

UNIVERSITE SAÂD DAHLEB DE BLIDA

Faculté des sciences de l'ingénieur  
Département de chimie industrielle

## MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Génie des procédés

### ÉTUDE, SIMULATION ET DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTÈME DE PROTECTION CATHODIQUE PAR COURANT IMPOSÉ D'UNE STRUCTURE ENTERRÉE DE PIPELINE

Par

**Mustapha DJAMA**

Devant le jury composé de :

M. Khalaf Hussein	Professeur, USD-Blida	Président
M. Hannani Ahmed	Maître de Conférences, USTHB-Alger	Examineur
M. Zergoug Mourad	Maître de Recherche, CSC-Chéraga	Examineur
M. Ouzzane Slim	Chargé de cours, USD-Blida	Invité
M. Khelifa Abdellah	Maître de Conférences, USD-Blida	Rapporteur

Blida, 03 Novembre 2008

## RÉSUMÉ

La longévité et la sécurité des pipelines dans l'industrie sont des éléments importants sinon vitaux pour le transport et la distribution des hydrocarbures. Baignant dans différents milieux corrosifs, ces pipelines se corrodent dans le temps, voire se dégradent totalement entraînant ainsi des pertes économiques très importantes. Ce phénomène de corrosion est derrière la défaillance de plus de 30% des réseaux pipeliniers [1]. A cet effet, deux méthodes couplées sont utilisées à savoir une protection passive par revêtements polymères et une protection active. Théoriquement celle-ci consiste à maintenir le potentiel du pipe jusqu'à la valeur de -0.850V (potentiel d'immunité) par rapport à l'électrode de référence (Cu/CuSO<sub>4</sub>) selon la NACE (National Association Corrosion Engineerings).

Il a été remarqué que lorsqu'une structure est soumise à une protection cathodique par courant imposé et dans le cas d'une mauvaise distribution du courant et du potentiel, celle-ci a pour inconvénient majeur d'entraîner un décollement du revêtement suite au phénomène de dégagement d'hydrogène et à la forte alcalinisation au niveau de l'interface polymère-métal. Cette distribution dépend essentiellement de l'optimisation des emplacements et des valeurs des résistances de terre (déversoirs anodiques).

Notre travail consiste à réaliser une interface de dimensionnement et de contrôle moyennant l'outil de programmation « MATLAB7 » avec laquelle une simulation interactive est possible. Cette simulation interagit avec plusieurs paramètres afin de varier la résistance de terre et l'adapter selon le besoin comme paramètre essentiel dans le dimensionnement, ceci permettra une interaction entre le besoin d'engineering et l'implantation du système de PC, ce mode interactif pourra être étendu à un monitoring en temps réel permettant ainsi d'éviter des catastrophes écologiques (déversement de produits) et économique (perte et arrêt de production) et surtout préserver des vies humaines.

## ABSTRACT

Longevity and pipeline safety in any industry are important if not vital in the transmission and distribution of hydrocarbons. Subject to various corrosive environments, these pipelines corrode over time; even degrade completely resulting in huge economic losses. This type of corrosion is behind the failure of more than 30% of pipeline networks.

For such reasons, manufacturers such as SONATRACH and SONELGAZ use two methods coupled namely passive protection by coating polymers and an active protection method known by using racking current. Theoretically which consists of maintaining the potential of pipe up the value of  $-0.850V$  (immunity potential) compared to the reference electrode ( $Cu/CuSO_4$ ) according to NACE.

It has been seen that when a structure is subjected to a cathodic protection by current, and in the case of a bad distribution of current and potential, this results in a major drawback which is the delamination of the coating response to the phenomenon hydrogen embrittlement and high alkalization at the interface polymère-métal. This distribution depends primarily on the optimization of locations and values of resistors earth (spillways anode).

Our work consists on the implementation of a dimensioning and control interface through the programming tool "MATLAB7" with which an interactive simulation is possible.

This simulation interacts with several parameters in order to vary and adapt the resistance of soil accordingly as a key parameter in dimensioning and adjust costs as parameters. This will allow interaction between the need for engineering and implementation of the CP based system, the interactive mode can be extended to a real time monitoring so as to avoid environmental disasters (dumping of products) and economic (loss and production halt) disasters, and above all preserve life.

## ملخص

إن صيانة وامن قنوات النقل في كل الصناعات لهما من العناصر الأساسية بل الحيوية في نقل و توزيع المحروقات. في حين تعرضها إلى أوساط مؤكسدة, هذه الأنابيب تتآكل مع مرور الوقت, مسببة خسائر مادية و بشرية جد معتبرة, هذا النوع من التآكل وراء تعطيل حوالي 30% من شبكات نقل المحروقات.

و للحد من هذه الظاهرة طريقتين مستعملتين مزدوجتين (ألا و هما استعمال غلاف من البوليمير و حماية مهبطيه تحت تأثير تيار كهربائي و التي تنص حسب NACE علي إبقاء كامل الشبكة في مجال الحماية (المناعة) أي  $v 0.850 -$  بالنسبة إلي الاكترود المثالية  $(Cu/CuSO_4)$ .

و لقد لوحظ انه عند تطبيق هذه التقنية علي شبكة نقل ما و في حالة توزيع سيء للتيار و لفرق الكمون علي كامل الأنبوب ينتج جراء هذا انفصال الغلاف المطاطي عن الأنبوب بعد انتفاخ نتيجة أكله قوية علي مستوي البقاء المعدن و الغلاف بالإضافة إلي صدأ المعدن جراء ظاهرة إضعاف بالهدروجين.

التوزيع الجيد للكهرباء و لفرق الكمون يعتمد أساسا على التوزيع الأمثل للمواقع وقيم شدة المقاومات

الأرضية و المتجسدة في (أفرشة .....

مهمتنا في هذا العمل هي دراسة محكمة بغية السيطرة و مراقبة سير هذه التقنية من خلال استعمال أداة

البرمجة «Matlab7».

هذا البرنامج يسمح بالتفاعل مع عدة عوامل بغية ضبط قيمة شدة المقاومة الأرضية و تكييفها حسب الحاجة بوصفها عنصرا رئيسيا من العوامل في الدراسة و ضبط التكاليف كعامل إضافي, وسيوفر هذا التفاعل على الحاجيات الهندسية من جهة و تنفيذ الحماية المهبطية من جهة أخرى.

هذا البرنامج يمكننا تطويره قصد الرصد المباشر لكافة الشبكة لتجنب الكوارث البيئية (تسرب المنتج)

و الخسارة الاقتصادية (وقف الإنتاج) ، و قبل كل شيء الحفاظ على الأرواح البشرية.

## REMERCIEMENTS

Je tiens en premier lieu, à remercier Monsieur A.KHELIFA, maître de conférences à l'université Saad Dahleb de Blida, pour m'avoir dirigé le long de ce travail, et surtout pour sa patience inestimable à mon égard. Ce manuscrit n'a pu voir le jour que grâce à ces critiques, conseils et orientations. Je tiens encore à le remercier pour le profit que j'ai pu tirer de sa grande expérience tant sur le plan réflexion que sur le plan de rédaction.

Je remercie les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail, en particulier, monsieur H.KHALAF, pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury, monsieur A.KHELIFA, pour avoir accepté la lourde charge de rapporteur, mais aussi messieurs M.ZERGOUGE, S.OUZZANE et A.HANNANI pour l'ensemble des remarques pertinentes faites sur ce travail. Sans oublier monsieur M.YAHI directeur du CSC.

Un grand merci à monsieur M.A.BENCHERIF, pour son aide précieuse, son incessant souci de la réalisation du programme informatique en langage MATLAB 07, j'espère que cette amitié sera inaltérable !

À l'ensemble du personnel du CSC, en particulier monsieur H.MAZA, pour ces précieux appuis, tout en lui souhaitons bonheur et réussite dans sa vie, sans oublier également monsieur M.A.FAHSSI, B.BELKASSA, B.MAAMACHE, Y.YOUCEF, R.BADJI .

À messieurs F.YKHLEF, N.MOKRANI, H.DEMMED, H.TAHRAOUI, X.MOUFID, N.BENYAHYA que je ne pourrai cesser de les remercier pour leur soutien moral, ainsi qu'à toute l'équipe du CDTA.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude aux responsables de la SONATRACH (groupement ORHOUD) à Hassi Mesaoud où j'ai pu superviser toute une installation de protection cathodique et sur ce prendre acte des différents problèmes pouvant surgir.

Je souhaite adresser tous mes remerciements aux enseignants et aux étudiants du département de chimie industrielle et tout particulièrement, monsieur OUZZANE.

Et enfin à ma gentille mère qu'ALLAH la protège, je lui souhaite une longue vie pleine de bonheur et de santé et à mon défunt père qu'ALLAH ait pitié de son âme, à ma femme pour son soutien et à mon fils Mohamed Yazid qu'ALLAH les protège, ainsi qu'à ma sœur et mes frères sans oublier ma tante et son mari.

## DEDICACES

Je dédie ce travail à mon défunt Père qu'Allah ait pitié de son âme, à ma gentille Mère qu'Allah la protège.

À ma Femme qui ma soutenue tout le long de ce parcours.

À mon petit Fils Mouhamed yazid qu'Allah le protège.

À ma sœur et mes frères ainsi qu'à leurs familles.

À ma Tante et son Mari et à toute la famille.

À tous mes amis Maza halim, qu'il puisse retrouver le chemin du bonheur, à Guertoufa Rachid ,Naciri karim, Fahssi mouhamed toufik, Mokrani Nadir, Mebrak smain, Demed hammoud, Belkessa brahim, Maamache bouzid, Yahmi youcef, Badji riad, Benyahia nabil et à l'ensemble du personnel du CSC ,

**Mustapha**

## TABLE DES MATIERES

RESUME	02
REMERCIEMENTS	05
TABLE DES MATIERES	07
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX	09
INTRODUCTION	13
<b>1. CORROSION DANS L'INDUSTRIE PETROLIERE</b>	<b>15</b>
1.1. Intérêt du transport par pipeline	16
1.2. Caractéristiques des matériaux utilisés dans les pipes	17
1.3. Notions de corrosion des métaux	19
1.4. Théorie de la corrosion des métaux plongés dans un électrolyte quelconque (Ouvrages métalliques dans le sol ou dans l'eau)	32
1.5. Corrosion des pipelines dans l'industrie de pétrole et de Gaz	29
1.6. Corrosion par les sols	35
1.7. Généralités sur les différents types de corrosion dans le sol	42
<b>2. PROTECTION ET MOYENS DE LUTTE CONTRE LA CORROSION DES CANALISATIONS PETROLIERES</b>	<b>50</b>
2.1. Protection contre la corrosion interne	51
2.1.1. Protection par l'ajout d'inhibiteurs de corrosion	51
2.1.2. Protection par l'application de revêtements internes	51
2.1.3. Types de revêtements utilisés	52
2.2. Protection contre la corrosion externe	52
2.2.1. Revêtements associés à la protection cathodique	52
2.2.2. La protection cathodique	53
2.2.3. Protection cathodique par anodes sacrificielles	63
2.2.4. Protection cathodique par courant imposé	66
2.3. Protection par drainage des courants vagabonds	72
2.4. Conclusion	74
<b>3. REVETEMENT ASSOCIES ET EFFET DE LA PROTECTION CATHODIQUE</b>	<b>75</b>
3.1. Caractéristiques générales du revêtement externes	75
3.2. Effet de la protection cathodique sur les revêtements	78
3.2.1. Vieillissement et dégradation du revêtement	79
3.2.2. Enumération des défauts de revêtement	80
3.2.3. Origines des décollements de revêtement	84
3.2.4. Différentes formes de dégradations du revêtement sous l'effet de la protection cathodique	84

4. DISTRIBUTION DES LIGNES DE COURANT ET DE POTENTIEL DANS LES SYSTEMES ELECTROCHIMIQUES	88
4.1. Répartition du potentiel et du courant dans les systèmes électrochimiques	88
4.2. Principaux types de distribution du courant et du potentiel	90
4.2. 1. Distribution primaire	92
4.2. 2. Distribution secondaire	94
4.2. 3. Distribution tertiaire	96
4.3. Rôle de la résistance Ohmique dans le cas de la protection cathodique	97
4.3.1. Courant sous contrôle Ohmique	98
4.3.2. Calcul de la résistance Ohmique	99
5. TRAITEMENT MATHEMATIQUE ET REALISATION D'UNE INTERFACE DE COMMANDE DE PROTECTION CATHODIQUE PAR COURANT IMPOSÉ	103
5.1. Implantation générale d'un système de protection cathodique par soutirage de courant (courant imposé)	103
5.2. Distribution du courant et du potentiel	104
5.3. Distribution des lignes de Potentiel dans le cas de la Protection Cathodique d'une conduite enterrée en fonction de la distance	104
5.4. Calcul de la résistance transversale du revêtement isolant	110
5.5. Effet de résistance transversale du revêtement sur la répartition du potentiel de protection	110
5.6. Calcul de la résistance du déversoir (résistance de terre)	112
5.6.1. Différents types d'anodes utilisées pour les déversoirs	113
5.6.2. Mise en évidence de différentes dimensions sur le calcul de la résistance du déversoir	114
5.7. Organigramme de calcul et interface de commande du système de protection cathodique par soutirage de courant	119
5.7.1. Réalisation d'une interface de dimensionnement et de contrôle du système de protection cathodique par soutirage de courant	122
5.7.2. Utilisation de l'interface dans le monitoring à distance	123
5.8. Conclusion	124
CONCLUSION	125
APPENDICES	
A. Liste des symboles et abréviations	127
B. Menu principal du Programme de l'interface de commande	129
REFERENCES	136

## LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1	Double couche schématique à l'interface métal-solution	21
Figure 1.2	Transformation des oxydes de fer par corrosion sur une canalisation de gaz enterrée Jack et Wilmott.	22
Figure 1.3	Diagramme Fer-Eau	26
Figure 1.4	Courbe de polarisation	29
Figure 1.5	Circuit électrique équivalent à une interface électrochimique	30
Figure 1.6	Evolution des fuites en fonctions des années	33
Figure 1.7	Piles de corrosion géologique	44
Figure 1.8	Corrosion galvanique par couplage de deux métaux	45
Figure 1.9	Exemples de couples galvaniques	45
Figure 1.10	Phénomènes d'aération différentielle	46
Figure 1.11	Colonie de <i>Desulfovibrio vulgaris</i> (BSR) sur acier inoxydable	47
Figure 1.12	Corrosion par les courants vagabonds	49
Figure 2.1	Protection Cathodique d'un réseau métallique par anodes sacrificielles	54
Figure 2.2	Schéma descriptif de la Protection Cathodique d'un métal par soutirage de courant	54
Figure 2.3	Représentation selon Evans du principe de la protection cathodique par courant imposé	56
Figure 2.4	Choix du système de protection cathodique	61
Figure 2.5	Protection cathodique d'un métal par couplage galvanique	63
Figure 2.6	Protection cathodique d'un métal par courant imposé	66
Figure 2.7	Déversoir anodique posé verticalement	70

Figure 2.8	Déversoir anodique posé horizontalement	70
Figure 2.9	Protection cathodique par drainage de courant vagabond	74
Figure 3.1	Revêtement présentant des porosités, dont certaines relient directement le métal au milieu extérieur	80
Figure 3.2	Revêtement présentant un défaut ouvert sans décollement	81
Figure 3.3	Revêtement, présentant un défaut avec écran	82
Figure 3.4	Revêtement présentant un défaut ouvert avec décollement	82
Figure 3.5	Canalisation dont le revêtement a flué sous son propre poids	83
Figure 3.6	Revêtement présentant deux défauts communicants	83
Figure 3.7	Effet d'un courant cathodique sur le décollement du revêtement	84
Figure 3.8	Zone MPEI (Métal/Polymère/ Electrolyte /Interface)	85
Figure 3.9	Phénomène de blister sous protection cathodique	86
Figure 4.1	Variation du potentiel en fonction de la position des anodes lors de la protection cathodique d'une paroi (schématiquement)	91
Figure 4.2	Cellule électrolytique avec deux électrodes, planes et parallèles, enrobées dans des parois isolantes	92
Figure 4.3	Distribution primaire du courant, calculée par intégration de la loi de Laplace	93
Figure 4.4	Distribution secondaire du courant pour la cellule de la figure 4.2, avec $h \ll l$	95
Figure 4.5	Distribution secondaire du courant pour la cellule de la figure 4.2, avec $l \ll h$	95
Figure 4.6	Distribution secondaire du courant pour une électrode à disque, de rayon $r_0$	95
Figure 4.7	Distribution tertiaire de courant dans la cellule de la figure 4.2, avec écoulement laminaire du liquide parallèlement aux électrodes pour différente valeur de $h/l$ .	97
Figure 4.8	Cellule électrochimique à deux électrodes sphériques Concentriques	90
Figure 5.1	Principe général d'implantation d'un système de protection cathodique par soutirage de courant	103

Figure 5.2	Schéma électrique d'une portion de conduite traversée par un courant	104
Figure 5.3	Evolution du potentiel de protection le long de la canalisation pour deux résistances d'isolement différentes	111
Figure 5.4	Effet de la résistivité du sol sur la résistance verticale du déversoir (Fe-Si)	115
Figure 5.5	Effet de la longueur d'anode sur la résistance verticale du déversoir (Fe-Si)	115
Figure 5.6	Effet du rayon d'anode sur la résistance verticale du déversoir (Fe-Si)	116
Figure 5.7	Effet de la résistivité du sol sur la résistance horizontale du déversoir (Fe-Si)	116
Figure 5.8	Effet de la longueur d'anode sur la résistance horizontale du déversoir (Fe-Si)	117
Figure 5.9	Effet du rayon d'anode sur la résistance horizontale du déversoir (Fe-Si)	117
Figure 5.10	Effet du rayon d'anode sur la résistance horizontale du déversoir (Fe-Si)	118
Figure 5.11	Organigramme de l'interface de commande et de contrôle du système de protection cathodique par soutirage de courant	121
Figure 5.12	Interface de dimensionnement et de contrôle du système de protection cathodique par soutirage de courant avec implantation verticale du déversoir	122
Figure 5.13	Interface de dimensionnement et de contrôle du système de protection cathodique par soutirage de courant avec implantation horizontale du déversoir	122
Figure 5.14	Effet de différents coefficients d'atténuation sur l'évolution du potentiel de protection	123
Figure 5.15	Mise en évidence de l'effet du coefficient d'atténuation sur l'évolution du potentiel de protection par le biais de l'interface	124

Tableau 1.1	Coût de transport pour différents moyens	16
Tableau 1.2	Nuances et caractéristiques des aciers de pipelines les plus utilisés	18
Tableau 1.3	Potentiels respectifs des différentes électrodes	32
Tableau 1.4	Causes d'incendies des pipelines aux USA	34
Tableau 1.5	Vitesse de corrosion en fonction de la résistivité des sols	37
Tableau 1.6	Evolution du nombre de perforations en fonction de la résistivité Des sols	38
Tableau 1.7	Taux de corrosion à différente valeur de pH des sols	41
Tableau 2.1	Valeurs moyennes de densité de courant de protection	58
Tableau 2.2	Comparatif entre la protection cathodique par anodes sacrificielles et par courant imposé	62
Tableau.2.3	Anode utilisées pour le système de protection cathodique	64
Tableau.2.4	Formes et dimensions des anodes	68
Tableau 2.5	Propriétés et milieu d'utilisation des déversoirs	69
Tableau 2.6	Electrodes de référence	71
Tableau 5.1	Dimensions des anodes Ferro-silicium	113
Tableau 5.2	Dimensions des anodes graphite	113

## INTRODUCTION

La corrosion est le processus qui conduit les éléments naturels à défaire ce que l'homme, par son travail et à grands frais d'énergie, a élaboré à partir des matériaux que la terre lui offre. La corrosion métallique ramène ainsi, métaux et alliages à leur état naturel d'oxydes ou de minerais.

La corrosion engendre, aussi bien pour les particuliers que pour les entreprises industrielles des coûts d'entretien et de renouvellement parfois très importants, des conséquences techniques fâcheuses, et des risques pour l'intégrité de l'homme lui-même.

Généralement enterrés, inaccessibles à l'examen, assurant leur fonction de production, de transport et de distribution, se faisant même oublier, les ouvrages gaziers et pétroliers baignent dans un milieu souvent agressif du fait de son hétérogénéité et du grand nombre d'impuretés qu'il contient. Ce milieu très varié ne se prête pas facilement à la modélisation et aux études scientifiques, tant en laboratoire que sur site, c'est pourquoi, les chercheurs en sont encore au stade de la compréhension des mécanismes de la corrosion et les ingénieurs au perfectionnement des techniques destinées à prémunir les ouvrages des effets de cette dégradation.

Le réseau de distribution de l'entreprise nationale « SONEGAS » était constitué au début de notre étude, d'environ 500.000 kilomètres de conduites pour le transport et la distribution du gaz. Il comportait, également, 25 stations de compression, onze réservoirs souterrains comportant plus de 350 puits, des centaines de postes et autres installations gazières.

A cet effet, pour lutter contre la corrosion, deux méthodes couplées sont utilisées à savoir une protection passive par revêtement polymère (PE) et une protection active dite par soutirage de courant. Cette dernière consiste à maintenir le potentiel des conduites à une valeur d'immunité, de manière à éliminer le transfert de matière qu'est la corrosion des canalisations vers le milieu dans lequel elles sont enterrées.

Du fait que la distribution du courant et du potentiel dépend essentiellement de la maîtrise et de l'optimisation des différents paramètres mis en jeu, on a élaboré une interface de dimensionnement et de contrôle moyennant l'outil de programmation « MATLAB7 » avec laquelle une simulation interactive est possible. Ce mode interactif pourra être étendu à un monitoring en temps réel permettant ainsi d'éviter des catastrophes écologiques (déversement de produits polluants dans la nature) et économiques (perte et arrêt de production) et surtout préserver des vies humaines.

## CHAPITRE 1

### CORROSION DANS L'INDUSTRIE PÉTROLIÈRE

Réduits à l'état métallique, les aciers ont tendance, en présence de certains environnements, à revenir à la forme oxydée qui est leur forme thermo dynamiquement stable. Ce phénomène, d'un caractère essentiellement chimique, a une très grande importance économique puisque au niveau mondial, on estime que la corrosion détruit un quart de la production annuelle d'acier, soit 5 tonnes par seconde [1]. De plus, les pertes indirectes causées par la corrosion sont souvent supérieures aux pertes directes. Si l'on doit par exemple arrêter une centrale nucléaire pour intervenir sur un échangeur corrodé, le coût de l'intervention peut être faible comparé aux pertes de gains dues à l'interruption de la production. De même, pour remplacer un tuyau d'eau chaude noyé dans le mur en béton d'un immeuble, les frais de réparation dépassent largement le prix du composant. La diversité des coûts rend toute estimation difficile et incertaine, mais les pertes par corrosion représentent sans aucun doute des montants très élevés. De plus, la corrosion des matériaux entraîne un gaspillage de matières premières et d'énergie.

Du fait de la variété géographique, géologique, économique, même politique rencontrée, la corrosion pétrolière s'avère sans doute encore plus spécifique qu'ailleurs [2]. Les canalisations de transport de pétrole, de gaz, et de produits pétroliers sont de grande importance pour l'économie des pays producteurs des hydrocarbures. Le facteur principal de la détérioration de ces derniers est la corrosion, qui cause jusqu'à 30% des défaillances [3]. Par conséquent, la protection de ces ouvrages demeure un objectif capital.

En général pour remédier à la corrosion des pipelines on a recourt aux inhibiteurs de corrosion, aux revêtements (polymères) et à la protection cathodique.

La protection des ouvrages métalliques enterrés contre la corrosion externe est assurée par l'application conjointe de revêtements et d'un système de protection cathodique. Alors que pour la corrosion interne on emploie les inhibiteurs de corrosion.

Nous proposons dans ce chapitre une synthèse bibliographique des études permettant en premier lieu de comprendre les phénomènes de corrosion des canalisations de transport enterrées (pipelines), puis nous présenterons le principe de la protection cathodique avec ces différents paramètres.

