix du type de matériau (anode) à installer dépend des conditions suivantes :

- Le milieu ;
- La consommation (durée de vie) ;
- La densité de courant admissible ;
- Le prix (fourniture et mise en œuvre).

##### b-1) Familles de l'anode constituante du déversoir

Ces anodes sont classées en trois grandes familles [8] :

- Consommables (produits ferreux, acier, fonte) ;

## Chapitre IV : Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés

- Peu consommables (graphite imprégné, ferro-silicium, ferro-silicium au chrome ou au molybdène, alliages au plomb et d'argent, magnétite) ;
  - Très peu consommables (titane platiné, niobium platiné, tantale platiné).

### **b-2) Caractéristiques de quelques types d'anodes utilisées**

#### **- Ferrailles (rails, tubes en acier, etc.)**

- Milieu : convient à tous les milieux.
- Consommation : 9 kg/A.an.
- Densité de courant admissible : pas limitée.
- Masse spécifique : 7,8 g/cm<sup>3</sup>.

L'utilisation du ferraille peut être intéressante, notamment lorsqu'elles sont déjà enterrées à proximité de la conduite à protéger.

Le prix de revient est notablement augmenté lorsque l'on doit transporter les rails ou les tubes, les raccorder par soudure et les enterrer.

#### **- Ferro-silicium**

- Milieu : convient à tous les milieux.
- Consommation : 0,3 kg/A.an.
- Densité de courant admissible : 0,2 A/dm<sup>2</sup>.
- Masse spécifique : 6,8 à 7 g/cm<sup>3</sup>.

Ces anodes sont de mise en œuvre plus facile du fait qu'elles peuvent être livrées prêtes à l'emploi. Dans le cas de milieu riche en chlorure, on utilise des anodes en Ferro-silicium additionnées de chrome et éventuellement au molybdène.



**Figure 23** Anode en Ferro-silicium chrome [9]

## Chapitre IV : Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés

### - Magnétite

- Milieu : convient à tous les milieux.
- Consommation : 0,01 kg/A.an.
- Densité de courant admissible : de l'ordre de 1,2 A/dm<sup>2</sup>.
- Masse spécifique : 5,2 g/cm<sup>3</sup>.

L'inconvénient de ces anodes réside dans leur fragilité lorsqu'elles sont exposées au soleil ou à une température élevée lors des travaux de pose.

### - Graphite

- Milieu : tous les milieux, sous réserve de la présence d'un mélange régulateur dont le rôle est de répartir la consommation sur toute la surface de l'anode.
- Consommation : 1 kg/A.an.
- Densité de courant admissible : 0,08 A/dm<sup>2</sup>.
- Masse spécifique : 1,6 g/cm<sup>3</sup>.

Ces anodes sont d'un emploi courant pour la protection des ouvrages enterrés. Leur prix relativement faible (fourniture et pose) en est la raison principale. Par contre, elles ne sont pas recommandées pour l'utilisation en eau de mer.



**Figure 24** Anode en graphite [9]

### - Titane platiné (épaisseur du platine 2,5 µm minimum)

- Milieu : eau de mer ou eau douce brassée, intérieur de réservoirs métalliques ou de conduites à usage alimentaire, etc.
- Consommation : 9 mg/A.an.
- Densité de courant admissible : 5 à 7 A/dm<sup>2</sup>.

## Chapitre IV : Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés

- Masse spécifique du Titane :  $4,5 \text{ g/cm}^3$ .

Ces anodes résistent parfaitement à l'immersion en eau salée ou douce. Par contre, elles n'admettent pas, en eau de mer, de potentiel supérieur à 7 V alors qu'on peut atteindre 15 à 20 V dans certaines eaux douces.



**Figure 25** Anode titane platiné [9]

### **- Niobium platiné (épaisseur du platine $2,5 \mu\text{m}$ minimum)**

- Milieu : eau de mer ou eau douce brassée.
- Consommation :  $9 \text{ mg/A.an}$ .
- Densité de courant admissible :  $10 \text{ A/dm}^2$ .
- Masse spécifique du Niobium :  $8,57 \text{ g/cm}^3$ .

Ces anodes ont une meilleure résistance mécanique que celles en Titane platiné. De plus elles peuvent admettre une tension de 30 V. Leur principal inconvénient est leur prix, qui est élevé.

### **-Tantale platiné (épaisseur du platine $2,5 \mu\text{m}$ minimum)**

- Milieu : eau de mer ou eau douce brassée.
- Consommation :  $9 \text{ mg/A.an}$ .
- Densité de courant admissible :  $20 \text{ A/dm}^2$ .
- Masse spécifique du Niobium :  $16,6 \text{ g/cm}^3$ .

Ce type d'anode, présente par rapport aux deux précédents l'avantage de supporter jusqu'à 110 V. L'inconvénient reste le prix très élevé.

Pour ces trois derniers types d'anode, la consommation ne concerne que le platine, l'autre métal sert uniquement de support.

## Chapitre IV : Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés

### **b-3) Choix de l'emplacement du déversoir**

-L'emplacement du déversoir est déterminé par une étude préalable (dimensionnement) du terrain et du tracé de la structure à protéger qui est la conduite.

-La distance entre le déversoir est la conduite ne doit pas être trop faible, un minimum de 50 m est conseillé pour les canalisations de transport.

-La résistivité du sol est mesurée par la méthode des quatre piquets (détail de la mesure dans la partie pratique de ce mémoire). Le choix se porte sur les endroits où la résistivité est la plus faible.

-La résistance du déversoir doit être la plus faible possible pour éviter les tensions plus élevées (sécurité du personnel et économie d'énergie). On admet comme très bonne une résistance de 1  $\Omega$ , une valeur de 2 à 3  $\Omega$  est très acceptable.

### **c) Câbles de liaison**

Ce sont des câbles suffisamment isolés au PVC ou autre matériau, Les sections des câbles utilisés sont déterminées en fonction de la chute de tension admissible et de l'échauffement.

Les câbles de mesure sont de section 16 mm<sup>2</sup> maximum ;

Les câbles de soutirage de courant et des déversoirs sont de section 25 mm<sup>2</sup> minimum.

### **d) Appareillages électrique auxiliaires**

Il s'agit essentiellement de :

-Appareils de coupure (marche/arrêt, interrupteur cyclique).

-Appareils de protection (disjoncteurs, fusibles, limiteurs de tension, etc.).

-Appareils de mesure (tension d'alimentation, intensité débitée, potentiel de la conduite à protéger, temps de fonctionnement etc.).

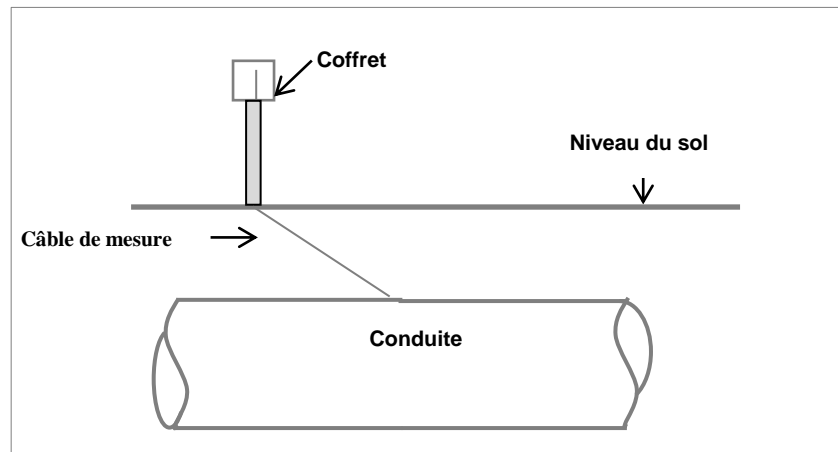
### **IV-4-2 Les différentes prises de mesure de potentiel installées le long de la conduite**

Les différentes prises de mesure pour le contrôle du niveau de la protection cathodique de la conduite sont :

#### **Prise de potentiel simple (PPS)**

Elle est équipée d'un coffret, comprend un câble soudé à la surface de la conduite. Chaque prise est installée à un intervalle de deux km au maximum et sert au contrôle du potentiel de protection cathodique de la conduite.