### 1.1 Intérêt du transport par pipeline

Par définition les pipelines sont des canalisations destinées au transport d'hydrocarbures pompables, tels que : pétroles bruts, produits raffinés finis, semi-finis et bases pétrochimiques (naphta) et les gaz. L'oléoduc est le mode de transport massif le plus sûr et le moins coûteux sur longue distance et pour des volumes élevés. Cela est montré clairement dans le tableau 1.1.

Tableau. 1.1 : Coût de transport pour différents moyens [4].

Moyen de transport	Coût de transport/100 km
Oléoduc	1,8 à 2,1 €/t
Camion 20 t	4,5 €/t
Camion 38 t	4,1 €/t
Train 2000 t	2,7 €/t
Train 1000 t	3,3 €/t
Wagon isolé	4,1 €/t
Navire 10.000 t pour 300 km	2,4 €/t
Barge (100 km)	2,7 à 4,1 €/t

Il offre de plus l'intérêt majeur de ne pas encombrer les infrastructures de surface et de ne pas imposer de retour à vide, contrairement à tous les autres

modes de transport, ce qui est un gage d'efficacité énergétique. Aussi il permet un fonctionnement sans interruption, 24 heures sur 24 et 365 jours par an.

L'ordre de grandeur de la longueur de ces ouvrages est de quelques dizaines à plusieurs centaines de kilomètres. Ils mettent en jeu des investissements considérables, et sont soumis à une réglementation de construction et d'exploitation précise.

Le coût de réalisation d'un oléoduc (hors réalisation des terminaux et stations de pompage) est estimé entre 7,6 à 10,6 k€ /cm de Ø /km de longueur, en environnement moyen, et jusqu'à 60 k€, en environnement sévère [4].

Un oléoduc est constitué de tubes d'acier de haute résistance, étirés ou roulés, et soudés en long ou en hélice. Ils ont une épaisseur globalement uniforme, selon le profil de la ligne et les impératifs réglementaires. Elle varie de 4 à 12,7mm. Ils sont assemblés sur le chantier par soudage à l'arc, et peuvent supporter des pressions maximales en service comprises entre 50 et 90 bars, exceptionnellement 120 bars (selon les nécessités du profil de la ligne et du débit recherché pour un diamètre donné de canalisation).

### 1.2 Caractéristiques des matériaux utilisés dans les pipes

La demande d'aciers pour la réalisation de pipelines au transport de gaz et de pétrole contenant de l'hydrogène sulfuré a conduit les constructeurs, français par exemple tel que Usinor Aciers et sa filiale VALOUREC à développer des aciers résistant à la fissuration induite par l'hydrogène (F.I.H) ou encore H.I.C (Hydrogen Induced Cracking).

Au cours des dix dernières années, les efforts combinés des recherches sur la métallurgie des produits en particulier aciérie ont permis de satisfaire largement les exigences premières du marché, à savoir des aciers micro-alliés de nuance X42 à X60.

Des tôles pour des tubes en aciers de nuances X60/X65/ X70 résistants à l'H<sub>2</sub>S et à des pH acide ont pu être réalisées, une orientation future vers des nuances supérieures est envisagée [5].

Les qualités d'acier couramment utilisées dans la construction des pipelines sont définies dans deux spécifications de l'A.P.I (American Petroleum Institute), dénommées 5L pour les qualités normales et 5LX pour les qualités à haute résistance. Ces spécifications sont utilisées d'une façon extrêmement générale dans le monde entier. Les qualités d'aciers les plus employées ont les caractéristiques suivantes de résistance montrées dans le tableau 1.2.

Tableau. 1.2 : Nuances et caractéristiques des aciers de pipelines les plus utilisés [6]

Spécification A.P.I	Grade	Limite d'élasticité (kg/mm <sup>2</sup> )	Résistance à la rupture (kg/mm <sup>2</sup> )
5L	A	21	34
5LX	B	25	42
5LX	X42	29	42
5LX	X46	32	45
5LX	X52	37	47
5LX	X56	39	52
5LX	X60	41	55
5LX	X65	46	56

On estime, à peu près, à 98% la part du minerai de fer employé pour la fabrication de l'acier. Ce pourcentage très élevé s'explique notamment par le caractère extrêmement polyvalent de cet alliage en comparaison avec la fonte [7].

Etant donné, son faible coût, la maîtrise des techniques de son élaboration et sa production, l'acier au carbone est largement utilisé dans le secteur de l'énergie, comme le forage (plates-formes de forage), le transport du pétrole ou du gaz naturel par le biais de gazoducs ou d'oléoducs [8,9]. Dans l'industrie pétrolière, l'acier au carbone est présent sous forme de tôles d'épaisseurs

différentes, suivant les besoins à satisfaire, soudées destinées aux infrastructures de traitement, de transport et de stockage du pétrole brut et/ou ses dérivés.

Les pipelines sont conçus de telle façon qu'ils soient résistants contre la corrosion. Néanmoins, vu le changement de la composition et les conditions du milieu corrosif, il est très difficile d'obtenir des aciers très efficaces contre toutes les formes de corrosion. Un remplacement du matériel corrodé, même partiel constitue pour l'industrie pétrolière une charge financière très élevée, à laquelle il faut ajouter le manque à gagner correspondant à l'arrêt nécessaire des installations pour effectuer les réparations.

La méthode la plus couramment utilisée, pour la protection contre la corrosion externe des pipelines, passe par l'application conjointe de revêtements et d'un système de protection cathodique [10].

### 1.3 Notions de corrosion des métaux

La corrosion est définie [11] comme une « interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et pouvant conduire à une dégradation significative de la fonction du métal, du milieu environnant ou du système technique dont ils font partie ». Les mécanismes mis en jeu sont divers, et conduisent à des formes de corrosion différentes. Pour qu'il y ait corrosion, il faut que deux zones de la structure métallique soient en contact électrique et qu'elles aient un rôle différent, l'une anodique et l'autre cathodique. On notera que ces zones peuvent parfois se superposer.

#### 1.3.1 Interface métal électrolyte

La corrosion généralisée des aciers en milieu aqueux implique des réactions entre le métal et la solution, qui se produisent à l'interface séparant les deux milieux. La nature de cette interface, conditionnée par les phénomènes d'adsorption, de ségrégation, et même de corrosion, va donc jouer un rôle important dans l'évolution du système métal-solution.

La contribution de cette double couche à l'évolution des phénomènes de corrosion est donc prépondérante [12].

### 1.3.2 Modèles de la double couche

Si l'on plonge une petite éprouvette de fer très pur dans de l'eau pure, l'émission d'ions ferreux  $\text{Fe}^{2+}$  dans l'eau est immédiate.

Les électrons libérés dans le métal contribuent à le charger négativement ; en conséquence les ions  $\text{Fe}^{2+}$ , chargés positivement sont retenus au voisinage immédiat de la surface métallique sous l'effet des forces électrostatiques comme illustré sur la figure 1.1. Par ailleurs, ces ions comme les autres ions présents dans la solution, sont solvatés, c'est-à-dire entourés d'un certain nombre de molécules d'eau. Cet ensemble (métal/solution), appelé communément couche double [13].

La notion de la double couche est essentielle pour comprendre le comportement de l'interface métal/électrolyte. En effet, le métal comporte des électrons libres, mobiles, susceptibles de « quitter » le métal. La densité d'électrons est distribuée de telle sorte que la charge électrique n'est pas uniforme sur quelques dixièmes de nanomètres en surface, épaisseur dans laquelle s'effectuent les échanges électroniques de tous les phénomènes électrochimiques [14].

Trois modèles ont été proposés pour décrire les propriétés des interfaces électrochimiques. Le premier est celui de Helmholtz, amélioré par Gouy-Chapman pour tenir compte des variations de concentration entre le milieu et l'interface. Puis Stern a combiné les deux modèles précédents [15].

Les propriétés de l'électrolyte dans cette zone, concentration des espèces (actives ou non), ainsi que l'épaisseur, influencent le comportement du métal dans la solution, et donc sa dissolution. L'accumulation d'ions sur cette interface modifie les propriétés électriques locales et crée alors une capacité,  $C_{dc}$ , dite de double couche ; l'interface métal- solution présente aussi une résistance à l'échange d'électrons, appelée de transfert de charge  $R_t$ , s'opposant au passage des courants entre la solution et le métal.  $R_t$  est dépendante du potentiel du métal, du

taux de recouvrement et de la concentration des espèces. Ces deux grandeurs fondamentales sont accessibles par spectroscopie d'impédance électrochimique.

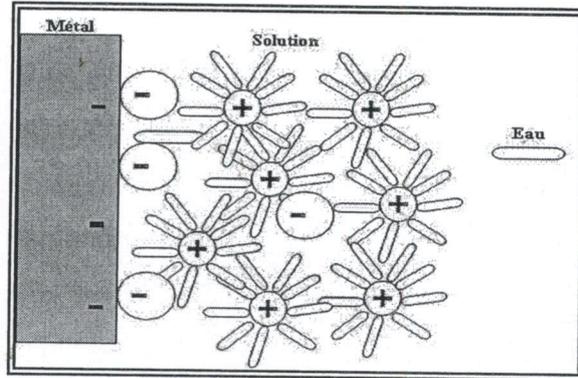
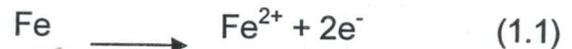


Figure. 1.1 : Double couche schématique à l'interface métal-solution [12].

### 1.3.3 Corrosion « libre aérée »

La corrosion est un phénomène naturel. Elle concerne tous les métaux, qui ont tendance, sous certaines conditions, à retourner à leur état d'énergie le plus bas, c'est-à-dire sous forme oxydée. Nous allons présenter dans ce paragraphe les mécanismes de la dissolution anodique du fer en milieu aqueux. Cette étude ne présente que les phénomènes de corrosion dite « libre aérée », c'est à dire sans polarisation imposée, et sans contrainte mécanique. La corrosion d'un métal, et donc de l'acier, en solution aqueuse aérée requiert deux réactions électrochimiques élémentaires : l'oxydation de l'acier (assimilée ici à celle du fer) d'une part et la réduction d'espèces oxydantes présentes au sein de la solution, d'autre part, dans l'eau pure les réactions associées sont:



Selon Uhlig [16], les couches de produits de corrosion formés lors de la dégradation du fer dans de l'eau aérée agissent comme une relative barrière de diffusion vis-à-vis de l'oxygène. Les vitesses de corrosion proposées sont de

l'ordre de 46 à 116  $\mu\text{m}/\text{an}$  selon les milieux. Les auteurs rappellent que la composition de l'acier et la structure métallographique n'a que très peu d'importance sur la vitesse de corrosion uniforme en milieu sol par rapport aux différents facteurs externes qui seront discutés par la suite.

#### 1.3.4 Différents types d'oxydes issus de la corrosion de l'acier

Lors de la dégradation de l'acier, différents produits de corrosion sont susceptibles de se former. Les conditions de formation et de transformation des différentes phases dépendent du milieu dans lequel elles se produisent et notamment de son évolution dans le temps. Les dépôts de produits de corrosion formés peuvent jouer un rôle actif de barrière plus ou moins efficace selon leur nature [17]. Cependant, ces couches sont difficiles à caractériser car elles sont minces, pas toujours homogènes dans leur épaisseur, et leur nature change dès lors qu'elles sont extraites du milieu dans lequel elles se sont formées. Une méthode d'analyse fine et utilisable in situ telle que la spectroscopie Raman permet une caractérisation plus juste de ces produits.

Comme le montre la figure 1.2 et dans les cas de corrosion qui nous intéresse, trois types d'oxydes entrent souvent dans la composition des couches. L'espèce majoritaire dans les produits finaux peut donner une indication sur le degré d'aération : lépidocrocite et géothite si le milieu est aéré, magnétite si le milieu est partiellement ou totalement désaéré.

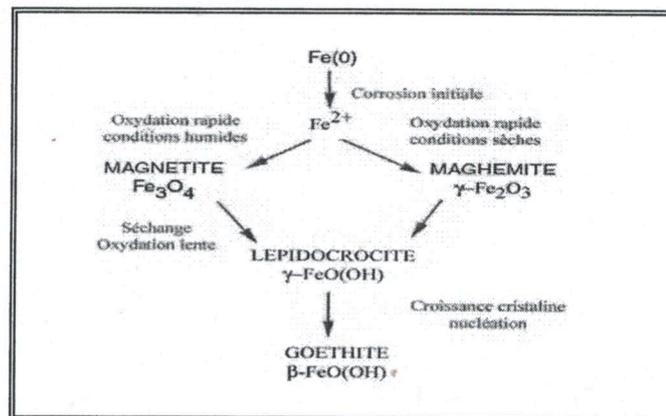


Figure. 1.2 : Transformation des oxydes de fer par corrosion sur une canalisation de gaz enterrée Jack et Wilmott [18,19].

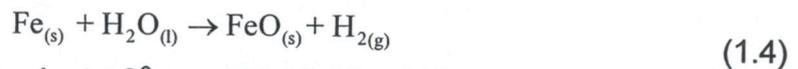
J.L.Crolet [20] confirme l'importance de la formation des dépôts dans le devenir sur le long terme des processus de corrosion de l'acier. Selon la nature des réactions limitantes dans la cinétique de dégradation, le processus global conduira à la croissance d'une couche protectrice ou non, voire une accélération de la corrosion.

### 1.3.5 Aspect thermodynamique de la réaction de corrosion

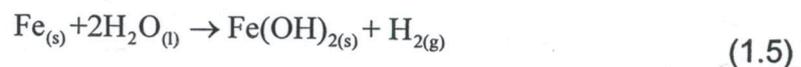
M. Pourbaix [21] a montré le rôle de la thermodynamique dans la définition de la tendance à la corrosion des métaux dans l'eau pure à 25°C. H.E.Townsend [22] quant à lui, a étudié le diagramme thermodynamique de Pourbaix du système Fe-H<sub>2</sub>O jusqu'à la température de 200°C, il a prouvé à travers des calculs que des milieux fortement basique et fortement acide ainsi que l'augmentation de la pression et de la température favorisent les réactions de corrosion.

En raison de leur tendance thermodynamique de réagir avec l'environnement, les métaux sous des conditions spécifiques se dégradent en formant des produits de corrosion.

En effet, en absence d'oxygène dissous, le fer réagit avec l'eau selon les réactions suivantes [23] :



Avec  $\Delta G^{\circ}_{298} = -14.26 \text{ kJ/mol}$  et  $\Delta S^{\circ}_{298} = +94.16 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$



Avec  $\Delta G^{\circ}_{298} = -15.72 \text{ kJ/mol}$  et  $\Delta S^{\circ}_{298} = +51.36 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$

Tel que  $\Delta G^{\circ}_{298}$  et  $\Delta S^{\circ}_{298}$  sont respectivement la variation d'énergie de Gibbs et d'entropie des réactions (1.4) et (1.5), les données pour les calculs de  $\Delta G^{\circ}_{298}$  et  $\Delta S^{\circ}_{298}$  sont selon J.Dean [24].

Pour une valeur de  $\Delta G^{\circ}_{298} < 0$ , les réactions (1.4) et (1.5) se produisent spontanément aux conditions normales de ( $T = 298^{\circ}\text{K}$ ,  $P = 1 \text{ atmosphère.}$ ), par conséquent leurs vitesses peuvent être très faible.

Une variation d'entropie  $\Delta S^{\circ}_{298} > 0$  signifie qu'une élévation de la température a comme conséquence une augmentation de la tendance thermodynamique de la réaction entre Fe et H<sub>2</sub>O.

La valeur  $\Delta S^0_{298} > 0$  pour des réactions (1.4) et (1.5) signifie qu'une élévation de la température a comme conséquence une augmentation de la tendance thermodynamique de la réaction entre Fe et H<sub>2</sub>O.

Ceci dérive de l'équation thermodynamique:  $\Delta S^0_{298} = -(\partial \Delta G^0_{298} / \partial T)_P$ , quand  $\Delta S^0_{298} > 0$ ,  $(\partial \Delta G^0_{298} / \partial T)_P < 0$ , et une augmentation de la température aura comme conséquence une diminution de  $\Delta G^0_{298}$ .

En plus des réactions (1.4) et (1.5), les réactions suivantes peuvent se produire:



(1.6)

Avec  $\Delta G^0_{298} = +6.42 \text{ kJ/mol}$  et  $\Delta S^0_{298} = +63.45 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$

Ainsi que:

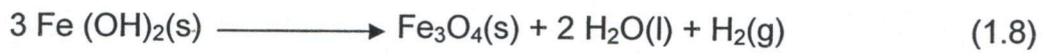


Avec  $\Delta G^0_{298} = -30.78 \text{ kJ/mol}$  et  $\Delta S^0_{298} = +214.95 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$

Pour la réaction (1.6),  $\Delta G^0_{298} > 0$  signifie que cette réaction n'est pas spontanée à la température de 25°C. Pour la réaction (1.7),  $\Delta G^0_{298} < 0$  signifie que cette réaction peut spontanément se produire à 25°C.

Pour la réaction (1.7)  $\Delta S^0_{298} > 0$  signifie que l'augmentation de la température a comme conséquence l'augmentation de la tendance à la réaction entre Fe et H<sub>2</sub>O avec la formation de l'hématite Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou bien la maghémite  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ .

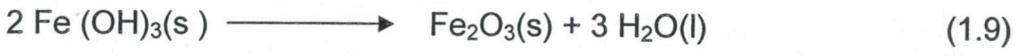
L'Hydroxyde de fer (II) Fe(OH)<sub>2</sub> peut se transformer en magnétite Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> selon la réaction:



Avec  $\Delta G^0_{298} = -19.68 \text{ kJ/mol}$ ,  $\Delta S^0_{298} = +152.15 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$

Comme  $\Delta S^0_{298} > 0$ , l'élévation de la température a comme conséquence l'augmentation de la tendance à la décomposition Fe(OH)<sub>2</sub>.

La forme la plus stable pour l'oxyde de fer est Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> :



Avec  $\Delta G^0_{298} = -43.62 \text{ kJ/mol}$  et  $\Delta S^0_{298} = +88.05 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$

L'hydroxyde ferrique (III)  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  n'est pas thermodynamiquement stable, en se transformant en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , donne les produits intermédiaires caractérisés par déshydratation partielle et par la structure polymère des hydroxydes de fer.

L'augmentation de la pression de gaz d'hydrogène des réactions (1.4), (1.5), et (1.7) devrait diminuer et même arrêter la corrosion du fer.

Deux Remarques peuvent être énumérées :

a) À des températures ambiantes, le fer pur et le fer en alliages peuvent être oxydés par l'eau (liquide ou vapeur) en donnant de l'hématite  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ou de la magnétite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

L'augmentation de la température a comme conséquence la croissance de la tendance des réactions (1.4), (1.5), et (1.7) entre le fer (aciers y compris) et l'eau.

b) L'augmentation de la pression d'hydrogène diminue la tendance à la corrosion du fer dans l'eau. Aux pressions élevées d'hydrogène, le fer résiste à l'eau.

### 1.3.6 Etablissement des diagrammes de Pourbaix (pH - Tension)

M. Pourbaix a établi pour la plupart des métaux des diagrammes pH - potentiel d'équilibre des réactions, qui décrivent les différentes réactions théoriques possibles entre un métal et ses ions en présence d'eau. Selon la solubilité des corps formés, il en a déduit des domaines théoriques de situation du métal.

Ainsi pour le fer on trouve :

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, 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.

Ces trois domaines et les conditions (pH et tension) qui les définissent peuvent être établis pour tous les métaux purs. Le diagramme du fer est montré sur la Figure 1.3.

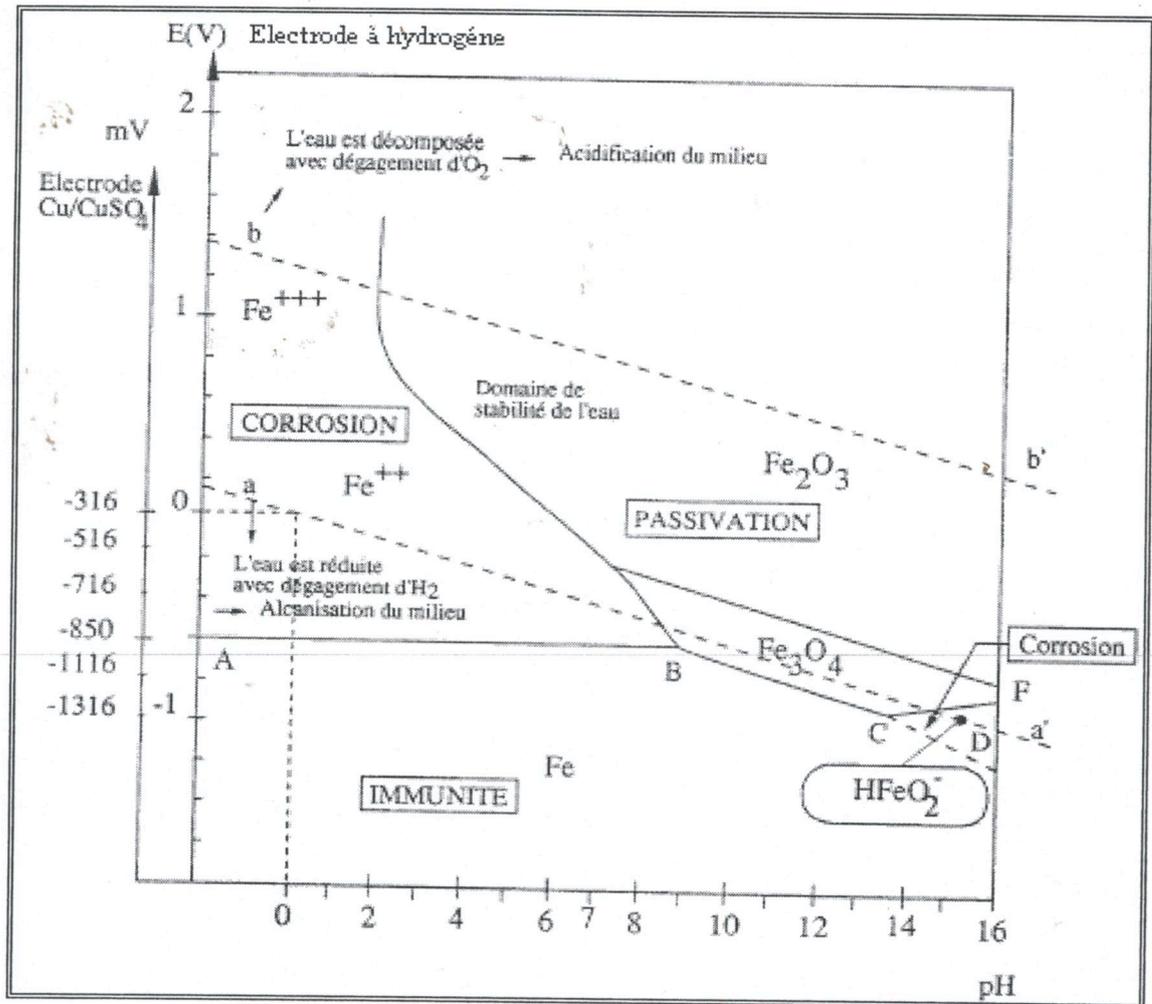


Figure .1.3 : Diagramme Fer-Eau

Des processus ou des réactions secondaires peuvent apparaître au niveau des électrodes, pour ralentir ou augmenter la vitesse des réactions anodiques ou cathodiques.

- Ainsi, par exemple, dans les sols, la raréfaction de l'oxygène diminue la corrosion de l'acier en ralentissant la réaction cathodique, mais il n'en est plus de même si un apport constant d'oxygène est produit par les fluctuations d'une nappe

phréatique ou d'un écoulement d'eau. Dans ce cas, il y aura entretien de la corrosion.

- En milieu neutre ou basique, l'hydrogène formé aux cathodes reste adsorbé et ne se dégage pas ; la vitesse de corrosion diminue dans de fortes proportions.