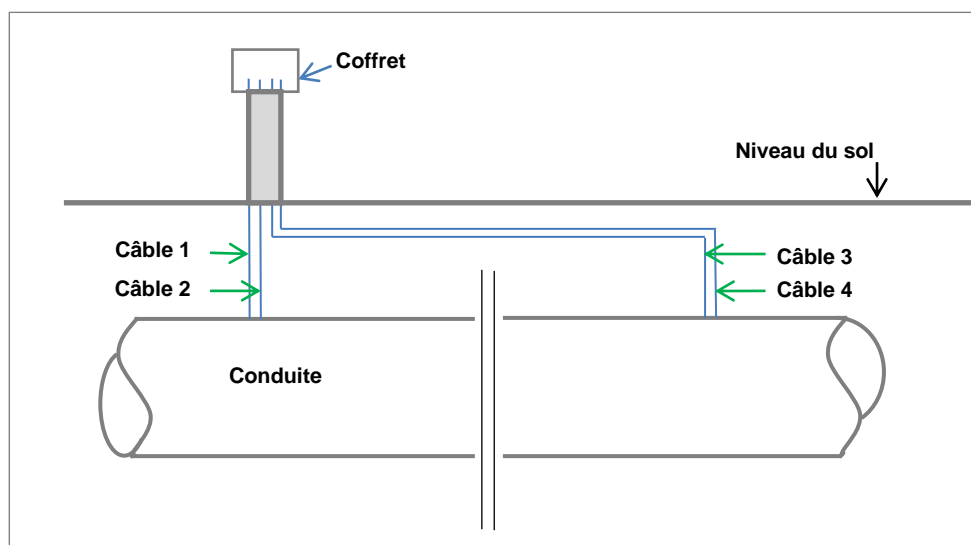
## Chapitre IV : Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés



**Figure 26** Prise de potentiel simple (PPS)

### **Prise de mesure de courant (PMC)**

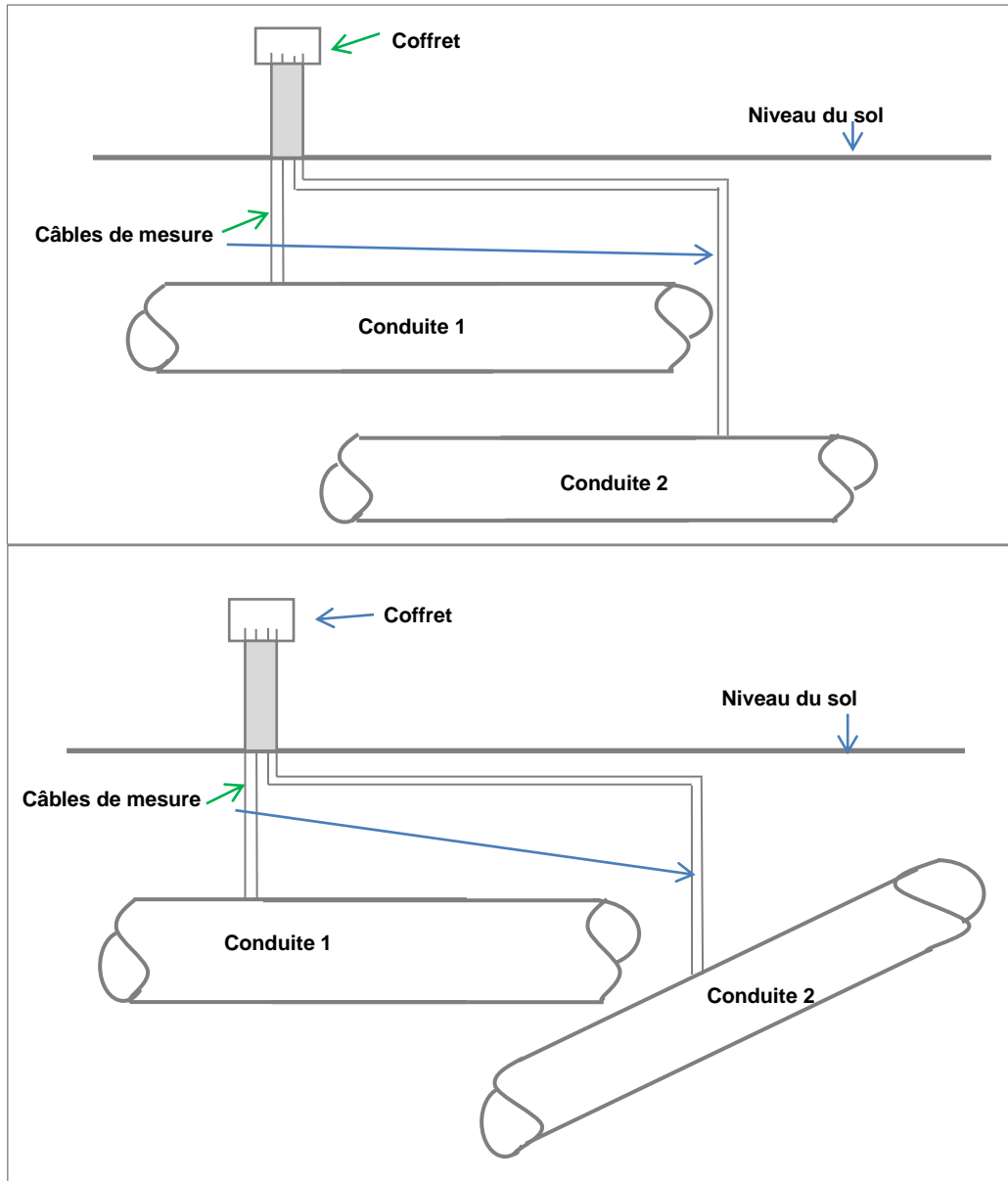
Elle est équipée d'un coffret à 4 voies qui reçoit 4 câbles soudés deux à deux à la conduite en deux points, ces prises sont installées à intervalles réguliers de 8 km et sont utilisés conjointement pour les mesures de potentiel et de courant.



**Figure 27** Prise de mesure de courant (PMC)

### **Prise équipotentielle (PEP)**

Elle est installée à intervalles réguliers de 6 km le long du parallélisme et à chaque croisement avec des structures étrangères afin de mesurer et réajuster les interférences induites. Elle se compose d'un coffret équipé de voies selon besoin.



**Figure 28** Prise équipotentielle (PEP) parallélisme et croisement

### **Prise de mesure et contrôle de joint isolant (PJI)**

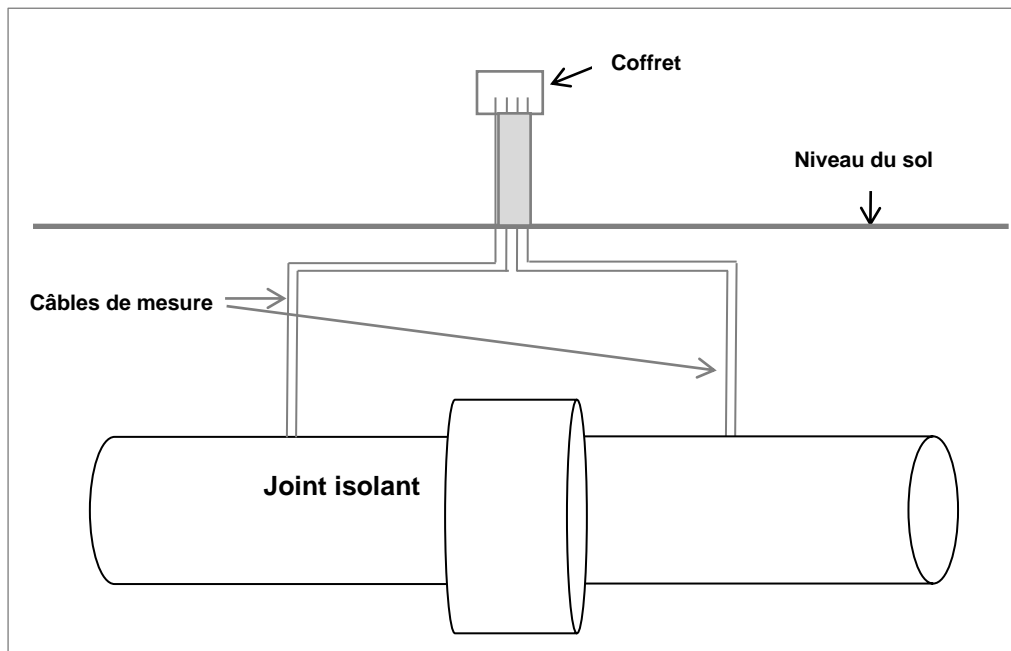
C'est une prise installée au niveau de chaque joint isolant pour mesurer le potentiel de la conduite de part et d'autre du joint et contrôler ainsi son efficacité.

Un joint isolant est installé pour séparer électriquement un tronçon existant à un nouveau tronçon, délimiter et séparer la conduite électriquement aux postes de coupure, station de pompage ou de compression et aux terminaux arrivée et départ. Etant donné que le dimensionnement ne concerne que la protection cathodique d'un ouvrage précis, et ne peut



## Chapitre IV : Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés

prendre en compte des structures annexes qui pour des raisons mécaniques, se trouveraient au contact électrique avec l'ouvrage en question.



**Figure 29** Prise de mesure et contrôle de joint isolant (PJI)

Différents types de joint (assemblage ou raccord) isolant

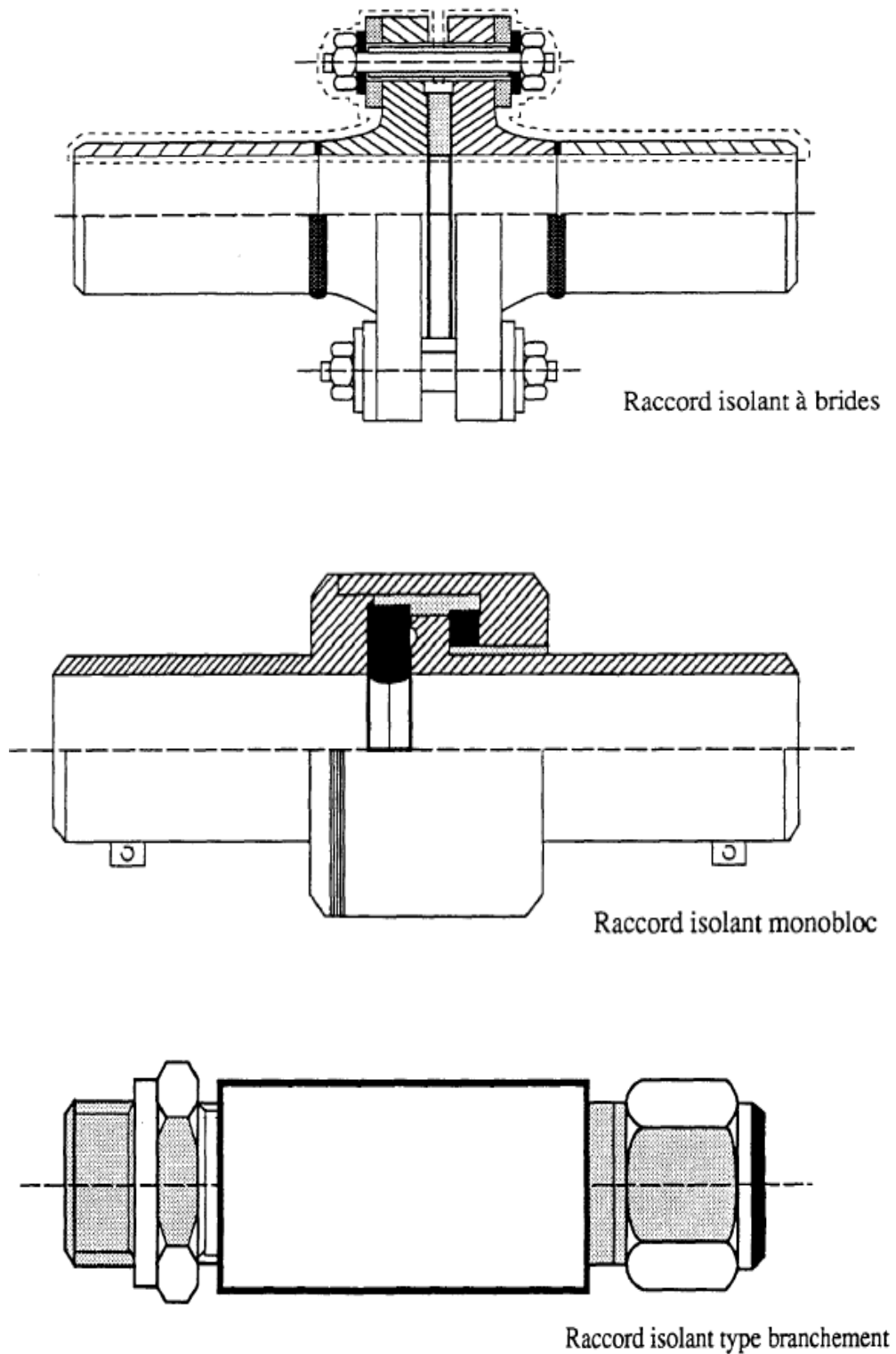


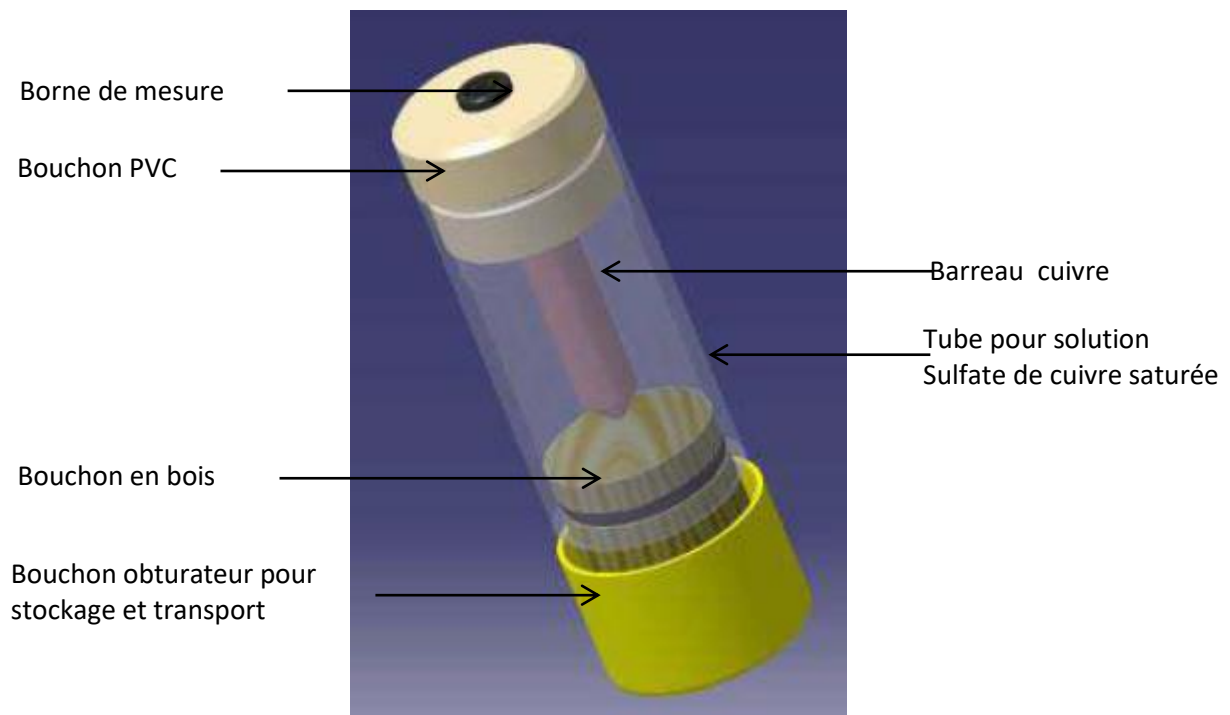
Figure 30 Types de raccords isolants [6]

## Chapitre IV : Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés

### IV-4-3 Mesure des potentiels de protection cathodique

Pour mesurer un potentiel, le technicien doit utiliser une électrode de référence, un multimètre et de l'eau pour humidifier le sol à la l'endroit de pose de l'électrode si nécessaire.

La figure 18 suivante représente une électrode de référence utilisée dans les mesures de potentiel en protection cathodique.



**Figure 31** Electrode de référence [9]

La mesure des potentiels se fait aux niveaux des prises de potentiel installées le long de la conduite citées au paragraphe IV-4-2. La conduite étant soumise à différents régimes électrochimiques, plusieurs potentiels peuvent être mesurés [6].

- Peu après la mise en fouille de la conduite, on mesure le potentiel spontané, initial ou naturel. Cette mesure permet de mettre en évidence la présence de piles géologiques ou autre influence électrique et de définir les zones anodiques de l'ouvrage.

-La protection cathodique étant en service, on mesure le potentiel dit à courant établi ou potentiel (ON), qui est le potentiel du métal sous application du courant de

## Chapitre IV : Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés

protection cathodique avec prise en compte de la chute ohmique ou chute de tension (gradient de potentiel).

-A la coupure du courant de protection cathodique, 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 du courant de protection dans le sol.

-Un certain temps après la coupure du courant de protection, on mesure le potentiel de polarisation du métal.