- Les produits primaires de la corrosion peuvent aussi, en réagissant avec la solution (soit par transformation, soit par dissolution), jouer ou non le rôle de barrières à la diffusion de l'oxygène et ainsi ralentir ou même réduire à zéro le taux de corrosion, ou bien au contraire, par une remise à nu du métal, favoriser la poursuite de la corrosion.

Il en est ainsi, par exemple, de l'hydroxyde ferreux, produit de la corrosion du fer, qui en solution très acide est dissous et ne protège pas le métal, mais qui en milieu neutre en présence d'oxygène se transforme en hydroxyde ferrique (la rouille) assurant une barrière à la diffusion de l'oxygène.

### 1.3.7 Détermination des vitesses de corrosion

La vitesse de corrosion dépend de très nombreux facteurs, parmi les principaux on citera [15]: le renouvellement ou la stagnation du milieu, l'agitation ou le repos, la température qui favorise l'accélération de la corrosion et l'hétérogénéité diverses du métal (inclusion, état de surface, composition chimique superficielle) et du milieu (variation du pH, quantité d'oxygène dissous, ainsi que d'autres facteurs qui seront énumérées plus loin)

Trois méthodes peuvent être utilisées pour mesurer les vitesses de corrosion, à savoir la méthode gravimétrique dite perte de masse, la méthode de Tafel et la méthode d'impédance électrochimique.

#### 1.3.7.1 Méthode gravimétrique : Perte de masse

Par rapport aux autres méthodes La méthode de la perte de masse est la plus précise, cependant elle présente trois inconvénients majeurs, elle est destructive, longue et ne donne qu'une vitesse moyenne sur la durée de l'essai, contrairement aux autres méthodes qui donnent des vitesses instantanées. Pour

déterminer correctement la perte de masse d'un échantillon corrodé, il est nécessaire d'éliminer la totalité des produits de corrosion avant la pesée. Pour cela, l'American standard test methods (ASTM) propose un grand nombre de solutions de décapage. Les décapages successifs se font jusqu'à l'obtention d'un  $\Delta m/m$  constant.

La vitesse de corrosion est alors estimée pour une surface de  $S$  ( $\text{cm}^2$ ), en utilisant la formule suivante.

$$V_{\text{corr}} = \frac{\Delta m}{\rho t S} \times 365 \times 10^4 [\mu\text{m}/\text{an}] \quad (1.1)$$

Avec  $t$  en jours.

Au vu de la durée de vie escomptée des canalisations de transport de gaz, les vitesses de corrosion acceptables sont de l'ordre de quelques micromètres par an au maximum [25].

#### 1.3.7.2 Méthode de Tafel

Cette méthode utilise les portions de la courbe  $[i = f(E)]$ , éloignées du potentiel de corrosion, c'est-à-dire les portions pour lesquelles  $E_a \gg E_{\text{corr}}$  (domaine anodique) où  $E_c \ll E_{\text{corr}}$  (domaine cathodique). L'équation de Butler-Volmer peut être simplifiée [26].

Pour la branche anodique ( $E_a \gg E_{\text{corr}}$ )

$$\Rightarrow i_a = i_{\text{corr}} \cdot \exp [(2.3 (E - E_{\text{corr}}) / b_a)] \quad (1.2)$$

$$\Rightarrow E - E_{\text{corr}} = a + b \log (i) \quad (1.3)$$

$$\eta_a = a + b \log (i) \quad (1.4)$$

Où

$\eta_a$  : polarisation anodique

$a$  : l'ordonnée à l'origine

Pour la branche cathodique ( $E_c \ll E_{\text{corr}}$ )

$$\Rightarrow i_c = -i_{\text{corr}} \cdot \exp [(-2.3 (E - E_{\text{corr}}) / b_c)] \quad (1.5)$$

$$\Rightarrow E - E_{\text{corr}} = a' + b' \log (i') \quad (1.6)$$

$$\eta_b = a' + b' \log (i') \quad (1.7)$$

Les équations (1.4) et (1.7) représentent la loi de Tafel sous sa forme simplifiée et indiquent que la courbe [ $\log(i) = f(E)$ ] doit présenter une partie linéaire appelée couramment « droite de Tafel ». Cette dernière permet de visualiser la tension de transfert et aussi de déduire le courant de corrosion après extrapolation des droites anodique et cathodique jusqu'au potentiel de corrosion ( $E = E_{\text{corr}}$ ), comme il est illustré sur la représentation potentiodynamique (figure 1.4).

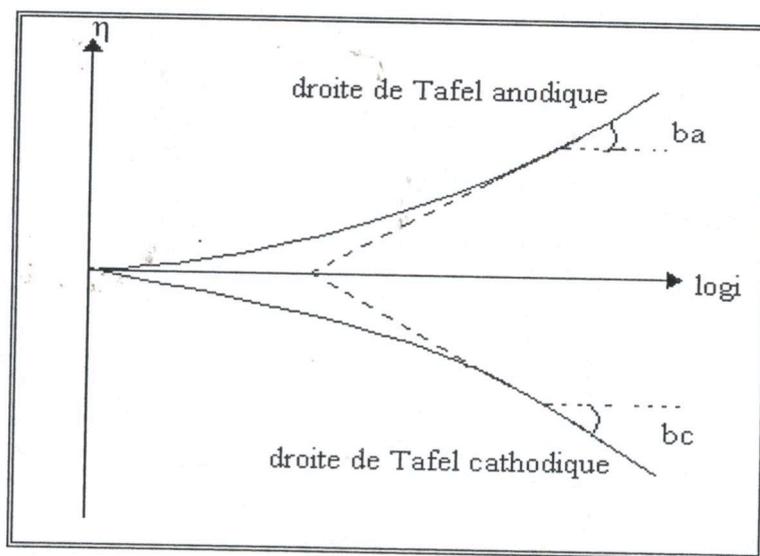


Figure. 1.4 : Courbe de polarisation

### 1.3.7.3 Méthodes d'impédances électrochimiques

La spectrométrie d'impédance électrochimique (EIS) est une technique qui permet d'analyser plus finement les différents phénomènes électrochimiques se produisant à la surface du métal. Il semble qu'elle est la méthode la plus adaptée à l'étude d'un système électrochimique en fonction du temps sans perturbation importante [27].

L'EIS consiste à mesurer l'impédance, qui repose sur l'application d'une excitation électrique alternative, de faible amplitude de 5 à 10 mV, sur une large gamme de fréquences, à un point de la courbe de polarisation stationnaire. Les fréquences balayées le long des mesures d'impédance vont généralement de centaine de Kilohertz (kHz) à quelques millihertz (mhz).

L'impédance  $Z$  est définie selon la loi d'ohm par le rapport entre le courant et la tension :

$$Z = E / I \quad (1.8)$$

Une perturbation sinusoïdale de faible amplitude de potentiel en fonction de la fréquence, induit un courant sinusoïdal déphasé d'un angle par rapport à ce potentiel, selon les équations suivantes :

$$E = E_0 \sin(\omega t) \quad (1.9)$$

$$I = I_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.10)$$

Où :

$E_0$  : Amplitude maximale du signal.

$I_0$  : Amplitude maximale du signal résultant

$\omega$  : Pulsation (rad /seconde).

$\varphi$  : Angle de déphasage entre la tension et le courant

$t$  : Temps (seconde).

Le comportement par exemple d'une surface de métal nu exposé à un milieu électrolytique a été largement étudié et modalisé par la technique EIS [28]. Ceci dit une interface électrochimique est assimilée, au regard de son comportement, à un circuit électrique équivalent comprenant une impédance caractérisée exclusivement par un effet capacitif et un effet résistif (figure 1.5). Ce circuit équivalent doit refléter effectivement, par ses composantes et son comportement, la réponse de l'interface électrochimique, à une excitation électrique identique.

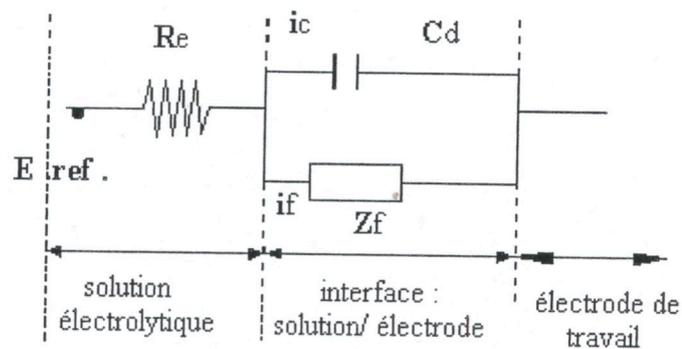


Figure. 1.5 : Circuit électrique équivalent à une interface électrochimique

Re : Résistance de la solution  
Ic : Courant capacitif (ou de charge)  
If : Courant faradique  
Cd : Capacité de la double couche  
Zf : Impédance faradique

- ❖ Le condensateur Cd, traduit l'effet capacitif dû à la double couche électrochimique, de part et d'autre de l'interface électrode/solution.
- ❖ L'impédance faradique, Zf, traduit la contribution électrochimique du système (transfert de charge, transport de matière ou adsorption-désorption) dans la réponse électrique observée.

#### 1.4 Théorie de la corrosion des métaux plongés dans un électrolyte quelconque (Ouvrages métalliques dans le sol ou dans l'eau)

Un métal pur plongé dans un électrolyte (contenant un de ses sels) possède un potentiel qui peut être calculé à partir des lois de la thermodynamique et dépend, entre autres facteurs, de la concentration des ions métalliques dans la solution.

Si l'on considère maintenant un métal ou un alliage quelconque 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 reste néanmoins mesurable avec une chaîne de mesure.

Le potentiel du métal dans une solution dépend de très nombreux paramètres relatifs à la fois au métal et à la solution. Il dépend, entre autres, de la nature du métal, de son état métallurgique et de son état de surface (présence d'oxydes, de calamines, ...), de la nature de l'électrolyte et de ses constituants solides, liquides et gazeux (présence de sels dissous, taux d'aération, granulométrie), de l'agitation du milieu (mouvement des nappes phréatiques, marées, ...).

Chaque expertise d'un cas de corrosion nécessite, avant même d'établir un diagnostic ou de rechercher une solution, la mesure du potentiel du métal dans la solution où il baigne. Cela permet, dans beaucoup de cas, de mieux appréhender les conditions ou les paramètres qui influent sur l'équilibre métal/solution.

Le tableau 1.3 donne la liste des potentiels normaux d'oxydoréductions des métaux usuels mesuré à l'état standard (25°C, 1bar), par rapport à l'électrode normale à hydrogène.

Tableau 1.3. Potentiels standard d'oxydoréduction, à 25°C

Réaction	Potentiel standard d'équilibre $E_{II}$ (V)
$Au = Au^{3+} + 3e$	+1,50
$2 H_2O = O_2 + 4 H^+ + 4e$	+1,23
$Pt = Pt^{2+} + 2e$	+1,19
$Ag = Ag^+ + e$	+0,80
$4 OH^- = O_2 + 2 H_2O + 4e$	+0,40
$Cu = Cu^{2+} + 2e$	+0,34
$H_2 = 2 H^+ + 2e$	0
$Pb = Pb^{2+} + 2e$	-0,13
$Sn = Sn^{2+} + 2e$	-0,14
$Ni = Ni^{2+} + 2e$	-0,25
$Cd = Cd^{2+} + 2e$	-0,40
$Fe = Fe^{2+} + 2e$	-0,44
$Cr = Cr^{3+} + 3e$	-0,74
$Zn = Zn^{2+} + 2e$	-0,76
$Al = Al^{3+} + 3e$	-1,67
$Mg = Mg^{2+} + 2e$	-2,37
$Na = Na^+ + e$	-2,71

### 1.5 Corrosion des pipelines dans l'industrie de pétrole et de Gaz

La production de brut des puits est acheminée jusqu'aux centres industriels par un réseau de collecte de pipes. Ce réseau connaît beaucoup de problèmes dont le phénomène de fuites d'effluent est le plus inquiétant. En effet, le nombre de ces fuites pour un pipe ne cesse d'augmenter d'année en année, causant ainsi des perturbations dans la production. Une étude de l'évolution des fuites et leur projection dans l'avenir proche, a été effectuée par Boukhallat [29], sur la base de données réelle propre au champ de Hassi Messaoud, sur une période rétrospective de seize années. Cette étude a donné les résultats représentés sur la figure 1.6.

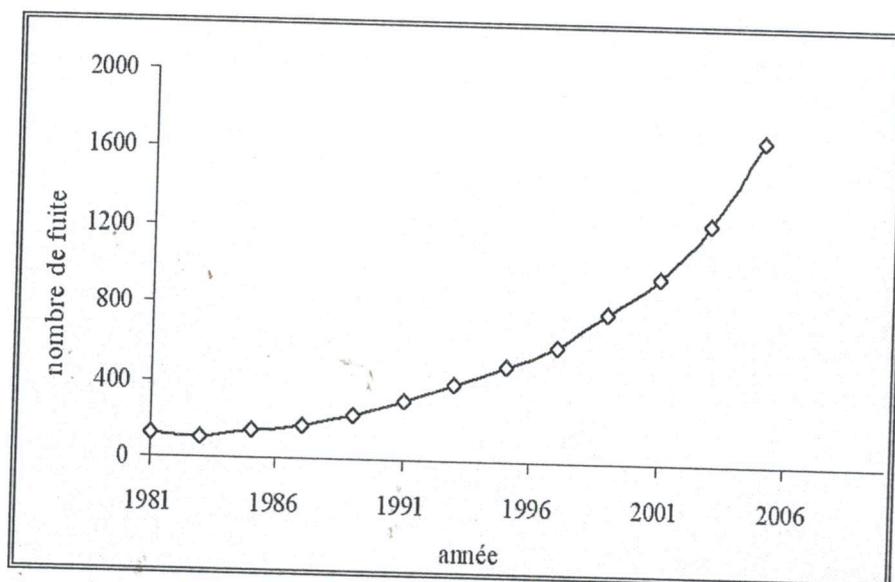


Figure.1.6 : Evolution des fuites en fonctions des années [29]

La majorité des fuites enregistrées sont la conséquence, selon l'auteur, à la fois de la corrosion interne, et de la corrosion externe. Ces fuites peuvent provoquer des accidents graves, comme l'incendie survenu le 21 septembre 2004, au niveau du gazoduc GZ2, reliant Hassi-R'mel à Arzew au niveau de la localité d'El-Ghomri où une vingtaine de mètres de canalisations ont été endommagées, suite à «un problème de corrosion» selon le ministre de l'énergie [30].

Globalement, il a été montré que l'origine des incidents, en Europe comme aux Etats-Unis, est due pour la majeure partie, à la corrosion (interne et externe) et à des activités de tiers, à proximité des ouvrages, comme le montre les données de l'OPS (Office of Pipeline Safety), consignées dans le tableau 1.4 ci-dessous, qui présentent à titre d'exemple les causes d'incidents produits aux Etats-Unis [31]:

Tableau. 1.4 : Causes d'incendies des pipelines aux USA. [31]

Causes	1999	2000	2001	2002
Activité de tiers (%)	17,3	24,5	22	28
Corrosion (%)	21,4	22,4	29	28
Défaillance mécanique	14,3	15	8	23
Erreur d'exploitation (%)	9,5	6,1	6	4
Autres (non identifiées)	37,5	32	35	17

Bien qu'elle soit le secteur clé de l'économie nationale, l'industrie pétrolière représente un danger potentiel et permanent pour l'environnement.

#### 1.5.1 Spécificité de la corrosion pétrolière

Du fait de la diversité à la fois des milieux rencontrés et des contextes industriels dans lesquels s'exerce la prévention, «la corrosion pétrolière» s'avère sans doute encore plus spécifique qu'ailleurs. Cette spécificité est probablement due aux enjeux économiques qui en découlent dès que l'on s'écarte un tant soit de la technologie.

A cet égard, on distingue en général la corrosion externe, où la variété des milieux est limitée et la technologie rapidement commune à la plupart des spécialistes, et la corrosion interne, où la variété est immense et le savoir-faire très variable.

##### 1.5.1.1 Corrosion externe

Si ce n'était la corrosion, l'ingénierie des installations pétrolière se ferait uniquement à base de mécanique et de coûts. Ceci signifie que le matériau de construction pratiquement universel est l'acier, et qu'il faut donc le protéger de la corrosion par l'environnement naturel. On regroupe alors sous le vocable de corrosion externe la corrosion par l'air, la mer et les sols. Nous aborderons dans ce qui suit la corrosion des pipelines par les sols.

### 1.6 Corrosion par les sols

De nombreux travaux ont été effectués afin d'estimer la corrosivité des sols. Différents pays ont développé des méthodes directement liées à la nature de leurs sols. On notera la « méthode hollandaise », utilisant le critère de Starkey et Wight [32], destinée à des sols marécageux, tourbeux, gorgés d'eau (polders), propices à une corrosion localisée (anoxie, sulfates, eau,...). La « méthode anglaise » [33] considère uniquement la résistivité et le « potentiel Redox » du sol. La France [34,35], l'Allemagne [36] et l'Italie [37] se basent sur des normes qui définissent, en premier lieu, un indice de corrosivité absolue en affectant des coefficients aux diverses caractéristiques du sol (nature, résistivité, teneur en eau, pH). Un indice de corrosivité relative prend en compte par ailleurs différentes hétérogénéités observées sur le tracé du futur ouvrage.

Un ouvrage réalisé aux Etats-Unis par Romanoff [38] pour le compte de National Bureau of Standards fait la synthèse de près de 45 années de retour d'expérience et d'études de laboratoire, aux Etats-Unis, sur les vitesses de « corrosion libre » de métaux dans les sols. Cet ouvrage, en dépit de son âge, constitue une base de données de référence et aussi une méthodologie d'évaluation de la corrosivité des sols.

Des approches plus récentes de type « pluridisciplinaire » ont été réalisées depuis une vingtaine d'années. Contrairement aux précédentes, ces études prennent en compte les phénomènes liés à la nature des revêtements et à la protection cathodique [39, 40] et montrent la complexité des processus de corrosion. Leur mérite a été de montrer de façon précise que le risque de corrosion doit être analysé en considérant conjointement les paramètres liés au revêtement (son mode de dégradation en service) mais aussi au sol. Le sol va, en effet, exercer une double influence : sur le risque de dégradation du revêtement, mais aussi, en fonction du mode de dégradation du revêtement, sur la nature des corrosions qui peuvent s'y développer, et ce en fonction du type de défaut de revêtement et des conditions locales (spatiales et temporelles) de « portée » de la protection cathodique. Schématiquement, on peut considérer que les propriétés corrosives des sols sont, dans une large mesure, déterminées par trois facteurs principaux (valeur instantanée et évolution dans le temps de ces facteurs) :

- ✓ La teneur en eau du sol qui dépend essentiellement des conditions climatiques locales, et des conditions de drainage.
- ✓ Les teneurs en oxygène et en gaz carbonique qui sont liées aux propriétés de drainage du sol, mais aussi aux conditions hydrologiques.
- ✓ La composition chimique de l'eau du sol qui est fortement déterminée par les réactions chimiques eau/substrat minéral du sol qui se produisent lors de la percolation des eaux de précipitation à travers les couches supérieures du sol.

Une autre spécificité des sols est la présence de perturbations électriques [41], parmi lesquels on peut noter les courants dits « vagabonds », dus aux courants de protection cathodique d'ouvrages tiers ou des lignes ferroviaires. Ensuite, peuvent être cités les courants induits par les lignes hautes tensions [42], et les courants telluriques [43] capables de générer une corrosion locale au droit des défauts de revêtement.

#### 1.6.1 Facteurs agissants sur la corrosion des ouvrages métalliques enterrés

Le sol est un amalgame complexe de solides, liquides et gaz, qui font qu'il est parfois agressif, ce qui conduit à des corrosions extrêmement rapides, mais qu'il est dans certains cas, parfaitement inerte et n'a qu'une action tout à fait négligeable. L'agressivité absolue du sol pour un métal découle de ses propriétés physiques et chimiques, L'appréciation de celle-ci est relative à la mesure de la résistivité électrique.

##### 1.6.1.1 Résistivité du sol

La résistivité électrique  $\rho$  est un paramètre familier des géophysiciens, moins pour les pédologues qui emploient préférentiellement son inverse la conductivité électrique  $\sigma$  pour caractériser la salinité des sols, la minéralisation de la solution du sol ou de l'eau des aquifères. La résistivité d'un horizon de sol est sa capacité à limiter le passage du courant électrique. Cette faculté est étroitement liée à ses caractéristiques intrinsèques.

D'une manière simple et si l'on fait une analogie avec le fil de cuivre d'un circuit électrique, la résistivité  $\rho$  d'un échantillon cylindrique de sol ou le roche peut être mesurée entre les deux plaques conductrices de surface  $S$ , formant les sections opposées d'un cylindre de longueur  $L$  et dont les parois isolantes contiennent l'échantillon.

Lorsqu'on relie les deux plaques conductrices à un générateur de courant, la résistivité de l'échantillon est :

$$\rho = \frac{SV}{LI} = \frac{1}{\sigma} \quad (1.11)$$

La résistivité électrique  $\rho$  s'exprime en ohm.mètre ( $\Omega.m$ ), pour  $S$  en  $m^2$ ,  $L$  en  $m$ ,  $V$  en volt (V) et  $I$  en ampère (A). On inverse la conductivité,  $\sigma$  s'exprime en siemens par mètre ( $S.m^{-1}$ ) [44].

L'évaluation de l'agressivité des sols est relative à la mesure de la résistivité, cette dernière très complexe du fait qu'elle dépend de facteurs géologique et métrologique qui peuvent avoir un effet considérable sur l'exactitude de ces valeurs [45].

La corrosivité augmente avec l'abaissement de la résistivité du sol tel que montré dans le tableau suivant [46].

Tableau. 1.5 : Vitesse de corrosion en fonction de la résistivité des sols [46]

Résistivité de sol (Ohm- mètre)	Classe selon la vitesse de corrosion ( $10^6$ mm/an)
< 25	Très corrosive (> 13)
≈ 26-50	Modérément corrosive (9-12)
≈ 51-100	Moyennement corrosive (4-9)
≈ > 100	Très moyennement corrosive (<4)

Un découpage est corroboré par l'analyse des cas de corrosion survenus sur un réseau de conduites en service où la proportion des incidents apparaît directement être en relation avec la résistivité [13] :

Tableau 1.6. Evolution du nombre de perforations en fonction de la résistivité des sols [13]

Résistivité du sol en ( $\Omega.m$ )	Nombre de perforations en % du nombre total de perforations observées
<500	50.2
500 à 1 000'	18.5
1 000 à 2 000	20.5
2 000 à 5 000	9.6
5 000 à 10 000	0.3
> 10 000	1.4

La résistivité ne représente pas tous les phénomènes qui entraînent la corrosion du métal ; ce n'est pas un critère formel de décision, mais plutôt un critère d'orientation, à cet effet nous citerons les différents facteurs favorisant l'effet corrosif du sol".

#### 1.6.1.2 Paramètres constitutifs des sols influençant la résistivité électrique

Les facteurs influant sur la valeur de la résistivité électrique sont largement décrits dans la littérature. Nous le rappelons ici, en précisant que la conduction du courant électrique dans les sols est essentiellement électrolytique et fait intervenir le déplacement des ions en solution dans l'eau interstitielle. La conduction électrolytique est réalisée grâce aux connections interstitielles du sol dont la matrice est généralement considérée comme isolante ; les autres modes de conduction, électronique ou les charges sont transitées par le déplacement des électrons libres dans les métaux et diélectrique faisant intervenir les courants de déplacement sous l'influence de champs de très haute fréquence [44].

##### 1. Influence du pH

Pour identifier les différents sols (en particulier les sulfatosols), le pH est le principal paramètre chimique qui sert à les définir. En effet, mesuré sur place et parfois enregistré par des sondes spécifiques [42], il est généralement voisin de la neutralité ou très légèrement acide entre 6 et 7.

Mesuré sur échantillon séché à l'air, il peut diminuer à des valeurs inférieures à 4, voire 3,5. L'acidité qui se développe au cours du séchage des échantillons provient surtout de l'oxydation de la pyrite avec production d'acide sulfurique ; elle est appelée acidité potentielle et correspond à la différence « pH in situ – pH sec ».