### Mesure du potentiel et position d'électrode (Gradient de potentiel)

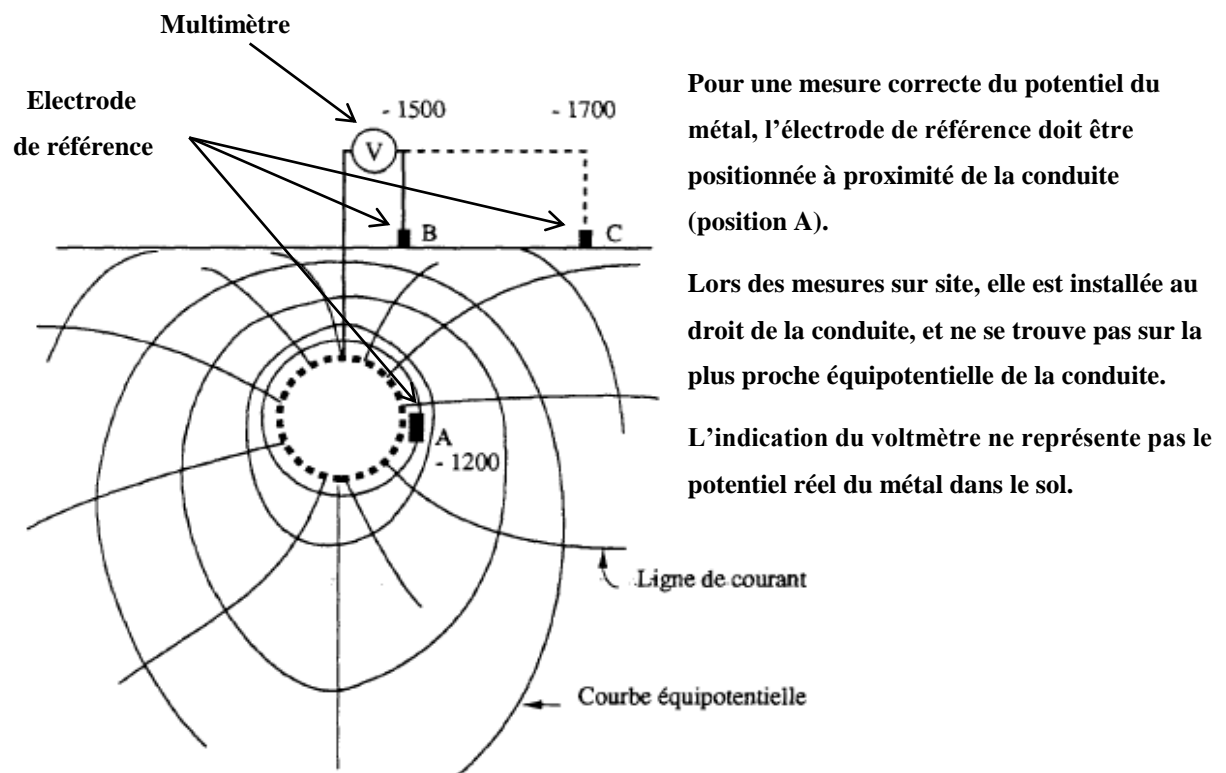


Figure 32 Valeurs de potentiel selon position d'électrode [6]

La différence de potentiel qui existe entre les points A et B est appelée gradient de potentiel. Ce gradient est dû à la circulation du courant à travers le sol et le revêtement qui présente une résistance électrique.

## Chapitre IV : Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés

### IV-4-4 Critères de protection cathodique

#### IV-4-4-1 Critère principale

D'après le diagramme de Pourbaix établi pour le fer (Diagramme tension-pH). Il apparaît dans ce diagramme un domaine d'immunité où le fer reste à l'état métallique parce qu'il se trouve dans des conditions où seules des réactions cathodiques peuvent se développer.

C'est le domaine de la protection cathodique ; on admet que toutes structures en acier enterrée dont le potentiel aura été rendu plus négatif que -850 mV par rapport à l'électrode de référence Cu/CuSO<sub>4</sub>, sera protégée cathodiquement.

#### IV-4-4-2 Critères secondaires

- Quel que soit le système utilisé pour fournir le courant de protection cathodique, l'efficacité de la protection dépend du potentiel atteint sur la surface du métal que l'on veut protéger. C'est la valeur du potentiel ainsi obtenu qui sert de critère pour estimer cette efficacité. Dans les milieux électrolytiques comme les sols et les eaux, une protection d'une conduite en acier au carbone est efficace si le potentiel réel (sans chute ohmique dans l'électrolyte entre la position de l'électrode de référence et la surface du métal) est inférieure ou égale à -850 mV/Cu/CuSO<sub>4</sub>, ce qui équivaut à -780 mV/Ag/AgCl en eau de mer (généralement arrondi à 800 mV).

- Dans certains cas, par exemple dans des milieux anaérobies (fort développement de bactéries sulfato-réductrices-BSR-), le potentiel doit être abaissé à -950 mV par rapport à une électrode Cu/CuSO<sub>4</sub> saturée, sans prise en compte de la chute ohmique ce qui équivaut à -880 mV (Arrondi à -900 mV) par rapport à une électrode Ag/AgCl en eau de mer.

- Dans les sols sableux très peu conducteurs, il est possible de se contenter de valeurs de potentiel moins négatives. La norme NF EN 12954 accepte -750 mV sans prise en compte de la chute ohmique à condition que la résistivité du sol se situe entre 100 et 1000 Ω.m et même -650 mV au-dessus de 1000 Ω.m.

- D'autres critères sont parfois retenus, le plus répandu est celui qui admet que la protection est considérée suffisamment efficace si le potentiel de la conduite à protéger est plus négatif de plus de 100 mV que son potentiel de corrosion. Ce potentiel est généralement mesuré en dépolarisation c'est-à-dire le potentiel de la conduite est mesuré aussi rapidement que possible après coupure du courant de protection cathodique (On s'affranchit ainsi de la chute ohmique), puis quelques heures après. La remontée du potentiel doit être de plus de 100 mV. Ce critère est un de ceux recommandés par les normes ou standards ISO 15589-1 ou NACE SP01-69. La méthode est illustrée par la figure suivante.

## Chapitre IV : Réalisation pratique de la protection cathodique des ouvrages enterrés

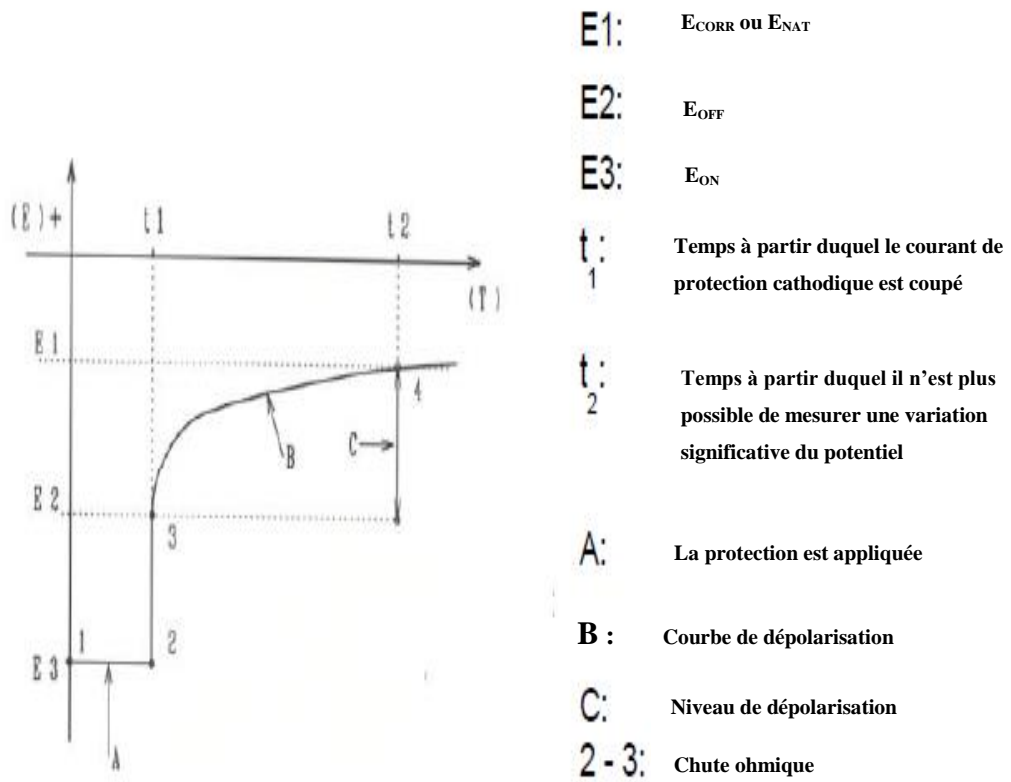


Figure 33 Application du critère 100 mV [7]

*Deuxième*

*partie*

# *Chapitre V*

## *Diagnostic de l'état de revêtement d'une conduite de transport d'hydrocarbure*



## Chapitre V : Diagnostic de l'état de revêtement d'une conduite de transport d'hydrocarbure

### V-1 Introduction

L'introduction des techniques de diagnostic se rapportant à l'état de revêtement des canalisations en exploitation, permettent de tendre vers une élimination des causes de corrosion bien avant l'apparition de leurs conséquences.