Le rôle du pH dans les phénomènes de corrosion est relativement bien connu à ce jour. Les travaux de référence en ce domaine sont ceux de Pourbaix [21]. D'autres ont confirmé l'effet bénéfique d'un pH élevé sur la limitation de la dissolution anodique du fer dans l'eau (formation d'une couche protectrice de produits de corrosion). Par ailleurs, des conséquences néfastes sur les liaisons adhésives métal/revêtement ont été mises en évidence.

L'une des raisons de l'élévation du pH du milieu aqueux au contact du métal est l'application de la protection cathodique à une canalisation directement en contact avec un électrolyte chargé en oxygène.

En milieu aéré, les courants générés par la PC réduisent l'oxygène et forment des anions  $\text{OH}^-$  selon la réaction suivante:

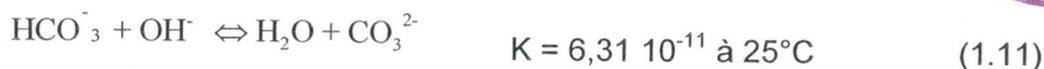


Le potentiel d'équilibre thermodynamique s'exprime par :

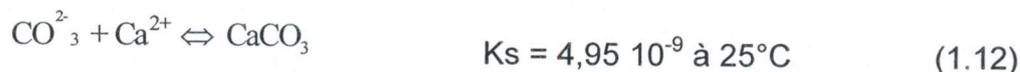
$$E^\circ = 1.228 - 0.058 \text{ pH} - 0.0295 \log P(\text{O}_2) \text{ [V/ENH]} \text{ à } 25^\circ\text{C} \quad (1.12)$$

Cette augmentation de pH a été vérifiée expérimentalement et sur le terrain par de très nombreux auteurs [47, 48, 49] sous des revêtements décollés, pour différents types d'acier et de solutions aérées. En solution désaérée le pH n'accuse pas d'augmentation et, malgré la PC, la seule réduction de l'eau à des pH neutres ne peut entraîner une alcalinisation importante [50].

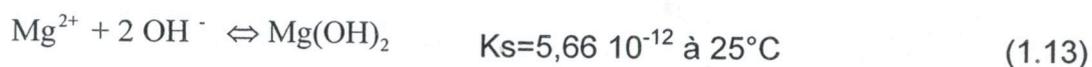
De plus l'augmentation de pH joue un rôle très important dans les phénomènes de corrosion en milieu sol, en effet, certains composés en solution peuvent précipiter avec l'augmentation de pH. Il est connu que la présence de calcium et de magnésium peut conduire à la formation de dépôts calco-magnésiens à partir des défauts de revêtements, selon les réactions suivantes :



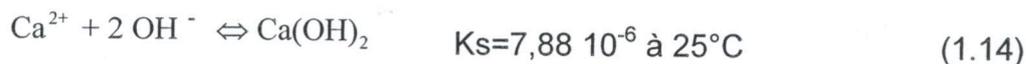
En présence d'ions calcium, il y a précipitation de carbonate de calcium :



En présence d'ion  $\text{Mg}^{2+}$ , et en milieu alcalin, il y a précipitation d'un hydroxyde de magnésium. La valeur exacte du pH de précipitation est fonction de la quantité de sels en présence mais est toujours supérieure à celle de précipitation des  $\text{CaCO}_3$ .



Casanova [51] propose un pH de précipitation de 9,7 pour  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  en eau de mer artificielle [52]. Une réaction identique est susceptible de se produire à des pH plus élevés (12,9) avec les ions  $\text{Ca}^{2+}$ .



Il est aussi à noter les éventuels produits de corrosion dans lesquels les cations fer peuvent intervenir [53], notamment dans la formation de produits tels que  $\text{FeCO}_3$ .

Enfin, des modifications locales de pH, à potentiel constant, peuvent faire passer le métal d'un état de corrosion à un état d'immunité ou de passivation comme le montrent les diagrammes de Pourbaix (Figure 1.3.).

Le rapport général entre les valeurs du pH et la corrosion correspondante est montré dans le tableau suivant [54].

Tableau. 1.7 : Taux de corrosion à différente valeur de pH des sols [54]

Caractéristiques du sol	Valeur du pH	Taux de corrosion
Milieu extrêmement acide	< 4.5	Très forte corrosion
Acide très fort	4.5-5.0	corrosion faible
Acide fort	5.1-5.5	
Acide moyen	5.6-6.0	
Acide faible	6.1-6.5	
Milieu neutre	6.6-7.3	
Alcalinité moyenne	7.4-7.8	corrosion très élevée
Forte alcalinité	8.5-9.0	
Très forte alcalinité	9.1 et plus	

## 2 Humidité

Sans constituer à vrai dire un facteur intrinsèque du sol, l'humidité est un facteur complémentaire, qui va jouer un rôle important sur les processus de corrosion, par son incidence sur la résistivité et sur l'aération [13].

Ce facteur dépend de la saison, endroit, type de sol, niveau d'eaux souterraines ; en présence de sols très humides autrement dit de sels très solubles, la corrosion se développe très fortement [46].

## 3 Aération

L'aération est une mesure de la présence de l'oxygène au contact du métal déclenchant le processus de corrosion. Les caractéristiques d'aération d'un sol dépendent principalement de la dimension des particules ; il est remarqué que la propagation de la corrosion diminue avec l'augmentation du taux d'aération.

### 1.6.1.3 Éléments chimiques présents dans le sol

On distingue dans un sol des constituants solubles et des constituants insolubles.

L'ensemble des anions et cations influenceront la force ionique de l'eau du sol et sa résistivité. Ils joueront dans l'eau du sol un rôle analogue à celui qu'on leur connaît dans les eaux salines [13].

Une attention particulière est portée aux chlorures et aux sulfates qui sont des éléments défavorables, leur effet néfastes apparaît respectivement pour des concentrations supérieures à 100 mg/kg et 200 mg/kg, tant par l'abaissement de résistivité qu'ils entraînent, que par leur rôle propre : action dépassivante des chlorures, intervention des sulfates dans les processus de corrosion bactérienne.

Actuellement on cherche à modéliser l'action de chacun des facteurs susceptibles de jouer un rôle et à juger ensuite de la corrosivité du sol d'après le résultat d'une formule empirique.

Dans le but d'estimer la vitesse de corrosion d'acier enfouie dans le sol et de concevoir les méthodes de protection, la (National Institute of Standards and Technology) NIST a développée un modèle de type  $Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$  regroupant la résistivité du sol, la valeur du pH, l'humidité et l'aération [51].

Avec, Y : vitesse de corrosion (mils (1.6 km)/an)

$X_1$  : Résistivité (ohm.cm)

$X_2$  : pH

$X_3$  : Humidité (%)

$X_4$  : Aération (%)

Après plusieurs itérations le modèle est donné comme suit :

$$y = 3.36 - 9.63 \cdot 10^{-5} \cdot X_1 + 0.29 \cdot X_2 + 0.034 X_3 + 0.012 X_4 \quad (1.12)$$

Ce modèle peut être appliqué pour différents sols.

### 1.7 Généralités sur les différents types de corrosion dans le sol

Le sol étant un système à trois phases : une phase solide constituée par des débris minéraux ou organiques, une phase liquide : l'eau, une phase gazeuse : air ou autres gaz. C'est un milieu poreux, hétérogène et discontinu, souvent colloïdal, ou l'eau peut avoir des liaisons physico-mécaniques, physico-chimiques ou chimiques [13].

Le comportement à la corrosion de toutes les canalisations enterrées, qu'il s'agisse de réseaux de distribution d'eau, de gaz, de chauffage urbain, d'électricité, etc.... est sans doute un des problèmes les plus difficiles à maîtriser et à contrôler à, plus ou moins, long terme [55].

Les différents types de corrosion de pipes rencontrées dans les sols se présentent comme suit :

#### 1.7.1 Corrosion électrochimique : piles de corrosion

Un sol humide pouvant être considéré comme un électrolyte, il est fondé de considérer les processus de corrosion des métaux dans le sol du point de vue de la théorie électrochimique. Il faudra toutefois tenir compte des particularités de cet électrolyte qui consiste en un système hétérogène, capillaire, poreux, souvent colloïdal, dont les caractéristiques ne sont pas uniformes tant à l'échelle microscopique qu'à l'échelle macroscopique.

Du point de vue de la théorie électrochimique, la corrosion d'un métal dans un sol résulte comme dans un électrolyte de l'activité de piles dites « piles de corrosion ». Cependant on distingue trois types de pile corrosion.

##### 1.7.1.1 Piles dues à l'électrolyte (Piles géologiques) [55].

Les piles géologiques sont caractéristiques des actions qui peuvent se développer sur une conduite, ouvrage métallique de grande longueur et parfaitement homogène, traversant des sols de compositions différentes, lui conférant des potentiels locaux différents, donnant naissance à un courant qui conduit à l'oxydation de la partie la plus négative du métal. Les zones soumises à une sortie de courant vont se corroder, Ce sont celles qui ont les potentiels les plus négatifs.

En général, les sols argileux, marécageux et les terrains humides constituent zones anodiques vis à vis des autres terrains, (zones argileuses dans l'exemple ci-dessous, figure 1.7).

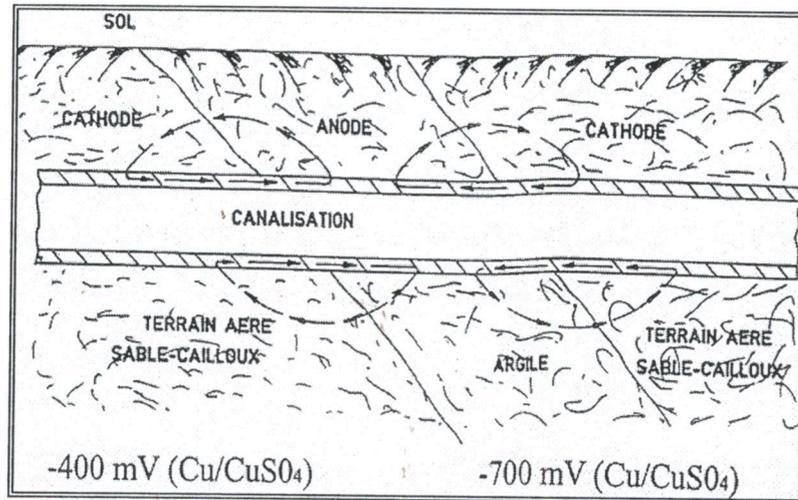


Figure. 1.7 : Piles de corrosion géologique [55].

#### 1.7.1.2 Piles dues à l'association de métaux différents (couplage galvanique)

On a vu que le contact électrique de 2 métaux différents dans un même sol entraînait la corrosion de celui dont le potentiel est le plus négatif. Il est donc possible de prévoir le sens des réactions galvaniques en mesurant et en comparant les potentiels des métaux.

Le contact électrique entre une conduite en acier et des métaux tels que le cuivre, plomb, la fonte et même l'acier oxydé, entraîne une corrosion de l'ouvrage en acier. Les piquages directs sur les conduites de gaz, réalisés en cuivre ou en fonte sont néfastes pour la conduite en acier, de même que son raccordement, au niveau d'une installation gazière, à un réseau de terres électriques en cuivre. Ces phénomènes de couplage décrits pour une conduite, existent bien entendu également à l'échelle macroscopique au niveau d'une soudure, en raison, par exemple, des disparités entre le métal de base et le métal d'apport, et même à l'échelle microscopique au niveau des inclusions ou hétérogénéités du métal tel que montré dans les figures 1.8 et 1.9.

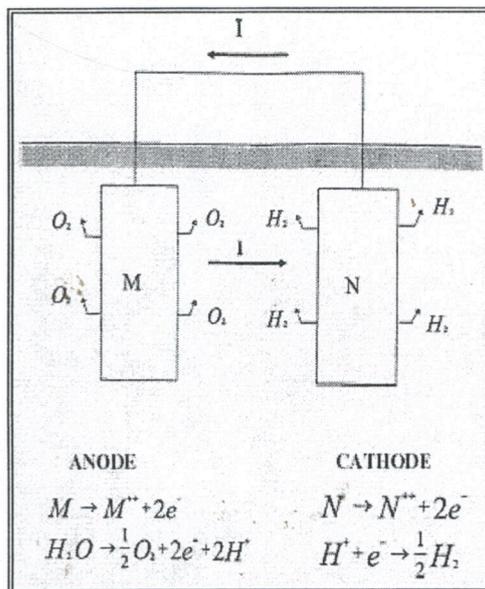


Figure.1.8 : Corrosion galvanique par couplage de deux métaux [55].

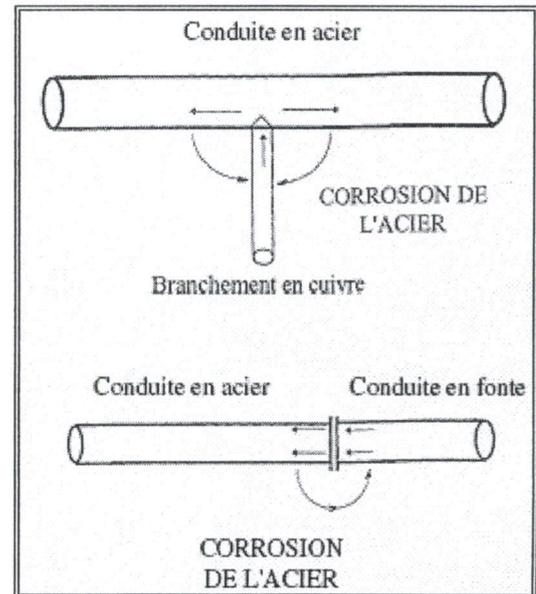
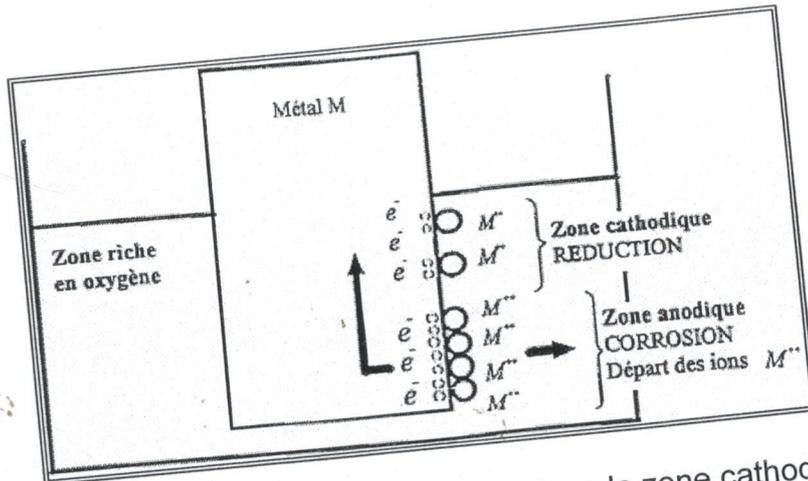


Figure.1.9 : Exemples de couples galvaniques [55].

### 1.7.2 Corrosion par Aérations différentielles

Les phénomènes d'aérations différentielles sont à énumérer dans ce chapitre. Les zones les moins aérées sont des zones anodiques par rapport au reste de l'ouvrage et se corrodent donc plus facilement.

C'est ainsi que s'expliquent les corrosions des pieux métalliques sous la ligne d'eau, le creusement jusqu'au percement, de cavités mal aérées, ou bien la corrosion d'un ouvrage recouvert de façon discontinue par des oxydes, de la calamine, ou d'autres dépôts. Ce phénomène est responsable des corrosions situées sur la génératrice inférieure des tubes en fond de fouille, là où l'oxygène de l'air diffuse le moins, ainsi que des corrosions qui apparaissent au niveau des sols dont l'aération n'est pas la même en tous points (sable ou cailloux et argile par exemple), voir (Figure 1.10).



Réactions électrochimiques possibles dans la zone cathodique:

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

$$O_2 + 4 e^- + 4 H^+ \longrightarrow 2 H_2O$$

Exemples:

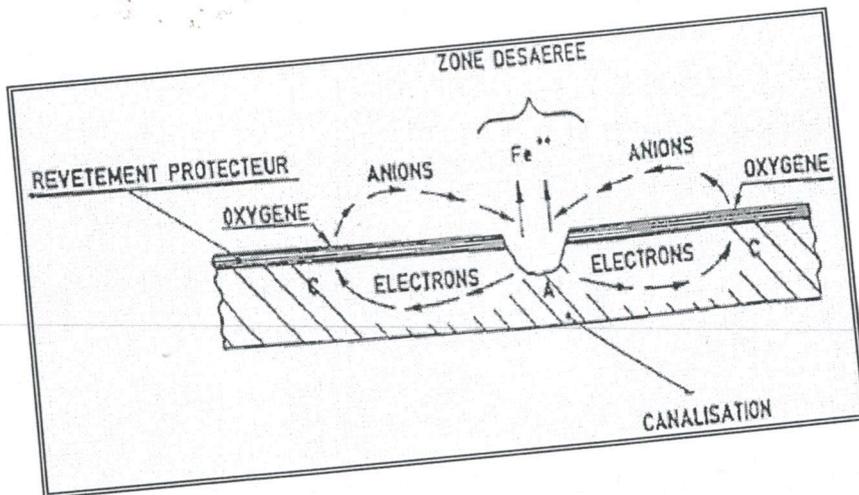


Figure. 1.10 : Phénomène d'aération différentielle [55]

### 1.7.3 Corrosion Bactérienne

Dans l'industrie pétrolière, il s'agit de la corrosion bactérienne induite par les bactéries sulfurogènes en milieu anaérobie [56]. La corrosion bactérienne rassemble tous les phénomènes de corrosion où les bactéries agissent directement, ou par l'intermédiaire de leur métabolisme, jouant un rôle primordial, soit en accélérant un processus déjà établi, soit en créant les conditions favorables à son établissement.

Certaines bactéries consomment l'hydrogène produit au niveau des microcathodes, permettant ainsi à la corrosion de se poursuivre, et transformant les sulfates en sulfure de fer, lorsque les colonies de microorganismes se fixent à la surface du matériau, elles créent ce que l'on appelle alors un bio film tel que montrer sur la figure 1.11. [57].

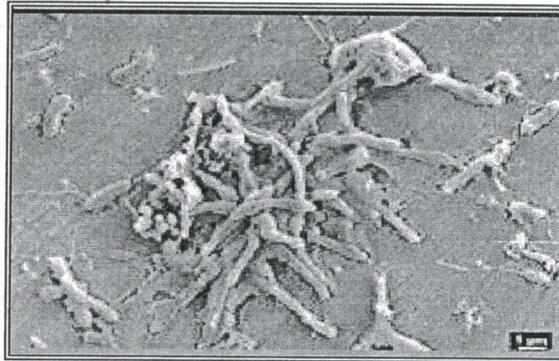


Figure. 1.11 : Colonie de *Desulfovibrio vulgaris* (BSR) sur acier inoxydable [12]

Les développements de colonies bactériennes sont en effet fréquentes dans de nombreux milieux (sols ; eau, etc.), et peuvent avoir différentes incidences sur les métaux [58].

- Productions de substances corrosives (acides organiques ou minéraux, sulfures, substances complexantes),
- Dépolarisation cathodique associée à des développements anaérobies. Les bactéries anaérobies (bactéries se développant en absence d'oxygène), peuvent en effet accélérer la réaction de réduction des ions  $H^+$  en hydrogène par émission de substances pouvant jouer le rôle de catalyseur ( sulfures, enzymes,...) ,
- Modifications locales d'environnement provoquant des différences de potentiels de corrosion en différentes zones du même métal. Il en résulte l'établissement d'une corrosion de type caverneuse. Les modifications d'environnement peuvent intéresser l'aération, le pH, les concentrations salines, etc.,
- Dégradation de substances protectrices (dégradation des revêtements protecteurs de canalisations enterrées par exemple).

- La corrosion bactérienne peut provoquer des dégradations rapides dans des milieux dont la corrosivité à l'état stérile est faible. Certaines zones de conduites enterrées par exemples subissent une corrosion pouvant aller jusqu'au percement alors que les régions non exposées aux bactéries sont pratiquement intactes.

En milieu aqueux non aéré et proche de la neutralité ou basique par contre, où la vitesse de corrosion des aciers est limitée par celle de la réaction cathodique de réduction des ions  $H^+$  et est donc normalement assez lente, des attaques sévères ont pu être constatées et attribuées aux bactéries, sulfatoréductrices (SRB).

#### 1.7.4 Corrosion par les courants vagabonds

Dans les sols, on a souvent affaire à des courants vagabonds. Tout écoulement de courant continu dans le sol, ligne de traction avec retour par les rails (tramways, métro), usines électrochimiques comportant des cuves à électrolyse, etc...., peut alors être cause de corrosion importante.

En effet, ces courants empruntent dans le sol des chemins de moindre résistance électrique, canalisations par exemple, créant sur un même matériau des zones à des potentiels électrochimiques différents (figure 1.12). Les surfaces par où entrent les courants vagabonds sont plus électronégatives que le sol. Ces courants apportent des électrons à l'interface métal/sol où il se produit une réduction; les surfaces par où sortent les courants sont devenues plus électropositives que le sol; à cet endroit une corrosion du métal se produira inévitablement.

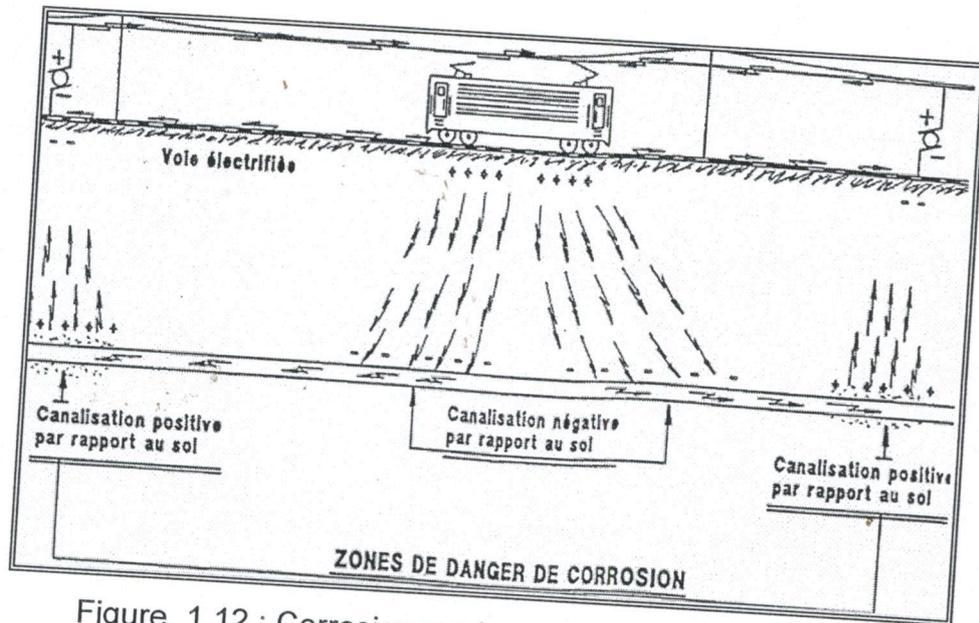


Figure. 1.12 : Corrosion par les courants vagabonds [13]

L'importance de la corrosion est directement proportionnelle aux intensités mises en jeu (la Loi de Faraday donne pour l'acier une consommation d'environ 10 kg par ampère et par an).

Or il n'est pas rare de voir transiter des courants de plusieurs dizaines d'ampères dans les conduites. Les pertes de métal se chiffrent alors en grammes par heure, et des percements de conduites peuvent alors se produire en quelques semaines.

On pourrait citer des cas où ce phénomène s'est produit avant même que la conduite ne soit en service et que les moyens de lutte contre la corrosion n'aient été mis en œuvre.

## CHAPITRE 2

### PROTECTION ET MOYENS DE LUTTE CONTRE LA CORROSION DES CANALISATIONS PETROLIERES

La prévention de la corrosion doit commencer déjà dans la phase de la conception. En d'autres mots, on doit prendre en considération la corrosion depuis le début d'un projet et jusqu'à sa réalisation. Il s'agit de garantir une certaine durée de vie (25ans d'une canalisation de gaz par exemple) pour un coût minimal, comprenant tant les frais d'investissement que d'entretien. En plus, la solution adoptée doit être compatible avec les prescriptions concernant la protection de l'environnement naturel, et doit permettre le recyclage ou l'élimination des différents composants à la fin de leur utilisation.

La protection contre la corrosion des conduites métalliques enterrées (pipelines) soumises à l'action corrosive du milieu (sol) est assurée par l'application conjointe d'un revêtement protecteur épais et d'une protection électrochimique par un système de protection cathodique.

Nous présentons dans ce chapitre une synthèse permettant de mieux cerner les spécificités de lutte contre la corrosion dans le cas des canalisations de transport enterrées.

Vu les dommages importants causés par la corrosion, il est impératif de prendre des mesures adéquates pour lutter contre ce fléau. Ces mesures doivent être prises en considération dès la phase de planification de tout projet.

La lutte contre la corrosion englobe les méthodes suivantes [15] :

- ❖ Prévention par une forme adaptée des pièces,
- ❖ Prévention par un choix judicieux des matériaux,
- ❖ Protection par revêtement,

- ❖ Protection par inhibiteurs,
- ❖ Protection électrochimique (protection cathodique).

On en déduit que tout moyen d'action pour prévenir et lutter contre la corrosion concernera l'un des trois éléments du système matériau surface- milieu.

## 2.1 Protection contre la corrosion interne

### 2.1.1 Protection par l'ajout d'inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion sont utilisés à tous les stades de l'élaboration des produits pétroliers, depuis l'extraction, jusqu'au stockage. Les formulations utilisées sont le plus souvent à base de produits organiques, mais aussi à base de molécules inorganiques [59]. Par ailleurs, un inhibiteur de corrosion est défini selon la norme ISO 8044 [60] comme : « une substance chimique ajoutée au système de corrosion à une concentration choisie pour son efficacité, et qui entraîne une diminution de la vitesse de corrosion sans modifier de manière significative la concentration d'aucun agent corrosif contenu dans le milieu considéré ». Ces inhibiteurs, composés minéraux ou organiques, favorisent la polarisation anodique et/ou cathodique et diminuent l'intensité du courant de corrosion. Ils peuvent agir, soit par réaction à la surface du substrat, soit par adsorption [15].

### 2.1.2. Protection par l'application de revêtements internes

L'application de revêtements à des canalisations a essentiellement pour but :

- ✓ D'une part, de prévenir la corrosion, empêchant ainsi la formation de poussières provenant de l'attaque de la surface interne du métal, cette corrosion peut se produire lors du stockage des tubes, à la suite de l'épreuve hydraulique que la canalisation subit après pose, et enfin en service, si le gaz transporté sous pression contient des composants pouvant devenir agressifs en présence d'eau à l'état de vapeur, de gouttelettes ou de condensation (gaz carbonique, oxygène, hydrogène sulfuré,.....).

D'autre part, d'améliorer très sensiblement l'écoulement du gaz par suite de la diminution des pertes de charge dues aux rugosités de surface, conduisant ainsi à une augmentation de la capacité de transport de l'ordre de quelque % en général.

### 2.1.3 Types de revêtements internes utilisés :

Les différents types de protection employés pour le revêtement interne sont principalement à base de résines thermodurcissables se présentant soit sous forme liquide, soit sous forme pulvérulente [12].

Les diverses familles de produits susceptibles d'être utilisées sont :

- ✓ Pour les systèmes polymérisables à froid :
  - Les résines époxydes à durcisseur polyamide ou aminé;
  - Les résines polyuréthane ;
  - Les associations brai de houille-résines époxydes ou polyuréthane.
- ✓ Pour les systèmes polymérisables à chaud :
  - Les résines époxydes formophénoliques;
  - Les résines en poudre à base de résines époxydes et éventuellement de résines thermoplastiques comme le polyamide 11.

## 2.2 Protection contre la corrosion externe

### 2.2.1 Revêtements associés à la protection cathodique

L'intérêt de protéger les canalisations à l'aide de revêtements organiques est double. En effet, les processus de corrosion font intervenir l'eau en tant qu'électrolyte, et divers oxydants susceptibles de capter des électrons libérés par l'oxydation du métal.

Le rôle du revêtement est donc de limiter le flux de ces produits en créant une barrière physique, d'épaisseur variable, neutre vis-à-vis du milieu extérieur et du support ; selon ses qualités propres (nature, épaisseur, étanchéité, adhérence, inaltérabilité, résistances physico-chimique, mécanique, etc.) cette barrière peut suffire à la protection du support.

Ces revêtements épais (quelques millimètres) ont par ailleurs une fonction de protection mécanique du tube lors du remblai des fouilles, bien que ce ne soit pas le rôle principal. Cette protection n'est cependant pas totalement efficace car l'expérience a montré que la majorité des défauts de revêtement constatés sur les canalisations a été engendrée par des pierres tombées sur le tube ou ayant percé le revêtement [14].

L'aspect des revêtements associés à la protection cathodique qui constituent un paramètre essentiel pour la réussite de la protection ainsi que les contraintes et les effets qu'ils subissent au cours de l'application de la PC seront abordés dans le prochain chapitre avec plus de détails.

### 2.2.2 La protection cathodique

La mise en place d'un système de protection cathodique est actuellement considérée comme indispensable pour les structures métalliques en contact avec un milieu conducteur (électrolyte) en complément d'une protection organique (revêtement).

Cette technique, basée sur des principes électrochimiques est développée sous deux modes différents [63] :

- Création d'une pile artificielle bloquant la réaction naturelle de corrosion du métal

(Phénomène électrochimique), en fournissant au métal à protéger un excès d'électrons afin d'empêcher le transfert des cations dans la solution : **Protection cathodique par anodes sacrificielles.**

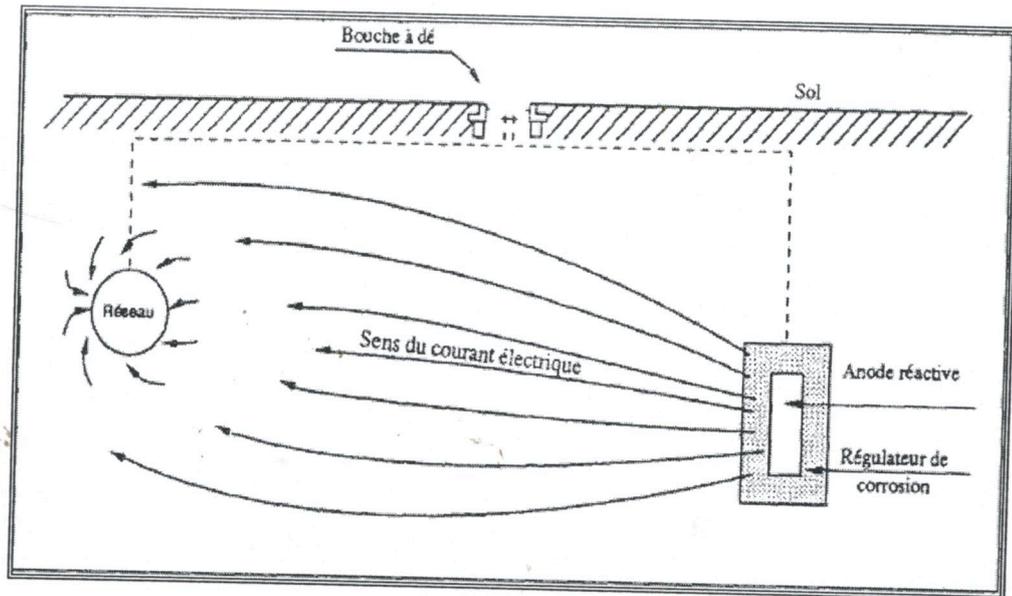


Figure. 2.1 : Protection Cathodique d'un réseau métallique par anodes sacrificielles

- Circulation d'un courant électrique continu dans l'électrolyte entre une masse anodique et le métal à protéger : **Protection cathodique par courant imposé dit soutirage de courant**

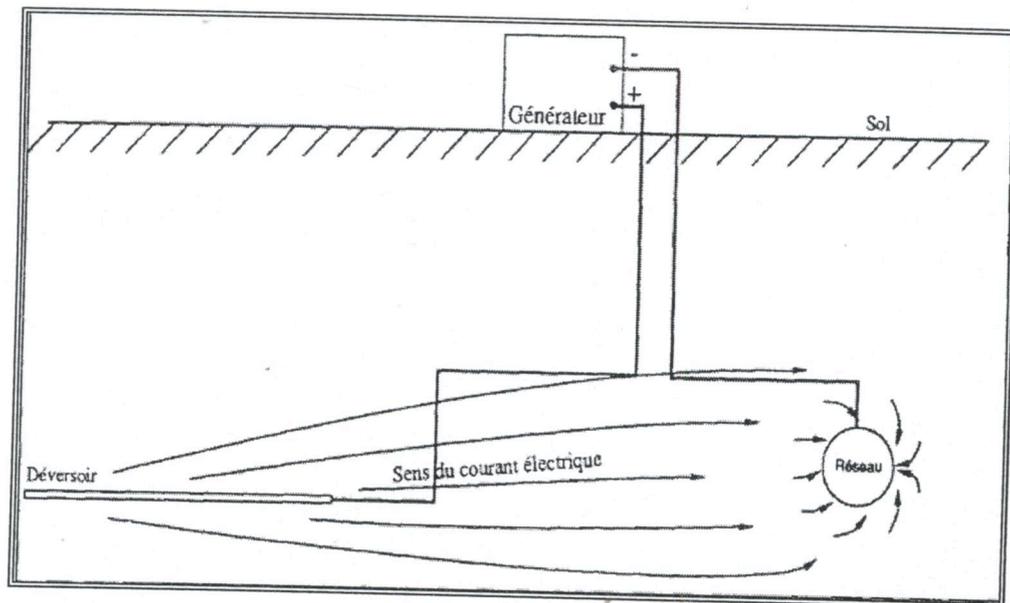


Figure. 2.2 : Schéma descriptif de la Protection Cathodique d'un métal par soutirage de courant

Même si le principe se révèle simple, la mise en œuvre reste délicate aussi bien du point de vue dimensionnement (entre autres, action sur la masse anodique) que du point de vue vérification de l'efficacité (maintenance, monitoring, durée de vie).

### 2.2.2.1 Principe de la Protection Cathodique

A partir des constatations établies ci-dessus, on peut imaginer la possibilité de créer la circulation d'un courant électrique entre un métal et la solution qui l'entoure, circulation telle que le sens du courant passe de la solution vers le métal, et de favoriser ainsi la réaction cathodique au niveau de ce métal que l'on veut protéger contre la corrosion, en reportant la réaction d'oxydation sur une autre structure, dont on accepte a priori la dégradation. C'est le principe de la protection cathodique.

Plus explicitement, La protection cathodique consiste en l'abaissement du potentiel de la structure à protéger, à un niveau suffisamment bas, pour que la corrosion soit éliminée [64].

La figure 2.3, donne une représentation selon Evans du potentiel en fonction de l'intensité. On y voit que lorsque tout point de l'ouvrage aura atteint le potentiel  $E_p$  et comme  $E_p$  est inférieur à  $E_a$ , point de la courbe où le courant anodique est nul, il n'y a plus de réaction d'oxydations possibles, l'ensemble sera devenu une seule cathode annulant de ce fait le courant de corrosion ( $i_{corr}$ ) par un courant de protection minimale ( $i_{prot.min}$ ). On a alors réalisé la protection cathodique du métal.

On peut abaisser l'ensemble à un potentiel plus bas que  $E_p$  avec un courant  $i_p$ . Il faut remarquer que le courant  $i_p$  est toujours supérieur au courant de corrosion  $i_{corr}$  et qu'il dépend des pentes respectives des courbes de l'anode et de la cathode.

En contrepartie, il est nécessaire de fournir, par un système extérieur des électrons en quantité suffisante. Ce flux d'électrons est mesuré par l'intensité  $i_p$  [65].

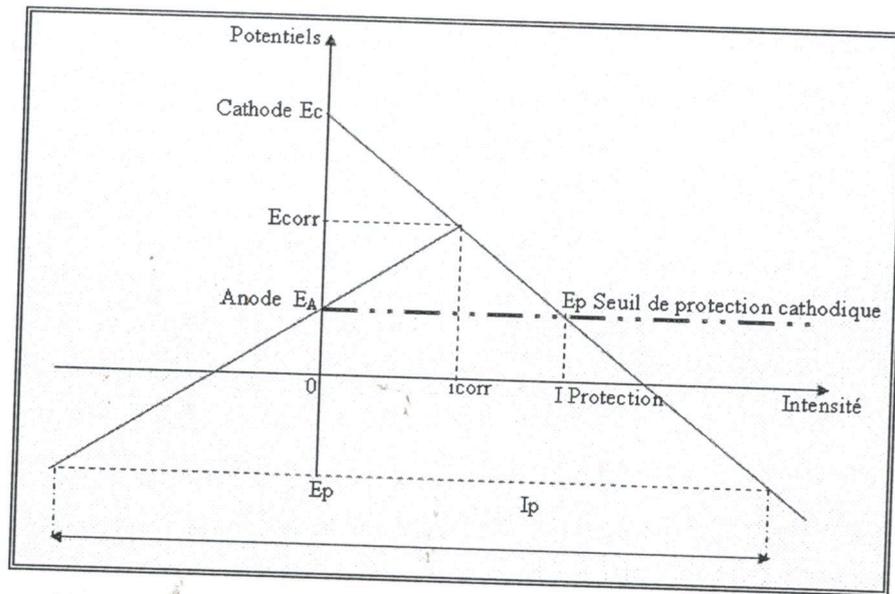


Figure. 2.3 : Représentation selon Evans du principe de la protection cathodique par courant imposé

#### 2.2.2.2 Critères et notions de base de la protection cathodique

##### a) Potentiel de protection [13]

Si le principe est simple, l'application est plus difficile. C'est pourquoi les praticiens ont adopté plusieurs critères de protection cathodique souvent basés sur l'expérience.

Le critère le plus utilisé est celui de « Pourbaix » qui a permis de déterminer le seuil d'un métal plongé dans une solution en équilibre avec ces ions. Ce seuil est déterminé à l'aide de diagrammes théoriques dont la construction est basée sur les équilibres chimiques et électrochimiques tels que montré dans le chapitre 1.

Le (NBS) « National Bureau Standard » aux Etats-Unis a fait de nombreux essais de laboratoire dans des sols naturels très divers, et a admis pour l'acier dans le sol, la valeur seuil d'immunité de (-850 mV) par rapport à l'électrode de référence (Cu/CuSO<sub>4</sub>). Ce chiffre est retenu dans le document standard de (NACE) (National Association Corrosion Engineering's).

Si le potentiel d'un métal est égal ou inférieur au potentiel de protection  $E_{prot}$ , la vitesse de corrosion ne peut pour des raisons thermodynamiques dépasser une certaine valeur que l'on suppose négligeable. On peut donc protéger un métal en lui imposant un potentiel tel que :

$$E \leq E_{prot}$$

On définit le potentiel de protection  $E_{prot}$  par l'équation de NERNST suivante :

$$E_{prot} = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln 10^{-6} \text{ (mole/l)} \quad (2.1)$$

Cette relation est prise pour une concentration d'ions métalliques dissous de  $10^{-6}$  mole/l (seuil de protection). Pour la température ambiante ( $25^\circ\text{C}$ ), elle devient :

$$E_{prot} = E^0 - 0.354/n \quad (2.2)$$

- On ne passe pas brutalement d'un état de corrosion à un état d'immunité par le simple franchissement de ce critère de protection de - 850 mV. L'expérience prouve qu'à cette valeur de - 850 mV, le taux de corrosion est suffisamment faible pour que ce potentiel soit considéré comme frontière du domaine d'immunité (la concentration théorique d'ions métalliques dans l'eau est alors de  $10^{-6}$  mol/l ce qui correspond à 56 µg de fer par litre).
- On a admis comme critère de protection du fer dans l'eau et le sol, et pour des pH ne dépassant 10, la valeur de - 850 mV avec l'électrode Cu/CuSO<sub>4</sub>. Ce critère doit être porté à - 950 mV si le sol est particulièrement compact et contient des bactéries sulfatoréductrices.

En pratique, pour des raisons de sécurité on cherchera plutôt à atteindre un seuil de protection fixé empiriquement pour l'acier à -1000 mV par rapport à l'électrode Cu/CuSO<sub>4</sub>.

- On constate dans le diagramme de Pourbaix pour les pH d'électrolytes très alcalins, l'existence d'un domaine de corrosion du fer pour des potentiels compris entre - 1100 et - 1300 mV. C'est le cas du fer dans le béton qui se corrode par formation de ferrates de calcium. Ces circonstances de potentiel seront donc à éviter dans un tel milieu.

b) Densité de courant de protection

La densité de courant nécessaire à l'obtention du seuil de protection est fonction du matériau à protéger et des paramètres physico-chimique de l'électrolyte au contact de celui-ci. Elle augmente quand le pH diminue, la teneur en oxygène dissous augmente ou la vitesse de circulation augmente [13].

Le courant cathodique nécessaire pour imposer le potentiel de protection correspond au courant de protection  $I_{prot}$  dépend de la surface à protéger  $A$  et de la densité de courant de protection  $i_{prot}$  tel que montré dans l'équation suivante :

$$I_{prot} = i_{prot} A \quad (2.3)$$

Cette relation donne  $i_{prot}$  pour une réaction dont la cinétique obéit à l'équation de Butler-Volmer.

$$I_{prot} = i_c = -i_{corr} \exp \left[ -\frac{E_{prot} - E_{corr}}{\beta_c} \right] \quad (2.4)$$

D'une manière générale, l'ordre de grandeur des valeurs prises dans les calculs de dimensionnement des systèmes de protection cathodique est donné ci-après en fonction des milieux électrolytiques au contact de l'acier à protéger tel que montré dans le tableau suivant :

Tableau. 2.1 : Valeurs moyennes de densité de courant de protection [66]

Electrolyte	Densité de courant mA/m <sup>2</sup>
Eau douce froide en mouvement	50
Eau douce chaude aérée	150
Eau de mer	60 à 220
Fonds marins	25 (initial) à 20 (maintien)
Sols secs	10
Sol humide agressif	30
Acier enrobé de béton	0,1 à 10

### 2.2.2.3 Champs d'application de la protection cathodique [13]

#### a) Ouvrages au contact du sol

- ❖ canalisations de produits pétroliers liquides, de gaz combustibles ou d'autres fluides de types produits chimiques.
- ❖ L'extérieur des cuvelages de puits (pétrole, gaz).
- ❖ Les réservoirs enterrés.
- ❖ Réservoirs (cylindriques, horizontaux ou sphères) de gaz liquéfiés inflammables comme le G.P.L.
- ❖ Réservoirs de propane liquide installés ou enterrés.
- ❖ Réservoirs des stations service les plus importantes.

#### b) Ouvrages immergés

- ❖ Les installations offshores fixes et les navires,
- ❖ Les bouées et ouvrages portuaires

### 2.2.2.4 Installation de la protection cathodique et critère de choix

Nous avons vu que la protection contre la corrosion d'un ouvrage enterré pouvait être réalisée par l'application de la protection cathodique dite "active" parce qu'elle agit directement sur le processus de corrosion, ainsi qu'une autre méthode de protection dite "passive". Cette dernière consiste à soustraire l'ouvrage à protéger du milieu agressif dans lequel il baigne, par l'utilisation d'isollements ou de revêtements adéquats, elle sert également à l'isolation de l'ouvrage des autres métaux qui pourraient engendrer des couplages galvaniques.

Malheureusement, toute solution de protection, qu'elle soit, n'est jamais complètement efficace, soit d'une part la définition des principes et leur application ne sont pas techniquement parfaites, et en d'autre part, les caractéristiques des ouvrages se s'altèrent avec le temps, et que certains paramètres évoluent. Ainsi, pour être efficace, la protection cathodique nécessite de porter l'ouvrage à protéger en dessous d'un certain seuil de potentiel. **Ce seuil doit être effectivement atteint en tous points de l'ouvrage.**

Cette condition est d'autant plus difficile à vérifier que lorsque les ouvrages en question soient enterrés, donc peu accessibles aux mesures de potentiel du métal, et qu'il est impossible de s'assurer de cette condition en tous points du métal.

Seule l'étude de la protection cathodique et l'analyse des mesures sur le terrain pourront apporter la certitude de l'efficacité de cette protection.

De même, la protection "passive" ne constitue pas un remède totalement idéal et définitif. Aucun revêtement ne confère à un ouvrage un isolement parfait et infini. Malgré les contrôles effectués lors de la pose de l'ouvrage, il reste toujours des micropores qui mettent le métal en contact avec le sol. Quels que soient les soins apportés au remblaiement de l'ouvrage, des blessures sont provoqués par les éléments constitutifs du terrain qui endommagent cette protection. Et enfin le temps, qui contribue lui aussi à détériorer petit à petit les qualités initiales de barrière à la corrosion que constitue le revêtement ; une politique réaliste en matière de protection contre la corrosion des ouvrages enterrés, consiste donc à mettre en oeuvre complémentirement les deux types de protection décrits ci-dessus.

Les ouvrages enterrés seront donc isolés du sol par des revêtements protecteurs diminuant le plus possible les surfaces de métal nu en contact avec le sol. La protection cathodique viendra compléter cette protection passive, avec efficacité, d'autant que son action ne va porter maintenant que sur de plus petites surfaces de métal en contact avec le sol.

Trois méthodes de protection peuvent être envisagées.

- ❖ La protection par anodes sacrificielle,
- ❖ La protection par courant imposé,
- ❖ Protection par drainage des courants vagabonds.

Les deux premières méthodes sont les plus couramment employées en pratique.

Le choix d'une méthode de protection par rapport à une autre selon baeckmann et scwenk, dépend essentiellement de la demande en courant et de la résistivité du sol (électrolyte) telle qu'illustré dans la figure 2.4 [67].

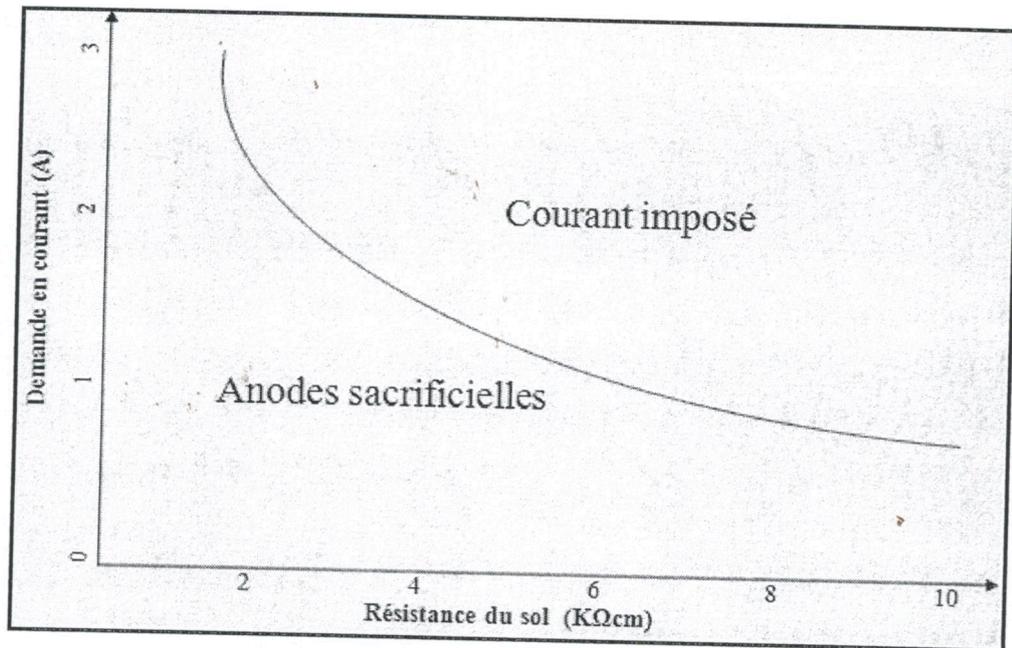


Figure. 2.4 : Choix du système de protection cathodique

Aussi La sélection d'un système de protection par rapport à un autre devra être établi en tenant compte des comparaisons d'un certain nombre de facteurs économiques et aussi de problèmes de maintenance et de suivi de la protection par courant imposé qui sont très souvent limitatifs de leurs emploi tel que montré sur le tableau suivant [6] :

Tableau.2.2 : comparatif entre la protection cathodique par anode sacrificielles et par courant imposé

	anode sacrificielle	système à courant imposé
Installation	Simple	Complexe
Source d'énergie	Non nécessaire	Indispensable
Distribution du courant sur la structure	Homogène	Souvent hétérogène
Influence de la résistivité du milieu	Non envisageable si la résistivité est trop grande	Aucune difficulté
Débit par anodes	Faible	Elevé
Nombres d'anodes	Important	Faible
Flexibilité dans les conditions de fonctionnement	Aucune	Grande
Risque de surprotection	Quasi nul sauf cas d'anode de magnésium	Possible
Interférences avec d'autres structures	Non	Possible
Risques humains	Non	Possible
Surveillance	Aisée et occasionnelle	Surveillance continue et nécessitant des techniciens spécialisés

### 2.2.3 Protection cathodique par anodes sacrificielles

#### 2.2.3.1 Généralités

Le courant cathodique nécessaire à l'obtention de la polarisation peut être obtenu en constituant un système galvanique par connexion directe d'anodes sacrificielles constituées d'un matériau moins noble que celui à protéger comme rapporté dans la figure 2.5.