Et afin d'appliquer ces techniques et ceci dans le but de délimiter les zones qui présentent des défauts de revêtement, il s'avère nécessaire d'exploiter les prises de potentiel installées le long de l'ouvrage.

### V-2 Détermination du taux de dégradation d'un revêtement

Le procédé utilisé en pratique pour la détermination du taux de dégradation d'un revêtement se présente comme suit :

#### V-2-1 Mesure de la résistivité du sol entre les prises de mesure de courant (PMC)

La méthode la plus employée est celle de «Wenner» ou des quatre piquets, elle consiste à planter dans le sol quatre piquets sur la même ligne et à la même distance ( $a$ ) l'un de l'autre.

A l'aide d'un générateur, on fait passer un courant ( $I$ ) entre les deux piquets de l'extrémité, et on mesure la chute de tension ( $U$ ) produite entre les deux piquets intermédiaires.

#### Montage

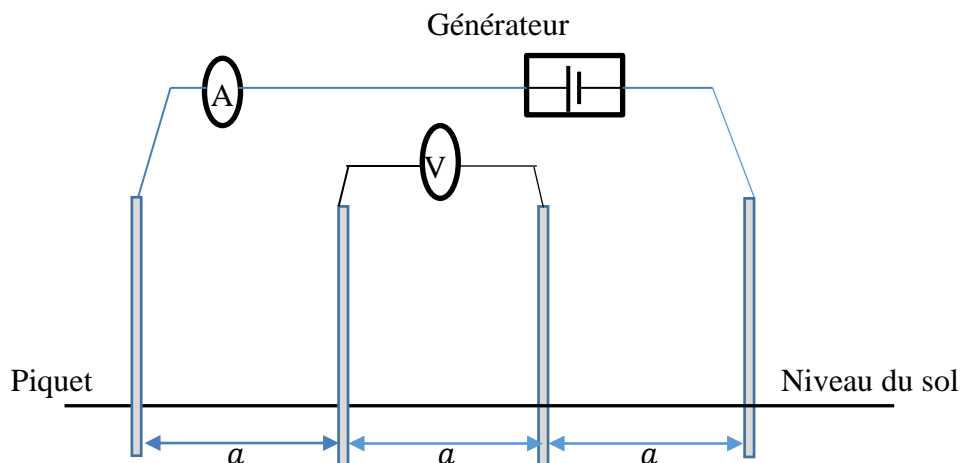


Figure 34 Schéma de principe de la méthode de Wenner

On procède ensuite au calcul de la résistivité du sol ( $\rho$ )

$$\rho = 2. \pi. R. a \quad [\Omega m] \quad (14)$$

## Chapitre V : Diagnostic de l'état de revêtement d'une conduite de transport d'hydrocarbure

Avec

$$R = U/I \quad [\Omega] \quad (15)$$

Cette formule n'est applicable que si les piquets utilisés ont un diamètre  $d < a/25$  et une profondeur d'enfoncement  $f < a/5$

Ce paramètre, qui est la résistivité servira pour l'étude et la recherche du comportement des différents types de revêtement dans différents types de sol.

### V-2-2 Détermination de la résistance caractéristique de chaque prise de mesure de courant (PMC)

- On mesure la chute de tension positive ( $\Delta U1$ ) entre les câbles intermédiaires (A et B) de la PMC.
- A l'aide d'une source extérieure de courant, on injecte entre les deux câbles (C et D) de la PMC un courant ( $I$ ) et on mesure la nouvelle chute de tension positive ( $\Delta U2$ ).

#### Montage

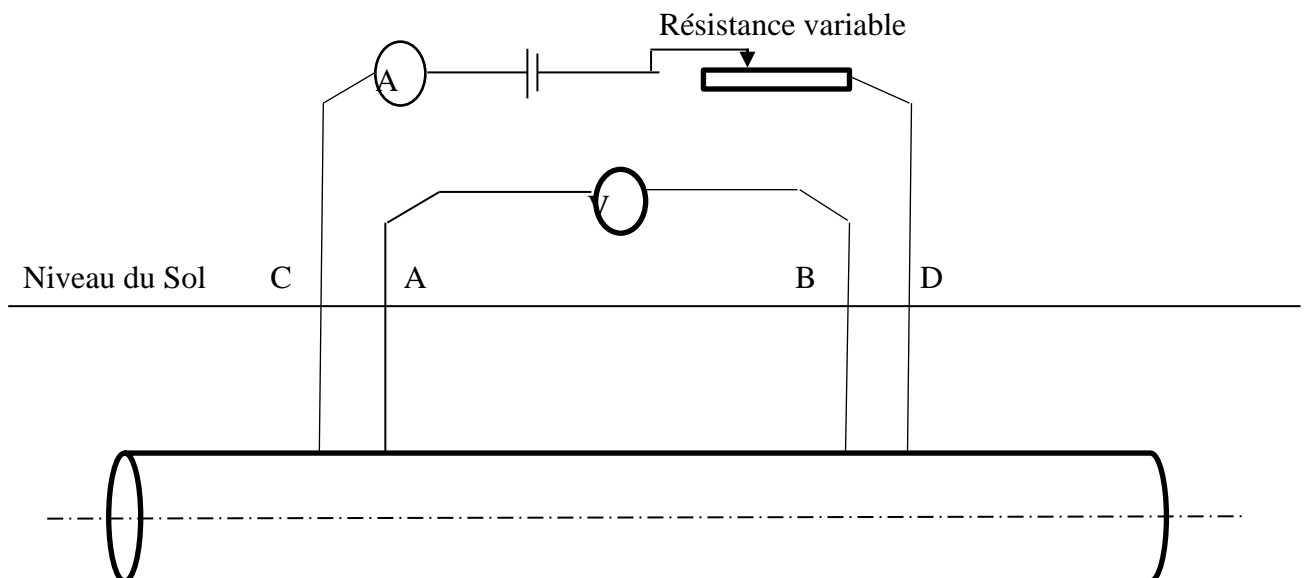


Figure 35 Schéma de principe mesure résistance caractéristique PMC

Selon la formule qui suit, on détermine la résistance voulue :

$$R = (\Delta U2 - \Delta U1) / I \quad (16)$$

**Chapitre V : Diagnostic de l'état de revêtement d'une conduite de transport d'hydrocarbure**

On procède de la même manière pour l'ensemble des PMC, les résultats obtenus seront mentionnés dans un tableau qui servira de référence.

N° PMC	1	2	.....	k
Résistance (mΩ)	R1	R2	.....	Rk

**Tableau 8** Résistance caractéristique des PMC

**V-2-3 Détermination du courant de protection de chaque tronçon compris entre deux PMC contiguës**

Le système de protection est en marche-arrêt (on/off), on commence par la première PMC à côté du soutirage et on mesure les deux chutes de tension  $\Delta U_{on1}$  et  $\Delta U_{off1}$  entre les câbles (A et B).

Connaissant la valeur  $R1$  de la PMC1, on calcul  $I1$  qui traverse cette PMC1 de la façon suivante :

$$I(1) = (\Delta U_{on1} - \Delta U_{off1}) / R1 \quad (17)$$

**Par analogie on calcul  $I(2), I(3), \dots, I(k)$**

Pour calculer le courant circulant dans le premier tronçon  $I(T1)$  (PMC1 et PMC2), on procède comme suit :

$$I(T1) = I(1) - I(2)$$

Ensuite

$$I(T2) = I(2) - I(3)$$

C'est le tronçon entre PMC2 et PMC3.

Jusqu'au tronçon final.

$$I(Tk - 1) = I(k - 1) - I(k) \quad (18)$$

Les courants consommés pour chaque tronçon seront mentionnés dans un tableau.

N° Tronçon	1	2	.....	k-1
Intensité de courant	$I(T1)$	$I(T2)$	.....	$I(Tk - 1)$

**Tableau 9** Courant de protection entre PMC contiguës

**Chapitre V : Diagnostic de l'état de revêtement d'une conduite de transport d'hydrocarbure**

**V-2-4 Relevé de potentiel on/off sur l'ensemble de l'ouvrage**

Pour évaluer la résistance d'isolement moyenne du revêtement, il nous faut des relevés de type on/off, les valeurs relevées le long de la conduite seront enregistrées.