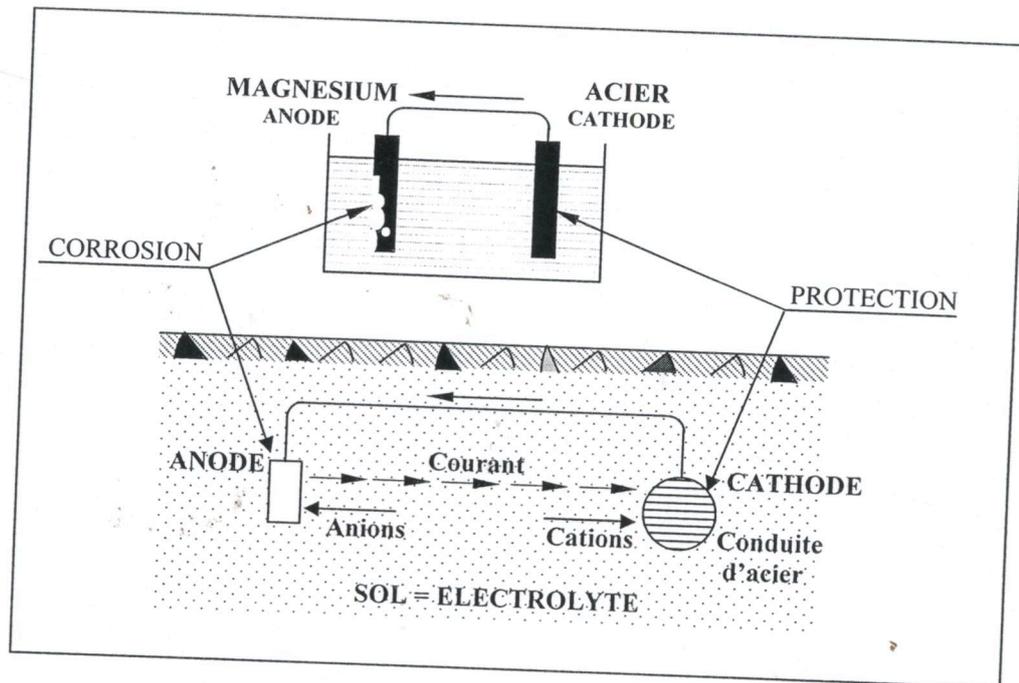


Figure. 2.5 : Protection cathodique d'un métal par couplage galvanique [68]

Quelle que soit leur nature, les qualités exigées des anodes sont [62] :

- ❖ Leurs degrés d'électronégativité, mesurés au moyen d'une électrode de référence, dans le milieu d'utilisation.
- ❖ Leur résistance à la passivation, dans les conditions d'emploi.
- ❖ Leur capacité exprimé en Ah/Kg : Cette valeur permettant de calculer leur durée de vie
- ❖ Leur degré de non nocivité pour le milieu ambiant.

Les métaux les plus électronégatifs que le fer, qui peuvent constituer une anode sont le zinc, l'aluminium et le magnésium. Le choix entre ces différents types d'anodes est basé sur les objectifs recherchés [15].

- ❖ L'aluminium est le moins coûteux et est surtout utilisé dans les milieux conducteurs renouvelés.
- ❖ Le zinc est également utilisé en milieux conducteurs mais il a l'avantage d'un fonctionnement plus sûr en cas de faible sollicitation.

- ❖ Le magnésium possède le potentiel le plus actif et permet la protection dans les milieux les moins conducteurs.

Les caractéristiques de ces anodes sont regroupées dans le tableau (2.3).

Tableau.2.3 : Anode utilisées pour le système de protection cathodique par anodes sacrificielles [66]

	Magnésium classique	Aluminium	Zinc
$E^\circ/\text{CuSO}_4$ (V)	-1,5	-1,28	-0,76
$E_{\text{corr}}$ dans le sol (V)	-1,1 à -1,3	-0,6 à -1,9	-0,6 à -0,8
Potentiel par rapport à l'acier (V)	-0,6	-0,3	-0,2
Capacité théorique (Ah/dm <sup>3</sup> )	3840	8050	5840
Rendement (%)	50	80	90
Masse pouvant fournir 0,1A pendant 10 ans (kg)	8	3,7	12

Pour garantir cette protection, il faut que :

- ❖ L'anode soit reliée électriquement à l'acier,
- ❖ La surface à protéger et l'anode soient plongées toutes deux dans le même milieu corrosif,
- ❖ La surface à protéger soit du même côté que l'anode.

La protection par anodes sacrificielles n'a pas une durée illimitée. Elle s'arrête avec la disparition de l'anode.

### 2.2.3.2 Résistance d'anode et durée de vie

La protection cathodique par anodes sacrificielles tient compte des deux phases suivantes :

- ❖ Polarisation de la structure à protéger en amenant son potentiel mesuré sur place au potentiel d'immunité ;
- ❖ Entretien de cette polarisation pendant toute la durée de service.

Le courant  $I$  débité par une anode dépend de la résistance de cette dernière ( $R_a$ ) et également de la structure à protéger ( $R_c$ ).

On aura donc :

$$I = \frac{U}{R_a + R_c} \quad (2.5)$$

Avec :

$R_a$  : résistance de l'anode

$R_c$  : résistance de la cathode

Souvent  $R_c$  est négligeable devant  $R_a$ . La résistance  $R_a$  sera calculée, lorsqu'il s'agit d'un milieu suffisamment homogène, de résistivité  $\rho$  ( $\Omega \cdot m$ ), par la relation de Dwight [68] :

$$R_a = \rho \frac{1}{2\pi l} \left( 2.3 \lg \frac{4l}{r} - 1 \right) \quad (2.6)$$

Où :

$L$  (m) : Longueur de l'anode,

$r_e$  (m) : rayon équivalent de la section droite avec  $r_e = P / 2\pi$

$P$  : périmètre de cette section.

Il reste à calculer le nombre d'anodes à employer et leur durée de vie. Le nombre d'anodes est établi lorsqu'on connaît la densité de courant à la cathode nécessaire pour la protection et la surface totale à protéger. La densité de courant cathodique moyenne d'entretien étant connue, soit  $\delta_c$  ( $A/m^2$ ), on pourra donc calculer le courant total.

$$I = A \delta_c \quad (2.7)$$

Où :

$A$  ( $m^2$ ) surface totale cathodique et  $I$  (A) intensité totale.

Pour cela, on doit disposer d'une masse totale d'anodes sacrificielles  $P$  (kg), et pour une consommation spécifique  $K$  en  $kg / (A \cdot an)$ , on a :

$$P = I \cdot K \cdot t \quad (2.8)$$

La masse globale sera répartie en N nombres d'anodes de capacité individuelle C (A.m). Lorsqu'une anode est choisie, on peut calculer la surface cathodique S qu'elle protège selon le temps d'utilisation prédit t [62].

$$S = C / t \delta_c \quad (2.9)$$

#### 2.2.4 Protection cathodique par courant imposé [13]

Le courant cathodique nécessaire à la réalisation de la polarisation est obtenu en injectant un courant imposé fourni par une source de courant continu et qui est réparti dans l'électrolyte par l'intermédiaire d'anodes déversoirs. Dans la protection cathodique par courant imposé, l'abaissement de potentiel est obtenu en reliant les structures à protéger au pôle négatif d'un générateur à courant continu et les anodes déversoir au pôle positif comme montré dans la figure 2.6.

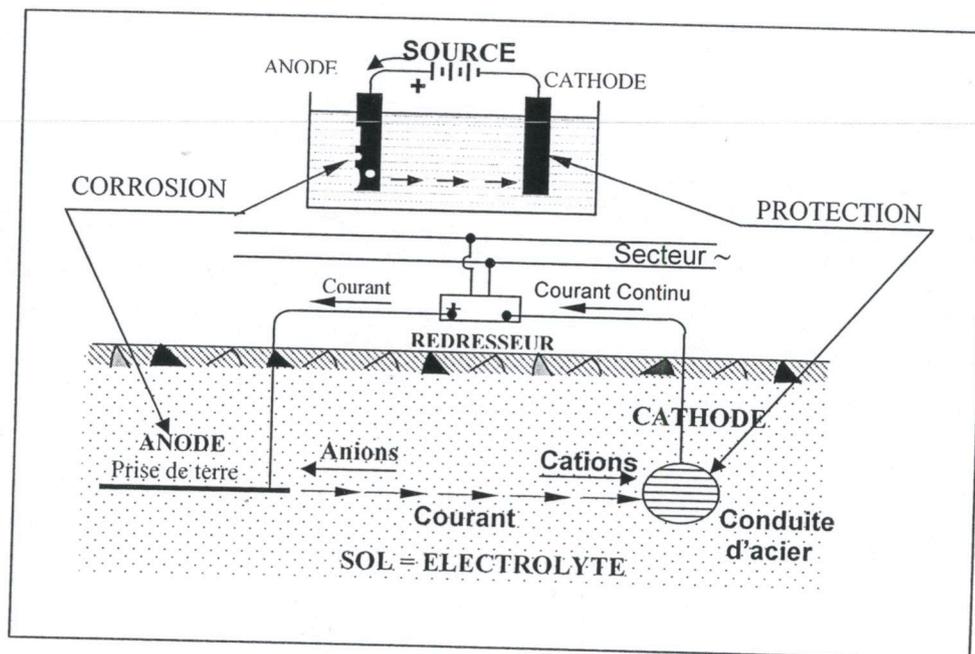


Figure. 2.6 : Protection cathodique d'un métal par courant imposé [14]

Une installation d'un poste de protection cathodique à courant imposé comprend essentiellement :

- ❖ Un générateur de courant continu,
- ❖ Une anode déversoir,

- ❖ Des câbles de liaison entre appareil et anode, entre appareil et structure à protéger,
- ❖ Des appareils de mesure indicateurs du fonctionnement de la protection.
- ❖ Des électrodes de référence.

#### 2.2.4.1 Générateur de courant continu et ces caractéristiques

Habituellement, il est constitué par un transfo-redresseur alimenté à partir du réseau électrique basse tension. Mais d'autres sources d'alimentation peuvent être envisagées tel que [13] :

- Les panneaux solaires photovoltaïques,
- Les groupes électrogènes,
- Les thermo générateurs,
- Les générateurs de type éolien,
- Piles à combustibles,
- Générateur nucléaire.

Le débit de l'appareil est fonction des caractéristiques de l'installation réalisée, il est défini par la loi d'Ohm :

$$I = \frac{U}{R} \quad (2.10)$$

Où :

U : est la tension de la source de courant continu,

R : est la résistance du circuit

La tension se situe, en général dans la catégorie très basse tension. La résistance du circuit est conditionnée par la résistance des anodes déversoirs [66].

### 2.2.4.2 Déversoir anodique et leurs implantations :

Le déversoir anodique est constitué d'un ensemble d'anodes, ces dernières peuvent être de forme et de dimensions très variables.

Tableau.2.4 : Formes et dimensions des anodes

Dimensions	Longueur (mm)	Masse (kg)
Section circulaire Ø 200 mm	400 à 650	10 à 23
Section rectangulaire 102×102 à 127×114mm	200 à 550	4 à 15
Section en forme de D côté rectiligne de 90 à 110 mm	20 à 1500	2 à 30
Section trapézoïdale de 25 à 65 cm <sup>2</sup>	500 à 1500	19 à 50

Le déversoir sert à injecter le courant de protection cathodique dans le sol. Il doit donc être constitué de matériaux conducteurs de courant. Se comportant comme une anode, il est soumis aux phénomènes d'oxydation. La masse du matériau constituant le déversoir devra être déterminé pour que l'installation ait une durée de vie de l'ordre de 15 à 20 ans.

Les matériaux généralement utilisés pour la réalisation d'un déversoir sont récapitulés dans le tableau 2.5.

Tableau. 2.5 : Propriétés et milieu d'utilisation des déversoirs [6]

Déversoir	Consommation (kg/A.an)	Milieu d'utilisation
Acier	9	Tous types de sol Eau de mer Eau douce
Graphite	0,25 à 0,5	Tous types de sol Eau de mer Eau douce
Ferro silicium	0,5	Tous types de sol Milieux liquides chlorurés Milieux de faible résistivité
Magnétite	1,5 g/A.an	Tous types de sol Eau de mer
Titane platiné	10 mg/A.an	Milieu de faible résistivité

L'implantation du déversoir devra être installée à environ 50 mètres de la canalisation, de façon à favoriser son rayonnement et augmenter ainsi la portée du poste de protection. En règle générale, il faudra veiller impérativement à s'écarter d'au moins 50 mètres de tout ouvrage métallique enterré susceptible de capter les courants déversés.

On distingue deux types d'emplacement :

➤ Déversoir anodique posé verticalement

Le procédé de pose consiste à enterrer les anodes verticalement dans un trou creusé au fond d'une tranchée à une profondeur comprise entre un et deux mètres selon la nature du terrain tel que montré sur la figure 2.7.

Le courant  $I$  débité par une anode dépend de la résistance de cette dernière et également de la structure à protéger.

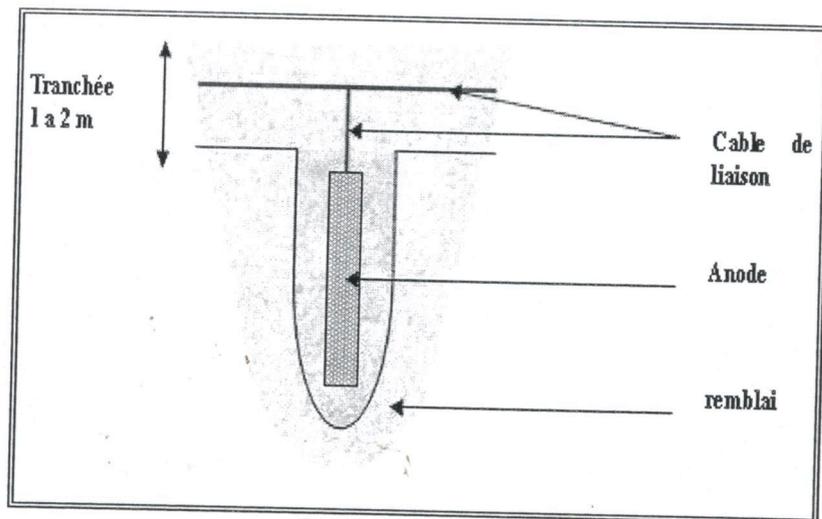


Figure. 2.7 : Déversoir anodique posé verticalement [66]

➤ Déversoir anodique posé horizontalement

Ce type de pose est conseillé lorsque la résistivité du sol en surface est faible et lorsqu'on dispose de place sur le terrain tel qu'illustré sur la figure 2.8. Il est recommandé, par exemple l'utilisation de vieux rails ou autre ferraille de forme similaire

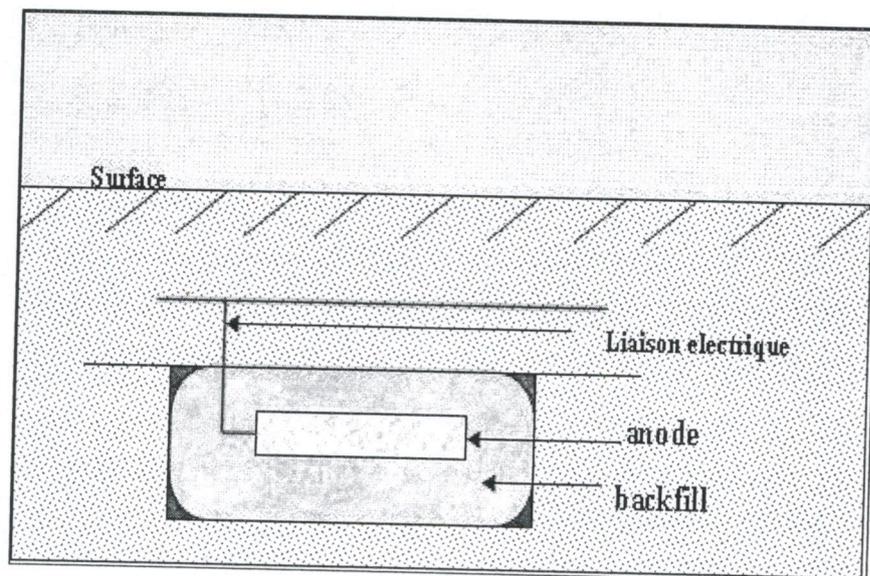


Figure. 2.8 : Déversoir anodique posé horizontalement [66]

### 2.2.4.3 Les électrodes de référence [8] :

Pour mesurer le potentiel d'une électrode, on utilise une électrode de référence qui devrait satisfaire aux conditions suivantes :

- Avoir un potentiel reproductible,
- Correspondre à une réaction bien définie du point de vue thermodynamique,
- Etre non polarisable (aux faibles intensités de courant, le potentiel ne varie pratiquement pas),
- Etre facile à utiliser.

Le Tableau.2.6, donne les électrodes de références les plus couramment utilisées :

Tableau. 2.6 : Electrodes de référence [15]

Électrodes	Électrolytes	E/V
Calomel (Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> /Cl <sup>-</sup> )	KCl saturé	0,241
	KCl 1M	0,280
	KCl 0,1M	0,330
Sulfate mercurieux (Hg/HgSO <sub>4</sub> /SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , saturé	0,658
Oxyde mercurique	NaOH, 1M	0,098
Chlorure d'argent (Ag/AgCl/Cl <sup>-</sup> )	KCl, saturé	0,195
Sulfate de cuivre (Cu/CuSO <sub>4</sub> )	CuSO <sub>4</sub> , saturé	0,316

### 2.2.4.4 Les câbles de liaison [69]

La section des câbles est déterminée en fonction de la chute admissible et de l'échauffement. Pour des raisons de tenue mécanique une section minimale de 10 mm<sup>2</sup> est recommandée, la nature de l'isolant des câbles est déterminée en fonction du milieu. Dans beaucoup de cas un câble isolant en PVC est suffisant. Les bornes (+) et (-) sur l'appareil de soutirage et les câbles doivent être clairement repérées afin d'éviter des inversions qui provoqueraient la corrosion de la partie à protéger.

En plus des appareils déjà cités, il faut disposer d'autres appareils électriques :

- Les appareils de coupure : des interrupteurs permettant d'établir ou d'interrompre l'alimentation du post de soutirage
- Les appareils de protection : des disjoncteurs permettant la coupure et la protection contre les surcharges et les surintensités.
- les appareils de mesure : qui ont pour but d'indiquer :
  - la tension d'alimentation,
  - l'intensité débitée,
  - le potentiel de la structure,
  - le temps de fonctionnement.

### 2.3 Protection par drainage des courants vagabonds

Les courants vagabonds qui existent dans le sol, sont liés à des fuites électriques provenant de plusieurs installations alimentées en courants continus, mal isolées par rapport au sol. Ces courants sont surtout fréquents à proximité des voies ferrées, de métro et de tramways.

On les appelle vagabonds parce qu'ils sont variables dans leur intensité, leur direction et le trajet qu'ils parcourent [70].

#### 2.3.1 Danger des courants vagabonds

Le danger que présente la circulation des courants vagabonds, pour les ouvrages avoisinant se situe dans les régions de passage de ces courants entre le métal et le sol. Ces passages de courant conduisent à la formation de deux cellules d'électrolyse à savoir, dans le sens de circulation du courant, rail/sol/conduite et conduite/sol/rail.

Dans le premier cas, la circulation des courants s'effectue du rail vers l'ouvrage. Cela ne présente aucun danger de corrosion, au contraire ils favorisent la réaction de réduction (zone cathodique).

Dans le deuxième cas, la circulation des courants s'effectue de l'ouvrage vers le rail. Ces sorties de courant de l'ouvrage présente localement un danger de corrosion. Leur effet est de rendre la zone anodique favorable à une réaction d'oxydation.

### 2.3.2 Moyens de lutte contre les courants vagabonds par Les procédés "passifs"

[6]

On compte trois catégories de protection "passives" :

- Les **revêtements** qui consistent à isoler les canalisations du sol : un bon revêtement empêche tout échange de courants.
- Les **joints isolants** offrent un moyen "passif" de limiter l'intensité des courants qui circulent dans une canalisation, en interrompant sa continuité électrique. Ils complètent les revêtements en isolant les canalisations des installations auxquelles elles sont raccordées.
- Les **déversoirs de courant** qui sont destinées à faciliter l'évacuation des courants ayant emprunté le chemin d'une canalisation.

### 2.3.3 Moyens de lutte contre les courants vagabonds par Les procédés "actifs"

Ils consistent à neutraliser les courants vagabonds qui ont déjà pénétré dans les ouvrages, soit en les restituant à la source émettrice, soit en leur superposant d'autres courants de signes contraires, qui neutralisent leur influence défavorable. Le principe consiste à canaliser les courants dans un circuit préférentiel établi volontairement entre la canalisation et le rail et non plus à travers le sol. Pour cela on réalise une liaison généralement polarisée, entre la conduite et le rail. Le point d'inversion de polarité est ramené au point de liaison. En général, on complète le montage en insérant dans le circuit un système de régulation afin de limiter le courant de transit qui peut être très important, ce dispositif s'appelle **drainage de courant**.

Pendant la phase de drainage, le potentiel de la structure au pont de connexion du drainage varie dans le même sens que celui du rail tel que montré sur la figure 2.9.

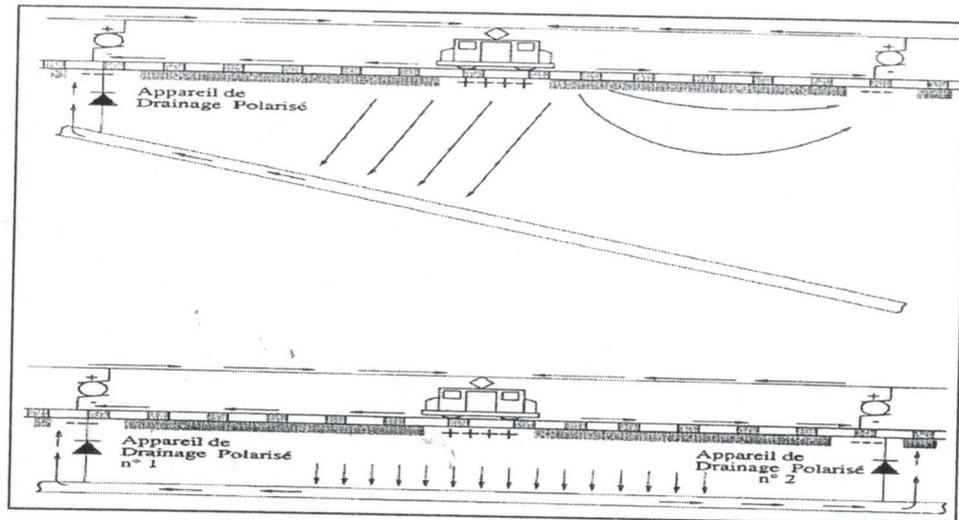


Figure.2.9 : protection cathodique par drainage de courant vagabond [13]

#### 2.4 Conclusion

La protection cathodique est une méthode très rigoureuse pour lutter contre la corrosion des structures et équipements en aciers au carbone, placés dans un électrolyte conducteur. Cependant, il faut respecter un certain nombre de règles d'installation, l'expérience est indispensable. Il est nécessaire de faire appel à des spécialistes et à un personnel qualifié.

La protection cathodique semble très simple dans son emploi, mais la maîtrise de ses paramètres électriques demande une grande délicatesse et beaucoup de précaution.

Toute médaille a son revers : malgré son large utilisation, la protection cathodique mal conçue et mal employée présente divers effets néfastes et indésirables tels que la fragilisation par l'hydrogène d'aciers à haute limite élastique dans le cas de la surprotection, et aussi risque de cloquage de systèmes de peintures ou de revêtement incompatibles et surtout la dégradation du revêtement sous l'effet du courant de protection.

## CHAPITRE 3

### REVETEMENTS ASSOCIES ET EFFET DE LA PROTECTION CATHODIQUE

#### 3.1 Caractéristiques générales des revêtements externes

Nous insisterons spécialement sur le cas des canalisations enterrées dont la protection externe est infiniment plus délicate que celle des canalisations aériennes plus faciles d'accès et, le contrôle de la corrosion et l'effet de la Protection cathodique dépendent de l'état du revêtement (en particulier du degré de son endommagement) [3].

Nous venons de voir que dans ce cas le rôle du revêtement est d'assurer une protection efficace et de longue durée des parois de la canalisation en constituant une barrière étanche entre ces parois et le milieu environnant

Pour ce faire, le revêtement doit répondre aux impératifs suivants [13] :

- Présenter une *résistance d'isolation électrique élevée* en vue de s'opposer aux phénomènes électrochimiques se produisant entre la paroi de la canalisation.

Le revêtement isolant permet en outre de :

- ✓ Soustraire la conduite à l'influence des potentiels souvent élevés provoqués par les courants vagabonds pouvant provenir d'installations industrielles, de piles géologiques.
- ✓ Maintenir à moindre frais le potentiel négatif nécessaire à la protection cathodique quand celle-ci est appliquée à la conduite.
- ✓ Minimiser les influences des courants de protection sur les ouvrages métalliques enterrées à proximité.

- Etre suffisamment *étanche* à l'eau ainsi qu'à la *vapeur d'eau* afin d'empêcher la pénétration de toute trace d'humidité à travers le revêtement, ce qui compromettrait les performances d'isolement électrique.
- Avoir la meilleure inertie chimique, c'est-à-dire résister avec efficacité à l'action des corps chimiques se trouvant dans le milieu environnant.
- Etre insensible aux *bactéries* dont certaines peuvent endommager, voire détruire, le revêtement.
- Posséder la meilleure *résistance mécanique*, de façon à :
  - ✓ Supporter sans dommage les contraintes et sollicitations résultant des opérations de manutention (transport, stockage et pose).
  - ✓ Tenir aux déformations lors des épreuves hydrauliques.
  - ✓ Rester insensible aux mouvements du sol ainsi qu'aux actions du fluide transporté (température, vitesse, pression, surpression).

Parmi les principales qualités recherchées, un revêtement doit donc présenter :

- ✓ Une *adhérence suffisante* à la surface lui servant de support, ceci en vue d'éviter en cas de blessure le cheminement de l'humidité qui peut également se produire lors d'un mauvais mariage des zones de recouvrement du revêtement. L'adhérence dépend de facteurs tels que : état de surface du subjectile (propreté, aspérité), propriétés intrinsèques du matériau.
- ✓ Une bonne *résistance aux chocs* indispensable pour limiter la détérioration du revêtement au cours du transport, du stockage, de la reprise, de la descente en fouille ainsi que du remblayage du tranché.
- ✓ Une *dureté* convenable pour une gamme donnée de température, ceci afin de s'opposer à la pénétration des matériaux du remblai de la tranchée ainsi qu'aux racines des végétaux ou, s'il s'agit d'un revêtement intérieur, à l'abrasion du fluide véhiculé,
- ✓ Enfin, une *cohésion* suffisante lui permettant en extérieur de résister uniformément aux contraintes exercées par le sol sur la canalisation.

En plus de la protection complémentaire à la protection électrochimique, les revêtements peuvent remplir les rôles suivants :

- ❖ Limiter la consommation de courant,
- ❖ Assurer une polarisation plus rapide,
- ❖ Assurer une portée de la protection cathodique dans des zones à géométrie complexe,
- ❖ Assurer une meilleure répartition du courant sur la structure,
- ❖ Réduire le coût global de protection.

Il est indispensable que le revêtement utilisé dans le cas des pipelines (polyéthylène), soit compatible avec la protection cathodique. Un risque de cloquage ou de perte d'adhérence dû au dégagement d'hydrogène est encouru en fonction des niveaux de potentiels atteints.

### 3.1.2 Revêtement polyéthylène [13]

De formule générale  $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$ , il a été inventé en 1933, deux principaux procédés de fabrication se sont développés :

- ✓ Procédé à haute pression (basse densité)

Il s'est développé le premier et a conduit à l'obtention de polymères de faible densité et de poids moléculaire moyen.

- ✓ Procédé à basse pression (haute densité)

Il fait intervenir l'action de catalyseur et conduit à l'obtention de polymères de très haut poids moléculaire et de densité élevée.

Pour la réalisation de revêtement de tubes, la qualité du polyéthylène sera définie par les exigences suivantes à savoir une masse volumique  $< 0.94 \text{ g/cm}^3$  (norme NFT 51063) et un indice de fluidité  $\leq 2 \text{ g/10min}$  (norme NF T 51016).

### 3.1.3 Mécanismes de la protection par les revêtements

Les mécanismes de protection par les revêtements peuvent être complexes et dépendent de la nature des matériaux, des systèmes de revêtement utilisés, ainsi que des conditions de service.

Diguet [61] a mis en évidence l'influence de la conduction ionique et de la porosité de films fluorés épais dans les mécanismes de dégradations de la résistance à la corrosion des aciers en solutions fortement acide ( $H_2SO_4$ ), d'autres travaux menés montrent que la nature du revêtement, qu'il s'agisse de ses caractéristiques physiques aussi bien que chimiques (porosité, taux de cristallinité, mode de dégradation,...), joue un rôle important sur les mécanismes de corrosion rencontrés [62].

### 3.2 Effets de la protection cathodique sur les revêtements

Comme il a été défini précédemment dans le principe de la protection cathodique, la cinétique de la réaction anodique [ $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ ] qui provoque la dissolution du métal est nettement ralentie, ce qui implique que la corrosion du métal est en définitive moindre voire négligeable.

Simultanément, les réactions cathodiques sont favorisées [71, 72,73] :



De nombreux auteurs démontrent que la réaction cathodique conduit à l'alcalinisation locale du milieu électrolytique au contact du métal en cas de défaut de revêtement [74-78]. Cette alcalinisation peut avoir deux types de conséquences relativement antagonistes. Tout d'abord, elle peut contribuer à faciliter la dégradation de la liaison adhésive revêtement/métal par attaque chimique de type hydrolyse alcaline des liens chimiques engagés dans l'adhésion (c'est le cas des revêtements avec sous couche époxy). D'autre part, elle peut modifier le milieu aqueux local et contribuer à faciliter la passivation du métal en favorisant localement une croissance d'un film passivant protecteur du métal mis à nu.

Un excès de PC peut conduire à l'intensification de la réaction de réduction de l'eau, avec, entre autres, comme conséquence possible, la pénétration dans l'acier d'hydrogène interfacial (produit intermédiaire de la réaction de réduction de l'eau) et un éventuel risque de fragilisation.

### 3.2.1 Vieillessement et dégradation du revêtement

Les revêtements hydrocarbonés sont susceptibles de perdre leurs propriétés d'isolant électrique et de barrière physico-chimique selon plusieurs mécanismes. Ces modes de vieillissement sont principalement, une dégradation des propriétés intrinsèques du matériau constitutif ou une décohésion des interfaces matériau/renfort ou matériau/métal.

Un rapport du Gas Research Institute (G.R.I) montre que les facteurs les plus importants dans la dégradation des revêtements, quel que soit le matériau de base, sont ceux liés aux conditions de pose. Des défauts imputables à des conditions d'application inappropriées. On citera par exemple que ces matériaux organiques perdent leurs propriétés de stabilité dans le temps si la température est trop élevée au moment de l'application. Ou encore que l'état de surface de l'acier au moment de la pose du revêtement est un des points clés pour obtenir de bonnes propriétés anticorrosion [79]. Ces deux conditions (température, état de surface) étaient difficilement contrôlables sur le terrain.

D'une manière générale, nous pouvons différencier deux phénomènes pouvant induire une dégradation des propriétés physico-chimiques des matériaux constitutifs, et par conséquent du revêtement lui même.

Il existe deux cas principaux qui peuvent conduire à des effets de décollement du revêtement Protecteur, précurseurs de la corrosion :

1. L'existence d'un défaut physique macroscopique du revêtement qui met localement à nu le métal en contact direct avec le milieu extérieur (défauts apparus lors de la fabrication, de la pose ou de l'exploitation de la canalisation).
2. La pénétration lente de la vapeur d'eau, de gaz corrosifs (oxygène, gaz carbonique) ou d'ions au travers du matériau (vieillessement physico-chimique du

matériau) depuis la surface externe jusqu'à l'interface avec le métal [80]. Ces deux types de configurations sont susceptibles d'engendrer localement un endommagement du métal par corrosion.

Le premier est un vieillissement physique dû à l'absorption d'eau pouvant entraîner un gonflement et des contraintes mécaniques internes fragilisant l'interface acier/revêtement. Le second est un vieillissement chimique dû à des réactions entre des molécules de polymère et d'eau entraînant une hydrolyse des chaînes moléculaires. Généralement, ces deux phénomènes sont supposés être thermoactifs (dans les limites de respect des propriétés physiques du matériau).

### 3.2.2 Enumération des défauts de revêtement

Différents types de défauts de revêtement sont observés sur les canalisations. Leurs origines et conséquences sont diverses, et peuvent dans certains cas conduire à une corrosion :

#### 3.2.2.1 Porosité :

Le matériau du revêtement présente une porosité intrinsèque qui permet l'arrivée d'éléments potentiellement corrosifs à la surface du métal, (eau, oxygène, CO<sub>2</sub>,...)

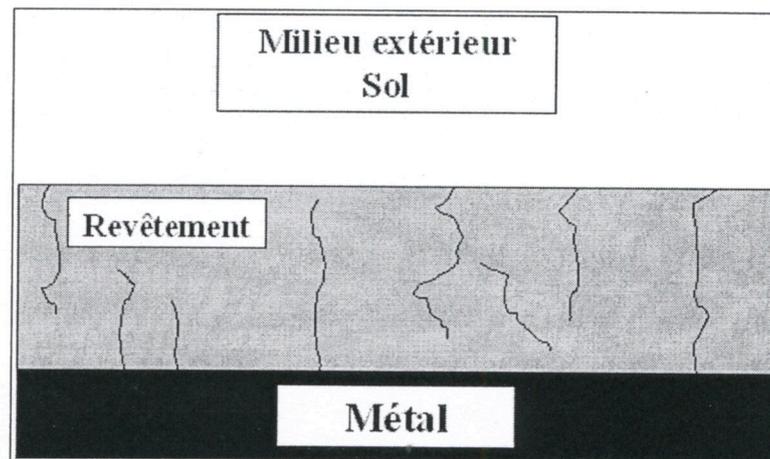


Figure. 3.1 : Revêtement présentant des porosités, dont certaines relient directement le métal au milieu extérieur [79].

### 3.2.2.2 Défaut ouvert :

Ce type de défaut est une lacune de revêtement, mettant le métal directement en contact avec le milieu électrolytique. La protection cathodique dans ces conditions sera efficace tant qu'il y aura continuité électrique. On pourra distinguer pour ce type de défaut une taille "critique", et dépendante de la conductivité du milieu extérieur, en dessous de laquelle les courants de protection ne seront plus efficaces car la résistance intrinsèque du défaut sera trop importante.

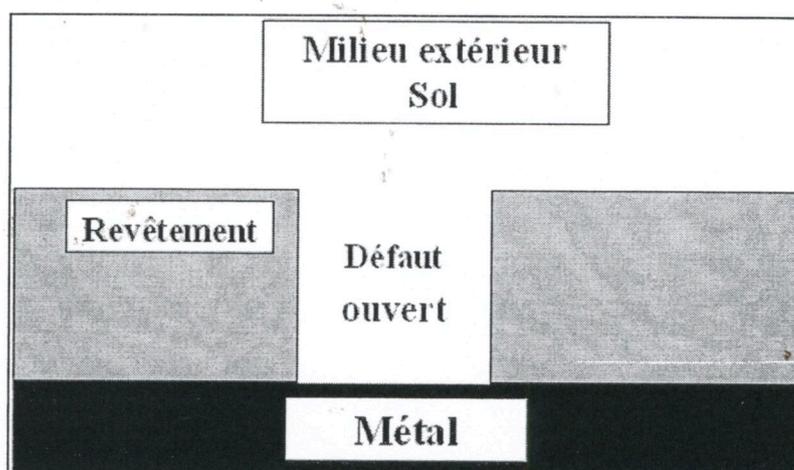


Figure. 3.2 : Revêtement présentant un défaut ouvert sans décollement [79]

### 3.2.2.3 Défaut avec écran :

Un obstacle non conducteur, typiquement une pierre, a créé le défaut et reste enfiché dans le revêtement. L'espace libre entre la pierre et le revêtement peut entraîner une chute ohmique empêchant les courants de PC de protéger le métal (effet d'écran) mais laisser passer des produits potentiellement corrosifs (oxygène, eau,...). Il peut aussi se créer une pile d'aération différentielle entre le point de contact de la pierre (anodique) et la partie au contact de l'électrolyte aéré (cathodique).

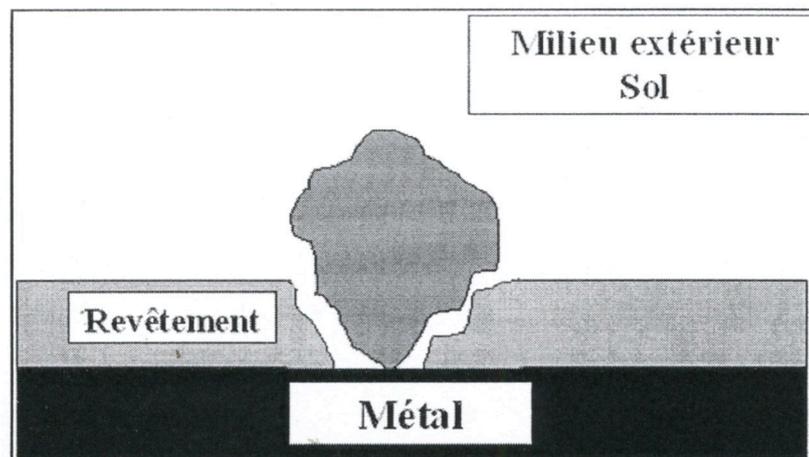


Figure. 3.3 : Revêtement présentant un défaut avec écran [79]

#### 3.2.2.4 Défaut ouvert avec décollement du revêtement :

Souvent conséquence d'un vieillissement d'un trou existant, ou résultant d'un défaut d'application. On parlera de trou "unique débouchant" dans le cas d'un décollement présentant une seule ouverture sur le milieu extérieur. Les paramètres influents dans cette configuration sont la taille du défaut, la hauteur de l'interstice entre le métal et le revêtement, et la surface de métal mis à nu.

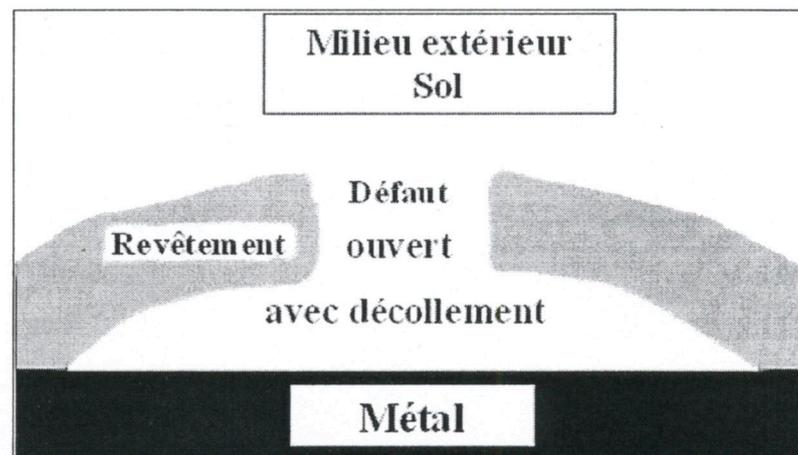


Figure. 3.4 : Revêtement présentant un défaut ouvert avec décollement [79]

### 3.2.2.5 Fluage du revêtement :

Ce type de défaut est plus particulièrement observé sur des tubes de grand diamètre, et est un cas particulier de décollement. Il semblerait que le fluage s'amorce dès la pose du revêtement, lorsque la préparation du métal n'a pas été appropriée, mais surtout lorsque le tube est resté exposé à la chaleur avant d'être enfoui. Il est maintenant admis que l'élévation de la température du revêtement, le plus souvent lors des opérations de pose, est responsable de ce phénomène. On constate parfois une absence totale de revêtement sur une bande de quelques centimètres de largeur sur le haut du tube (à 12 heures) due au fluage.

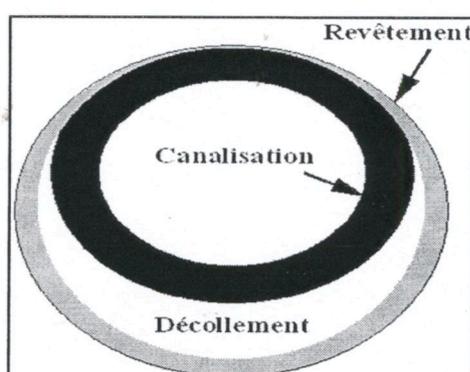


Figure.3.5 : Canalisation dont le revêtement a flué sous son propre poids [79]

### 3.2.2.6 Défauts ouverts communicants :

Plusieurs défauts ouverts proches les uns des autres peuvent finir par communiquer en raison du décollement du revêtement. Une circulation d'électrolyte peut alors s'instaurer.

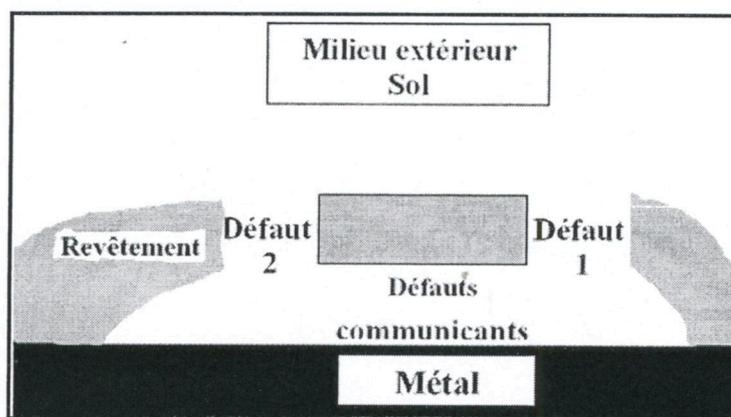


Figure. 3.6 : Revêtement présentant deux défauts communicants [79]

### 3.2.3 Origines des décollements de revêtement

Les décollements de revêtement sont majoritairement dus à la pénétration d'eau et d'oxygène à travers les revêtements, qui, au contact du métal, peuvent dégrader la liaison métal/revêtement suivant deux grandes familles de mécanismes possibles. On notera qu'il existe des différences entre les revêtements minces, de type peinture ou vernis, et les revêtements épais, tels que les bitumes et les brais. Le premier mécanisme est appelé décollement cathodique, car il est une des conséquences de la présence des courants de PC et touche les deux types de revêtements. Le second, concernant plus particulièrement les revêtements minces au droit des porosités débouchant sur le métal, est dû à la formation de couches d'oxydes, qui en croissant dégradent mécaniquement l'interface métal/revêtement.

### 3.2.4 Différentes formes de dégradations du revêtement sous l'effet de la protection cathodique

Ce n'est donc que lorsqu'il existe un défaut macroscopique du revêtement que le processus de décollement est susceptible d'être endommageant pour le métal. La réaction cathodique produit des ions  $\text{OH}^-$  et du dihydrogène  $\text{H}_2$  qui contribuent le plus souvent à accélérer le décollement progressif du revêtement au voisinage du défaut. Pour certains auteurs, le phénomène de décollement est le résultat d'un processus électrochimique qui intervient à l'interface polymère/métal [81].

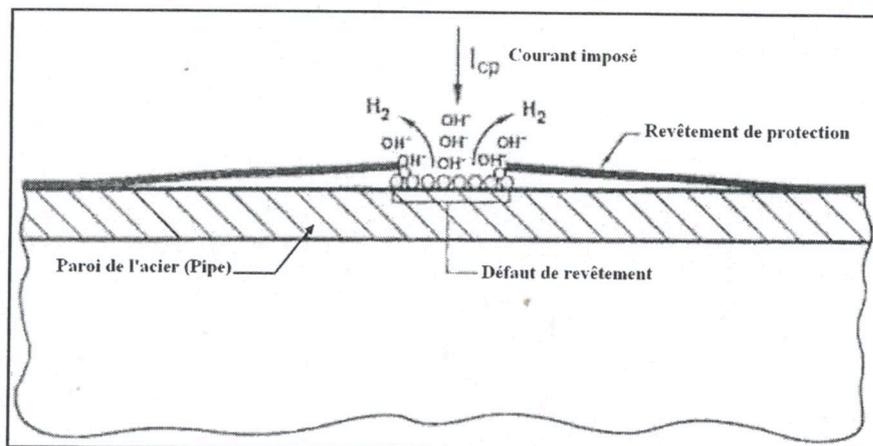


Figure. 3.7 : Effet d'un courant cathodique sur le décollement du revêtement [82]

Castle et Watts suggèrent, pour leur part, que l'hydrolyse des liaisons interfaciales par les forts pH est la cause prédominante du décollement lorsqu'une protection cathodique est appliquée à un revêtement polybutadiène sur un substrat en acier [81]. Par la suite, ces mêmes auteurs ont montré sur un système époxy/acier que la réduction des oxydes interfaciaux était la cause directe du décollement [83].

Pour certains auteurs, le phénomène de décollement est le résultat d'un processus électrochimique qui intervient à l'interface polymère/métal) [80]. Le substrat métallique est polarisé le long du défaut dans une zone spécifique nommée MPEI (métal/polymère/électrolyte interface), tel que montré sur la figure 3.8.

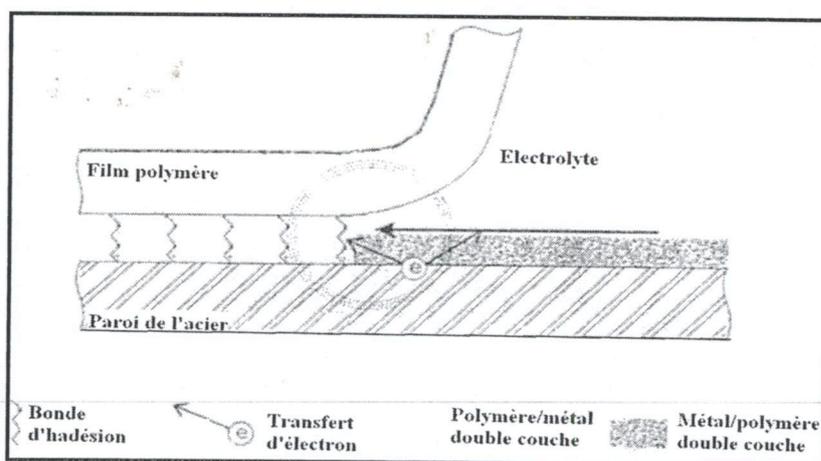


Figure. 3.8 : Zone MPEI (Métal/Polymère/ Electrolyte /Interface) [80]

Lorsqu'un courant cathodique est appliqué au métal, ce dernier accélère le processus électrochimique le long de cette zone, ce qui conduit à une dégradation rapide de l'interface polymère/métal. Ce phénomène de perte d'adhésion est plus connu sous le nom de décollement cathodique ou encore délamination cathodique.