<b><i>PK</i></b>	<b><i>X1</i></b>	<b><i>X2</i></b>	<b><i>X3</i></b>	<b><i>.....</i></b>	<b><i>X (k - 1)</i></b>
<b><i>U on</i></b>	<b><i>U on(1)</i></b>	<b><i>U on(2)</i></b>	<b><i>U on(3)</i></b>	<b><i>.....</i></b>	<b><i>U on (k-1)</i></b>
<b><i>U off</i></b>	<b><i>U off(1)</i></b>	<b><i>U off(2)</i></b>	<b><i>U off(3)</i></b>	<b><i>.....</i></b>	<b><i>U off (k - 1)</i></b>

**Tableau 10** Relevé de potentiel on/off

**V-2-5 Calcul de la résistance d'isolement moyenne de chaque tronçon**

Elle se calcule de la façon suivante :

$$\mathbf{Riso} = (\mathbf{Um} / \mathbf{I}) * \mathbf{S} \quad (19) \quad [\Omega.m^2]$$

**Um** [V] est la moyenne arithmétique de toutes les différences (Uon-Uoff) mesurées sur toutes les prises prévues le long du tronçon.

$$\mathbf{Um} = \sum_{n=1}^{n=k-1} (\mathbf{Uon} - \mathbf{Uoff}) / n \quad (20)$$

- n** Nombre de point de mesure.
- S** Surface extérieure totale du tronçon.
- I** Intensité de courant absorbée par le tronçon.

Pour chaque tronçon on calcule la résistance d'isolement moyenne.

Soit le tronçon (**k-1**) :

$$\mathbf{Riso(k - 1)} = \frac{\mathbf{Um(k-1)}}{\mathbf{I(k-1)}} * \mathbf{S(k - 1)} \quad (21)$$

Aussi le paramètre, qui est la résistance d'isolement servira pour l'étude et la recherche de l'estimation des valeurs d'isolement des différents types de revêtement dans différents types de sol pour les nouveaux projets.

**Chapitre V : Diagnostic de l'état de revêtement d'une conduite de transport d'hydrocarbure**

**Tableau des résultats**

N° tronçon	<b>1</b>	<b>2</b>	.....	<b>k - 1</b>
<b>Riso tronçon(Ω.m<sup>2</sup>)</b>	<i>Riso(1)</i>	<i>Riso(2)</i>	.....	<i>Riso(k - 1)</i>

**Tableau 11** Résistance d'isolement moyenne des tronçons

**V-3 Détermination du courant nécessaire pour polariser une plaque nue en acier au même potentiel off moyen obtenu sur chaque tronçon et comparaison de la densité de courant de la plaque à celle du tronçon**

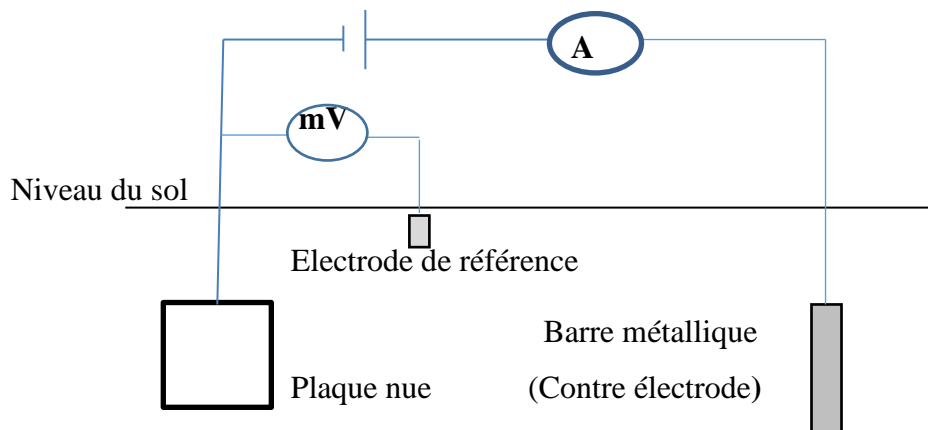
Pour ce faire, on utilise une plaque nue en acier de 1m<sup>2</sup> de surface ayant les mêmes caractéristiques que celles du métal de la conduite qui va jouer le rôle de l'électrode de travail et une barre métallique qui va servir de contre électrode.

On polarise la plaque nue jusqu'à l'obtention d'un potentiel égale à *U<sub>off</sub>* moyen obtenu sur le tronçon considéré.

On tire ensuite la valeur de l'intensité nécessaire du courant *I<sub>p</sub>*.

Le potentiel est mesuré par rapport à une électrode de référence Cu/CuSO<sub>4</sub>.

**Montage :**



**Figure 36** Schéma de principe mesure densité de courant de polarisation plaque

Etant donné que la surface de la plaque métallique nue (*S<sub>p</sub>*) égale à 1 m<sup>2</sup>, la densité de courant nécessaire pour la polariser sera (*J<sub>p</sub>*) :

$$J_p = I_p/S_p \quad [A/m^2] \quad (22)$$

Avec *I<sub>p</sub>* : le courant injecté.

**Chapitre V : Diagnostic de l'état de revêtement d'une conduite de transport d'hydrocarbure**

Connaissant les intensités de courant absorbées par chaque tronçon et leurs surfaces respectives, on peut déterminer les densités de courant ainsi que les rapports qui servent à la comparaison.

**Tableau des résultats**

N° tronçon	1	2	.....	k-1
<i>J</i> (tronçon)	<i>J</i> (T1)	<i>J</i> (T2)	.....	<i>J</i> ((Tk - 1)
<i>J</i> (plaque)	<i>J</i> (P1)	<i>J</i> (P2)	.....	<i>J</i> (Pk - 1)
<i>J</i> (tronçon)/ <i>J</i> (plaque)	<i>J</i> (T1)/ <i>J</i> (P1)	<i>J</i> (T2)/ <i>J</i> (P2)	.....	<i>J</i> (Tk - 1) / <i>J</i> (Pk - 1)

**Tableau 12** Rapport des intensités de courant

**V-4 Détermination du taux de surface nue de chaque tronçon**

Le taux de surface nue pour un tronçon quelconque (**k-1**) s'obtient par :

$$Tsn(k - 1) = \frac{J(Tk-1)}{J(Pk-1)} * 100 \quad (23)$$

N° tronçon	1	2	.....	k-1
Taux de surface nue(%)	<i>Tsn</i> (1)	<i>Tsn</i> (2)	.....	<i>Tsn</i> (k - 1)

**Tableau 13** Taux de surface nues

## Chapitre V : Diagnostic de l'état de revêtement d'une conduite de transport d'hydrocarbure

### **V-5 Aspect économique de la procédure**

A l'issue des résultats obtenus, nous allons nous intéresser aux tronçons dont la surface nue est importante, autrement dit les tronçons qui ont subi une dégradation de revêtement importante.

Ces tronçons vont subir selon besoin, l'une des méthodes (techniques) utilisées dans le domaine de la protection cathodique pour rechercher les défauts de revêtement et ensuite les éventuelles réparations, en l'occurrence :

- Technique d'atténuation des signaux qui utilise la détection de l'intensité du champ magnétique généré localement par une source de courant alternatif de fréquence réglable.

- Technique Pearson qui consiste à injecter un courant alternatif dans la conduite et à rechercher les gradients de potentiel ainsi créés dans le sol aux niveaux des défauts de revêtement.

- Technique des gradients de potentiel continu (DCVG) qui consiste à mesurer le long de la conduite en continu, la différence de potentiel à l'aide d'un voltmètre entre deux électrodes de mesure distantes de deux mètres environ (écartement des bras de l'opérateur) posées en parallèle de la conduite à la surface du sol. Cette différence de potentiel est générée dans le sol à cause de l'entrée du courant de protection cathodique au niveau d'un défaut de revêtement [10].

La réalisation de ces techniques coûte très chère pour une entreprise de transport d'hydrocarbure possédant un réseau important de pipelines (plusieurs centaines de kilomètre de conduites). La procédure de diagnostic de l'état de revêtement au préalable qui est détaillée ci-dessus permet de réduire considérablement le coût, tout en préservant l'ouvrage dans l'espace et dans le temps et ceci en commençant par les tronçons les plus vulnérable qui présentent une portion négligeable devant la longueur totale du réseau.

Remarque : Cette procédure est applicable pour tout type de revêtement de conduite de transport de fluide.

## Chapitre V : Diagnostic de l'état de revêtement d'une conduite de transport d'hydrocarbure

### V-6 Etude de cas

Pour bien maîtriser l'application de cette procédure, on propose des valeurs virtuelles proches des relevés pratiques sur terrain.

On considère une conduite en exploitation depuis plusieurs années de diamètre 24 pouce est de longueur 100 km sur laquelle sont installées des prises de potentiel tout type confondu, parmi lesquelles existe 12 prises de mesure de courant (PMC) installées le long de la conduite environ tous les huit kilomètres selon les **points kilométriques (PK)** suivants :

<b>PK (km)</b>	0	8.9	17.8	26.3	35	43.2	51.1	59.5	67.6	76	84.3	92.4	100
----------------	---	-----	------	------	----	------	------	------	------	----	------	------	-----

Cette répartition nous donne 12 tronçons à étudier selon le tableau suivant :

<b>N° tronçon</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Longueur (m)</b>	8900	8900	8500	8700	8200	7900	8400	8100	8400	8300	8100	7600
<b>Section (m<sup>2</sup>)</b>	17045	17045	16278	16661	15704	15129	16087	15512	16087	15895	15512	14555

Section :  $S = \pi . D . L$

**D**: Diamètre de la conduite en [m].

**L**: Longueur du tronçon [m].

V-2-1 les résistivités entre PMC sont :

<b>N° tronçon</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Longueur (m)</b>	8900	8900	8500	8700	8200	7900	8400	8100	8400	8300	8100	7600
<b>Section (m<sup>2</sup>)</b>	17045	17045	16278	16661	15704	15129	16087	15512	16087	15895	15512	14555
<b><math>\rho</math> (<math>\Omega.m</math>)</b>	15	20	22	16	35	15	10	25	50	30	28	26

**$\rho$** : Résistivité calculée selon les formules (14) et (15).

V-2-2 Les résistances caractéristiques de chaque PMC sont :

<b>PK (km)</b>	0	8.9	17.8	26.3	35	43.2	51.1	59.5	67.6	76	84.3	92.4	100
<b>R (m<math>\Omega</math>)</b>	0.15	0.19	0.16	0.2	0.18	0.16	0.21	0.18	0.19	0.16	0.14	0.16	0.15

**R**: Résistance caractéristique calculée selon la formule (16).

V-2-3 Les courants de protection de chaque tronçon compris entre deux PMC :

<b>N° tronçon</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>I (A)</b>	0,09	0,10	0,012	0,025	0,08	0,21	0,75	0,020	0,08	0,06	0,04	0,033



**Chapitre V : Diagnostic de l'état de revêtement d'une conduite de transport d'hydrocarbure**

*I*: Courant calculé selon les formules (17) et (18).

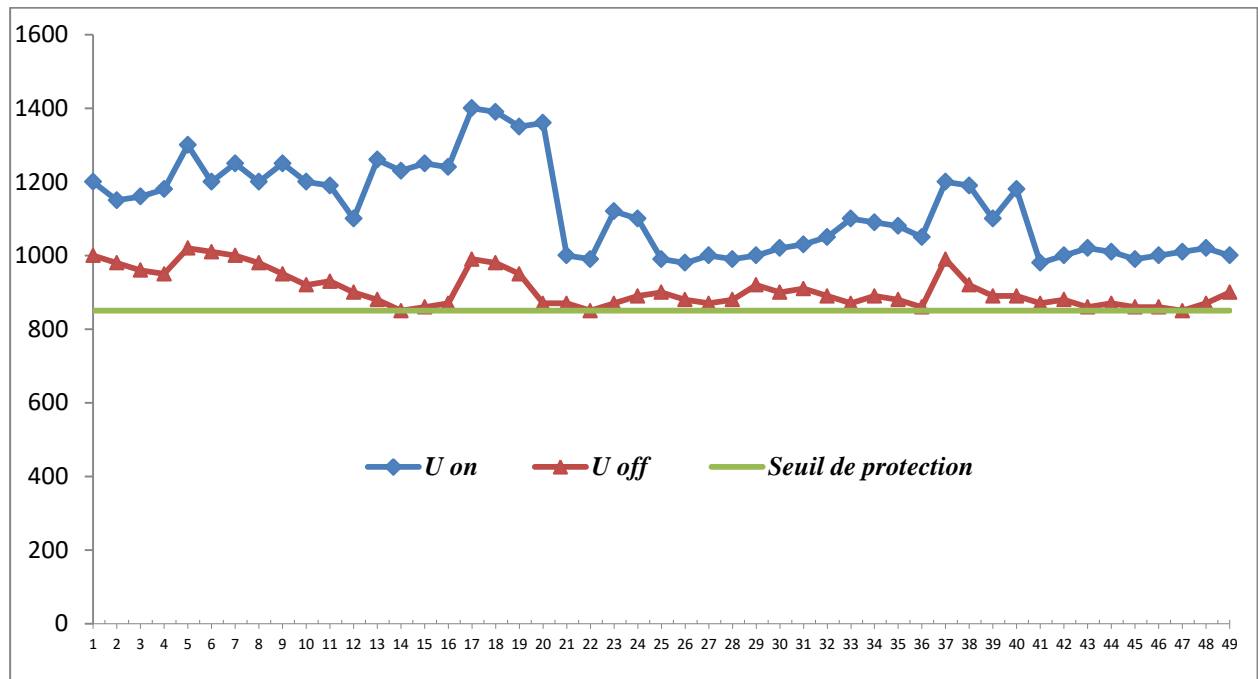
V-2-4 Relevés de potentiel on/off :

On suppose qu'il existe 49 point de mesure (prises de potentiels tous type confondu) le long de la conduite du PK0 au PK 100.

Le seuil de protection cathodique est de  $-850 \text{ mV}/(\text{Cu}/\text{CuSO}_4)$ .

<i>PK (km)</i>	0	8.9	17.8	26.3	35	43.2	51.1	59.5	67.6	76	84.3	92.4	100
<i>U on</i> (mV)	1200	1300	1250	1260	1400	1000	990	1000	1100	1200	980	990	1000
	1150	1200	1200	1230	1390	990	980	1020	1090	1190	1000	1000	
	1160	1250	1190	1250	1350	1120	1000	1030	1080	1100	1020	1010	
	1180	1200	1100	1240	1360	1100	990	1050	1050	1180	1010	1020	
<i>U off</i> (mV)	1000	1020	950	880	990	870	900	920	870	990	870	860	900
	980	1010	920	850	980	850	880	900	890	920	880	860	
	960	1000	930	860	950	870	870	910	880	890	860	850	
	950	980	900	870	870	890	880	890	860	890	870	870	

*U* (mV)



**PK**

**Figure 37** Courbes de potentiel on off

*U on* , *U off* Des mesures relevées à partir des prises de potentiel installées sur la conduite.

## Chapitre V : Diagnostic de l'état de revêtement d'une conduite de transport d'hydrocarbure

V-2-5 Résistances d'isolement de chaque tronçon :

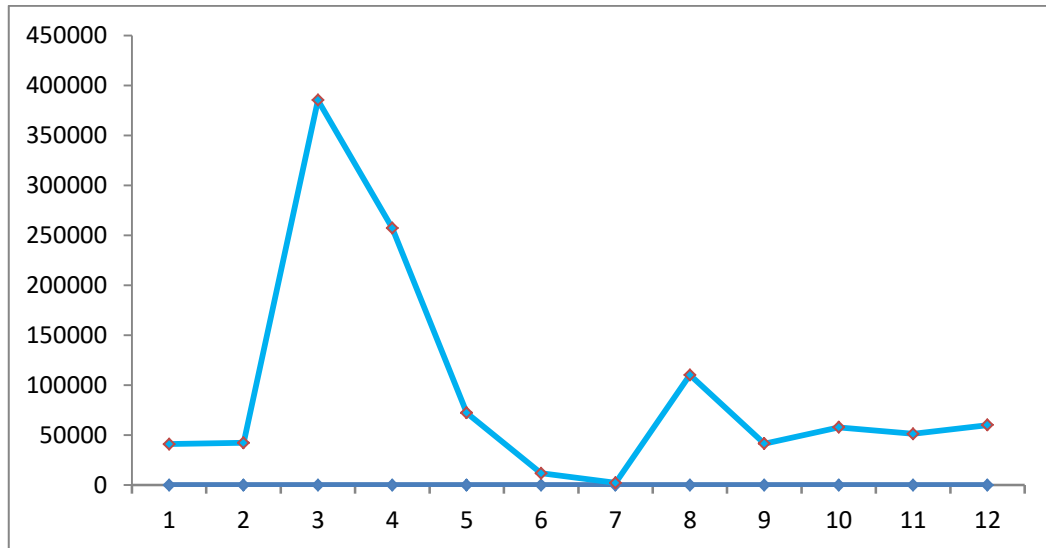
N° tronçon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>Um</i> (mV)	216	248	284	386	368	164	102	142	206	218	132	136
<i>S</i> (m <sup>2</sup> )	17045	17045	16278	16661	15704	15129	16087	15512	16087	15895	15512	14555
<i>I</i> (A)	0,09	0,10	0,012	0,025	0,08	0,21	0,75	0,020	0,08	0,06	0,04	0,033
<i>Riso</i> (Ω. m <sup>2</sup> )	40907	42270	385257	257254	72238	11815	2188	110138	41424	57753	51191	59984

Avec  $n = 5$  cinq points de mesure dans notre cas.

**Um:** Calculé selon la formule (20).

**Riso:** Calculé selon la formule (19).

**Riso (Ω. m<sup>2</sup>)**



N° tronçon

**Figure 38** Résistance d'isolement de chaque tronçon

V-3 Le courant nécessaire pour polariser une plaque nue :

On suppose que les courants nécessaires pour polariser la plaque nue (1m<sup>2</sup>) sont respectivement pour chaque tronçon.

N° tronçon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>I<sub>p</sub></i> (A)	60	65	80	50	55	60	60	80	70	70	60	60

## Chapitre V : Diagnostic de l'état de revêtement d'une conduite de transport d'hydrocarbure

Rapport des densités de courant :

N° tronçon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$J$ (tronçon) mA/m <sup>2</sup>	5.28E-03	5.86E-03	7.37E-03	1.5E-03	5.09E-03	13.88	46.62	1.28E-03	4.97E-03	3.77E-03	2.57E-03	2.26E-03
$J$ (plaque) mA/m <sup>2</sup>	60	65	80	50	55	60	60	80	70	70	60	60
$J$ (tronçon)/ $J$ (plaque)	8,66E-05	8,92E-05	9,12E-06	3E-05	9,25E-05	2,3E-04	7,76E-04	1,6E-05	7E-05	5,28E-05	4,28E-05	3,76E-05

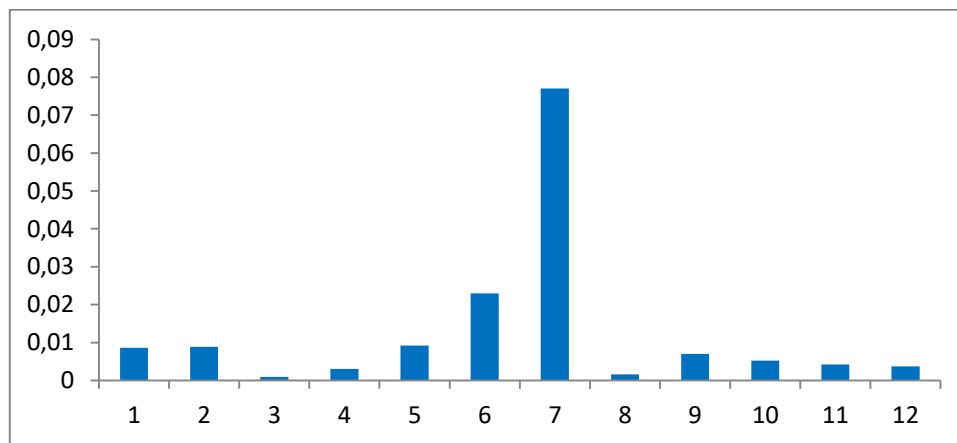
$$J \text{ (Tronçon)} = I / S$$

$$J \text{ (Plaque)} = Ip / 1 \quad \text{Surface de la plaque} = 1 \text{ m}^2.$$

V-4 les taux de surface nue de chaque tronçon :

N° tronçon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Taux de surface nue (Tsn) %	0.0086	0.0089	0.0009	0.003	0.0092	0.023	0.077	0.0016	0.007	0.0052	0.0042	0.0037

### Taux de surface nue



N° tronçon

**Figure 39** Taux de surface nue de chaque tronçon

### Interprétation des résultats

On remarque nettement que le sixième et le septième tronçon présentent des taux élevés de surface nue synonyme d'une importante dégradation au niveau du revêtement et par conséquent ils doivent être l'objet d'une étude par l'une des méthodes citées dans le paragraphe V-5 pour rechercher les défauts de revêtement et ensuite les éventuelles réparations.

## *Conclusion et perspectives*

## Conclusion et perspectives

### Conclusion et perspectives

Ce travail a été consacré à la protection cathodique comme moyen de lutte contre la corrosion des conduites enterrées de transport d'hydrocarbure, il est subdivisé en cinq chapitres. Les trois premiers portant sur la notion de corrosion et ses aspects thermodynamique et cinétique quant au quatrième chapitre, il traite la réalisation pratique de la protection cathodique, en détaillant la protection passive qui est le revêtement et les différents types utilisés et la protection active qui est présentée par la protection cathodique par anodes sacrificielles ou par courant imposé selon besoins, à noter que protection passive et active sont complémentaire.

Le sujet central abordé dans ce mémoire présenté dans le chapitre cinq a touché d'une manière facile et explicite le côté technique à partir duquel on peut se rendre à l'état de revêtement d'une canalisation de transport ainsi que le côté économique qui joue un rôle primordial dans le domaine de l'industrie des hydrocarbures.

En effet, cette procédure de diagnostic de l'état de revêtement peut se faire tous les cinq ans, et ce dans le cadre des campagnes on/off, elle permet aussi de :

- Contrôler le niveau de la protection cathodique le long de l'ouvrage ;
- Détecter les zones d'anomalie de potentiel ;
- Inspecter le corridor de l'ouvrage ;
- Inspecter les abris des postes de protection cathodique, les postes de purge, les postes de coupure, les postes de sectionnement ainsi que les terminaux.

En final, nous souhaitons que cette procédure de diagnostic de l'état de revêtement des canalisations de transport d'hydrocarbure soit appliquée dans la pratique pour des conduites protégées cathodiquement pour mieux se situer sur son efficacité et sa fiabilité.

# *Références bibliographiques*

## Références bibliographiques

### Références bibliographiques

- [1] Pierre Roberge - Handbook of Corrosion Engineering-McGraw-Hill Professional (1999) (1).
- [2] Control of pipeline corrosion second edition 2001 A.W.Peabody Edited by RONALD L. BIANCHETTI.
- [3] Pierre Roberge - Corrosion Engineering Principles and Practice-McGraw-Hill Professional (2008).
- [4] GIL\_protection\_cathodique\_V1\_1 janvier 2008.
- [5] Thermodynamique et cinétique électrochimique expérimentale B. Le Gorrec janvier 2005 1 page 264.
- [6] Corrosion et Protection Cathodique Révision : 2 de 1996 TRAN 96.2.
- [7] La\_protection\_cathodique-l\_essentiel cefracor 11 Mars 2015.
- [8] La protection cathodique Guide pratique édition technip 1986 paris.
- [9] Site web [www.sere-sa.fr](http://www.sere-sa.fr) catalogue-pc-fr.
- [10] pcra\_011\_-\_2016 technique d'investigation cefracor.
- [11] guide\_tech\_mes\_prot\_cath\_compl.
- [12] Manuel de la protection cathodique pipeline engineering.

## Résumé

L'intérêt de ce modeste travail vise à l'établissement d'une procédure dans l'industrie de pipeline, en particulier la protection cathodique contre la corrosion des canalisations de transport d'hydrocarbure, c'est une procédure simple et détaillée pour le diagnostic de l'état de revêtement des canalisations et englobe plusieurs techniques de mesure.

En effet, la formation et la recherche scientifique dans le domaine de la protection cathodique est très indispensable pour lutter contre la corrosion des pipelines et éviter les coûts y afférents.

**Mots clés:** pipeline, protection cathodique, corrosion.

## Abstract

This modest work is made in order to provide a simple and easy procedure to diagnosis the external pipeline coating that transport hydrocarbon product in the industry and specifically cathodic protection. The procedure is detailed with many measurement technics that can be applied by using simple materials.

Indeed, the cathodic protection is really important in pipeline transporting, that's why we should focus more on formations and scientific researches in this field, so we can avoid corrosion costs.

**Key words:** pipeline, cathodic protection, corrosion.

## ملخص

يهدف هذا العمل المتواضع الى شرح تشخيص حالة التغليف الواقي الخارجي لأنابيب نقل المحروقات في قطاع الصناعة و بالتحديد في مجال الحماية المهبطية بطريقة مبسطة و مفصلة و تشتمل على العديد من تقنيات القياس ، ويمكن تنفيذها باستخدام وسائل جد بسيطة من اجهزة القياس المستعملة في هذا الميدان.

إن الحماية المهبطية تكتسي أهمية بالغة في ميدان النقل عن طريق الأنابيب لذلك وجب التكوين الجيد و البحث العلمي المتواصلين في هذا المجال من اجل تفادي التكاليف الباهظة التي تترتب عن التآكل.

**الكلمات المفتاحية :** انابيب نقل المحروقات، الحماية المهبطية، التآكل.