Lorsque le revêtement est soulevé, l'accès au front de délamination est facilité, ce qui accroît la vitesse de pénétration. Pour certains auteurs, la vitesse de décollement est alors déterminée par la sensibilité de la liaison adhésive à résister à l'attaque des produits de réduction de l'oxygène [78].

Chaque auteur possède sa propre idée sur le processus de dégradation, mais ils sont tous unanimes sur un point : les dégradations des liaisons adhésives sont favorisées par l'augmentation locale du pH à l'interface polymère/métal [84,85].

Pour ce type de revêtement, il arrive parfois que le résultat de cette dégradation montre un aspect différent. Lorsqu'un défaut de surface se crée dans le revêtement (lacune de matière), le métal entre directement en contact avec l'environnement corrosif. Les produits de corrosion peuvent alors se former et « bloquent » le site endommagé. Dans ce type de situation, localement, l'accès à la surface des espèces agressives du milieu électrolytique est empêché par l'agglomération des produits de corrosion, tandis qu'à la périphérie du défaut, l'accès de ces espèces est possible par perméation à travers le revêtement mince.

De tels phénomènes sont aussi théoriquement possibles pour les revêtements épais. Dans le cas de revêtements épais ou de polyoléfines extrudés, de tels défauts de très petite taille (micropores ou macropores) sont rares. Par contre, il existe souvent des défauts macroscopiques. Ce processus engendre un 'blister' (ou cloque), présenté sur la figure 3.9.

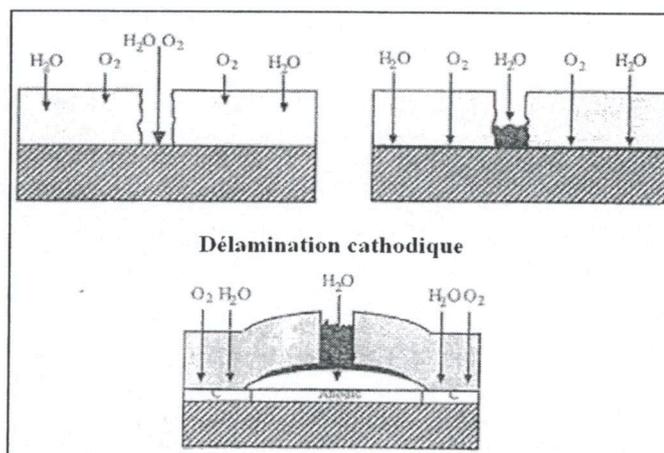


Figure. 3.9 : Phénomène de blister sous protection cathodique [86]

Gan [87], a montré l'importance de *parfaitement maîtriser la valeur du potentiel* cathodique. En effet, pour des potentiels contrôlés compris entre  $-1.03\text{V}$  et  $-1.28\text{V}$ , ils n'ont pas constaté de dégagement significatif de  $\text{H}_2$ , en revanche, à des potentiels plus faibles de l'ordre de  $-1.53\text{V}$ , un dégagement de  $\text{H}_2$  se produit dans la crevasse ce qui bloque la pénétration de la protection cathodique et augmente considérablement le pH local.

Les travaux de Fessler, expliquent que le choix d'un potentiel proche de  $-1\text{V}$  est un bon compromis pour obtenir un effet satisfaisant de la protection cathodique sans activer de manière dramatique la création de  $\text{H}_2$  autour du défaut [88]. A des potentiels plus négatifs (de l'ordre de  $-1.3\text{V}$ ), le dégagement de bulles de  $\text{H}_2$  à l'ouverture sur le milieu externe des défauts de revêtement peut entraver la pénétration des courants de protection, limiter le transport d'espèces alcalines depuis l'ouverture du défaut vers les zones sous le décollement de revêtement et ainsi empêcher que la polarisation annihile la corrosion sous le revêtement décollé par « passivation alcaline » [89].

## CHAPITRE 4

### DISTRIBUTION DES LIGNES DE COURANT ET DE POTENTIEL DANS LES SYSTEMES ELECTROCHIMIQUES

Le contrôle et la maîtrise des distributions de lignes de courant et de potentiel sont à la base de l'étude, dimensionnement et mise en œuvre des techniques de la protection cathodique. Une mauvaise distribution entraîne des risques très importants qui se manifestent souvent par des protubérances (court circuit), pertes de rendement énergétique, et surtout par des phénomènes de corrosion non uniforme ou localisée de plus en plus intenses, etc. [90]. Le potentiel le long de la structure à protéger doit être maintenu dans des limites correspondant au domaine de protection. De plus, la densité de courant, accrue en certains lieux par la géométrie, ne doit pas devenir trop élevée, car une fragilisation par l'hydrogène peut alors se produire.

Pour des géométries complexes, un calcul exact de la répartition du potentiel et du courant sur la surface cathodique s'avère difficile [15]. Mais une étude générale de l'influence de différents paramètres sur l'uniformité du potentiel sur la cathode est nécessaire.

#### 4.1 Répartition du potentiel et du courant dans les systèmes électrochimiques

Kasper [91] est le premier à avoir traité le problème de la distribution du courant dans les cellules d'électrolyse d'une manière détaillée et quantitative, un assez grand nombre d'auteurs ont également calculé la distribution du courant dans une cellule électrochimique tels que Stern et Geary [92].

Rousselot [93] a décrit une technique analogique simple et générale, où il détermine expérimentalement la distribution du potentiel sur du papier conducteur représentant un modèle du système électrolytique. Aujourd'hui on

emploi de plus en plus des ordinateurs pour résoudre l'équation de Laplace décrivant une distribution primaire, tenant compte plutôt de la géométrie du système que des phénomènes réactionnels qui se déroulent au niveau des surfaces métalliques. Georgiadou et al [94] ont utilisé les méthodes numériques à savoir la méthode des éléments finis pour modéliser la distribution des densités de courant dans les systèmes électrochimiques (en particulier les réacteurs d'électrolyse).

Comme le potentiel de l'électrode est strictement relié à la densité de courant par l'équation de vitesse de la cinétique d'électrode, une distribution inégale est toujours accompagnée par une distribution inégale de potentiel d'électrode.

Dans les phases homogènes sans charge spatiale, l'équation fondamentale qui décrit les distributions de potentiel est l'équation de Laplace qui définit la divergence de la force du champ électrique comme égale à zéro dans l'espace sans charge :

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (4.1)$$

Et la loi d'Ohm :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} = i / \kappa \quad (4.2)$$

Les conditions limites à la frontière des phases électrolyte/électrode et électrolyte paroi isolante sont les plus importantes pour la résolution de l'équation de Laplace. La première condition aux limites exprime le fait qu'aucun courant électrique ne traverse une paroi isolante :  $\frac{\partial \varphi}{\partial \zeta} = 0$  ,

$\zeta$  : Vecteur espace perpendiculaire à la paroi.

La deuxième tient compte du fait qu'une électrode très conductrice constitue une surface équipotentielle et que le saut de potentiel à l'interface est constant, puisque l'on néglige l'influence de la surtension:  $\varphi_s = 0$

L'intégration de l'équation de Laplace, avec les conditions aux limites ci-dessus, fournit la distribution spatiale du potentiel,  $\varphi = f(x,y,z)$ .

Souvent l'équation n'est pas facile à résoudre même pour des géométries relativement simples et pour des géométries relativement plus compliquées des procédures hautement sophistiquées (éléments finis) sont appliquées pour effectuer les intégrations nécessaires. Des programmes informatiques pour résoudre ce genre de problèmes sont mis au point et commercialisés.

#### 4.2 Principaux types de distribution du courant et du potentiel

D'après N.Ibl [90], la distribution du courant et du potentiel sur une électrode dépend surtout des facteurs suivants :

- a- Géométrie du système,
- b- Conductivité du bain et des électrodes,
- c- Surtension d'activation (qui est fonction de la cinétique des réactions aux électrodes),
- d- Surtension de concentration (déterminée par les phénomènes de transport, de diffusion et de convection).

Selon les cas, l'influence de l'un ou de l'autre de ces paramètres est prépondérante, on néglige alors les autres. A titre d'exemple : si la géométrie du système et la conductivité du milieu déterminent la distribution du courant et du potentiel entre les électrodes, on est en face d'une distribution primaire. Cette configuration traduit le cas de la protection cathodique par courant imposé. Dans ce cas, la polarisation des électrodes ou la résistance que présente des couches superficielles ne sont alors pas prises en compte dans les calculs.

La *distribution secondaire*, par contre, tient compte de la géométrie du système, la conductivité de l'électrolyte et la surtension d'activation en plus (qui est fonction de la cinétique des réactions aux électrodes) ainsi que de la résistance à l'interface électrode/milieu.

En *distribution tertiaire*, on inclut encore la surtension de concentration (déterminée par les phénomènes de transport, de diffusion et de convection).

La figure 4.1 montre schématiquement la variation du potentiel en fonction de l'espacement entre les anodes placées sur une surface plane, par exemple la paroi extérieure d'une coque de bateau. Pour une telle géométrie, un calcul exact de la répartition du potentiel et du courant sur la surface cathodique s'avère difficile. Par contre, il est possible d'étudier de façon générale l'influence de différents paramètres sur l'uniformité du potentiel le long de la cathode.

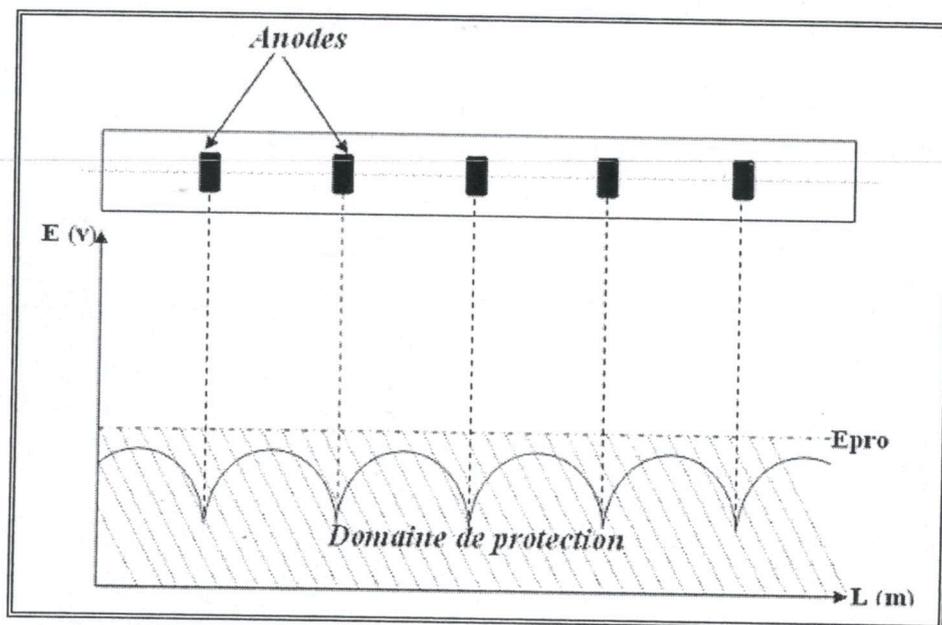


Figure. 4.1 : Variation du potentiel en fonction de la position des anodes lors de la protection cathodique d'une paroi (schéma) [15]

#### 4.2.1 Distribution primaire

On néglige l'influence des surtensions d'activation et de concentration. La distribution du courant ne dépend alors que de la géométrie du système et de la conductivité du milieu.

Parmi les géométries les plus simples, la cellule rectangulaire qui possède visiblement une distribution primaire parfaitement uniforme. On admet que nous avons une électrode très conductrice, il suffit d'appliquer l'équation (4.1) à la solution électrolytique et de considérer les conditions aux limites de cette solution. En général, une cellule électrolytique comprend des parois isolantes et au moins deux électrodes tels que montré sur la figure 4.2.

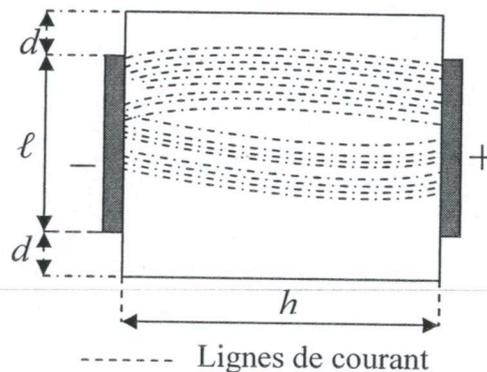


Figure. 4.2 : Cellule électrolytique avec deux électrodes, planes et parallèles, enrobées dans des parois isolantes [90]

La densité de courant  $i$  en un point quelconque de la solution est proportionnelle au gradient de potentiel  $\varphi$  en ce point et à la conductivité  $\kappa$  de l'électrolyte :

$$i = -\kappa \nabla \varphi \quad (4.3)$$

Comme l'on s'intéresse au courant qui traverse l'électrode, on calcule, à partir de l'équation (4.3),  $\frac{\partial \varphi}{\partial \xi}$  pour la surface de l'électrode, ce qui fournit la distribution recherchée.

Pour le cas de la cellule de la figure 4.2, nous obtenons après la solution analytique suivante :

$$\frac{i}{i_m} = \frac{\varepsilon \operatorname{ch} \varepsilon / \kappa (th^2 \varepsilon)}{\sqrt{sh^2 \varepsilon - sh^2 (2x\varepsilon / l)}} \quad (4.4)$$

$$\varepsilon = \pi / h$$

$h$ : distance séparant les deux électrodes

$l$ : longueur des électrodes

$x$ : distance comptée à partir du milieu de l'électrode

$i$ : représente la densité de courant à la distance de l'électrode.

$i_m$ : représente la densité de courant moyenne.

$\kappa$ : conductivité de l'électrolyte

Le graphe suivant montre la distribution de la densité de courant pour ce cas de figure :

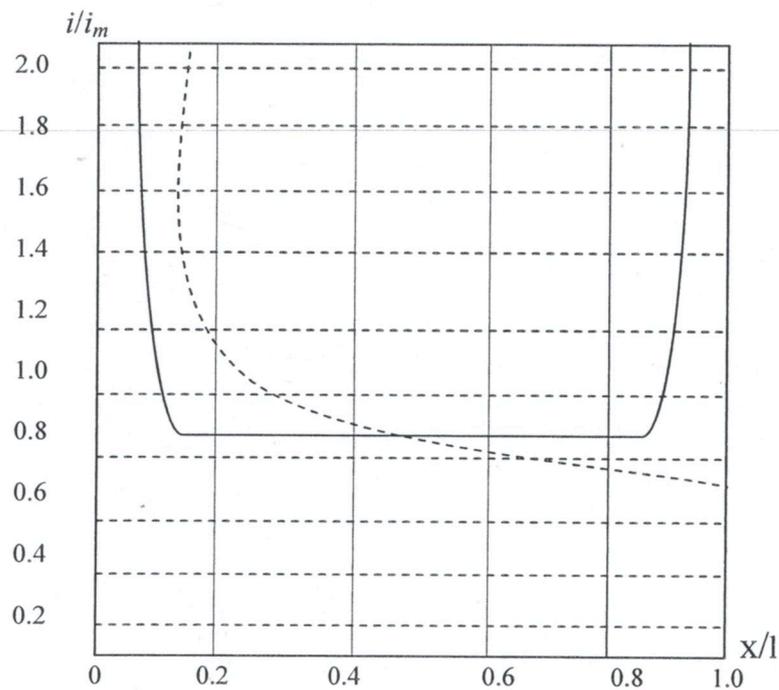


Figure. 4.3 : Distribution primaire du courant, calculée par intégration de l'équation de Laplace [90]

En protection cathodique par courant imposé des structures enterrées, le gradient de potentiel dans la conduite est obtenu par la loi d'Ohm ; nous aborderons au chapitre 5 en détails la démonstration de la distribution du potentiel et du courant le long de la conduite.

#### 4.2.2 Distribution secondaire

Dans ce cas, on prend en considération en plus la surtension d'activation qui est fonction de la cinétique des réactions aux électrodes.

On définit la résistance activation par :  $\frac{\partial \eta_a}{\partial i} = R_p$

Où :  $\eta_a$  est la surtension d'activation.

L'analyse dimensionnelle du problème dans différentes cellules montre que le nombre de Wagner ( $W_a$ , rapport adimensionnel entre la résistance de polarisation et la résistivité spécifique liée à la surface) est la grandeur adimensionnelle pertinente qui détermine les distributions de courant :

$$W_a = \frac{d\eta/di}{(\frac{1}{\rho})l} = R_p/\rho l, \quad (4.5)$$

Où  $l$  représente la dimension caractéristique du système.

Après calcul analytique, nous obtenons sur les figures 4.4, 4.5, 4.6 l'évolution des courbes de densité de courant correspondantes à différentes valeurs du paramètre adimensionnel ( $W_a$ ). La distribution du courant est d'autant plus uniforme que  $W_a$  est plus grand [90].

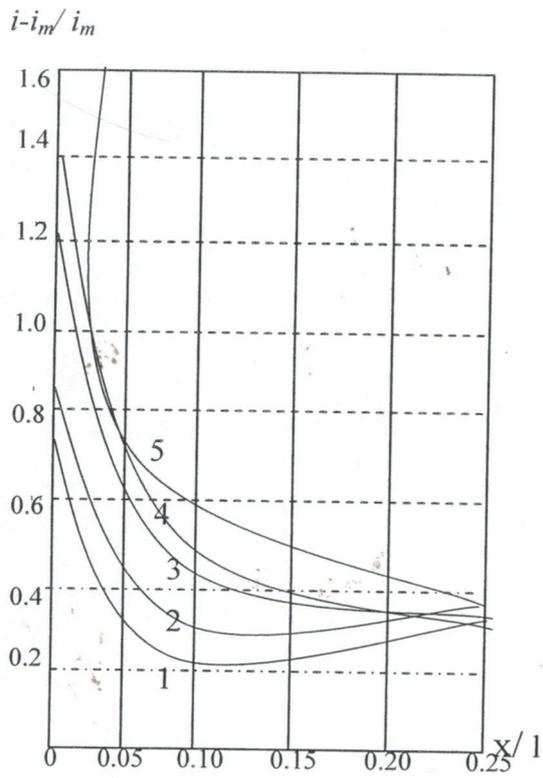


Figure. 4.4 : Distribution secondaire du courant pour la cellule de la figure 4.2, avec  $h \ll l$  [90]

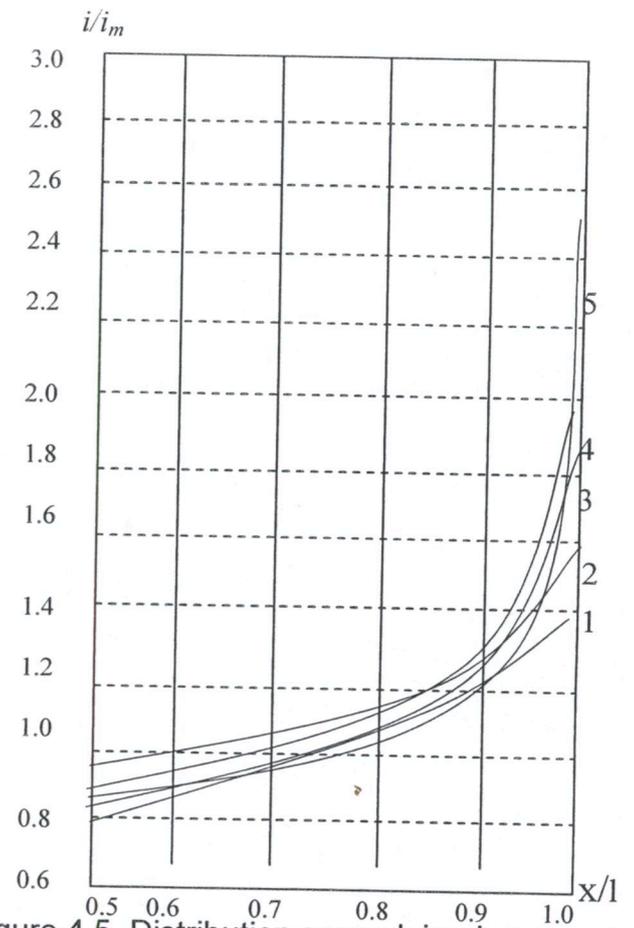


Figure 4.5. Distribution secondaire du courant pour la cellule de la figure 4.2, avec  $l \ll h$  [90]

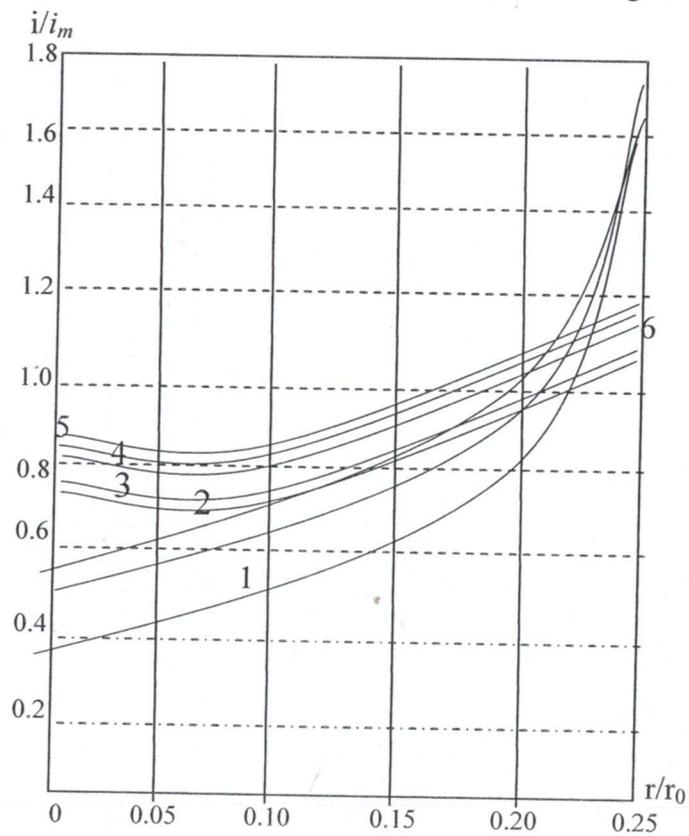


Figure. 4.6 : Distribution secondaire du courant pour une électrode à disque, de rayon  $r_0$  [90]

### 4.2.3 Distribution tertiaire

Pour la représentation de ce type, en plus de la surtension d'activation il faut prendre en compte la surtension de concentration. On définit la résistance

de concentration par :  $\frac{\partial \eta_c}{\partial i} = R_c$

Où  $\eta_c$  est la surtension de concentration.

La présence de gradients de concentration rend le traitement théorique beaucoup plus complexe. Le courant à l'intérieur de l'électrolyte n'est plus donné par l'équation (4.3). Celle-ci est remplacée par une relation plus générale faisant intervenir les concentrations  $C_k$  et les gradients de concentration des espèces ioniques en solution :

$$\bar{i} = -\frac{F^2}{R^*T} \nabla \varphi \sum_k z_k^2 D_k C_k - F \sum_k z_k D_k \nabla C_k \quad (4.6)$$

L'équation de Laplace n'est plus valable dans ce type de distribution. Après calcul analytique, nous obtenons sur la figure 4.7 l'évolution des courbes de densité de courant correspondants à la cellule de la figure 4.2, avec un écoulement laminaire du liquide parallèlement aux électrodes.

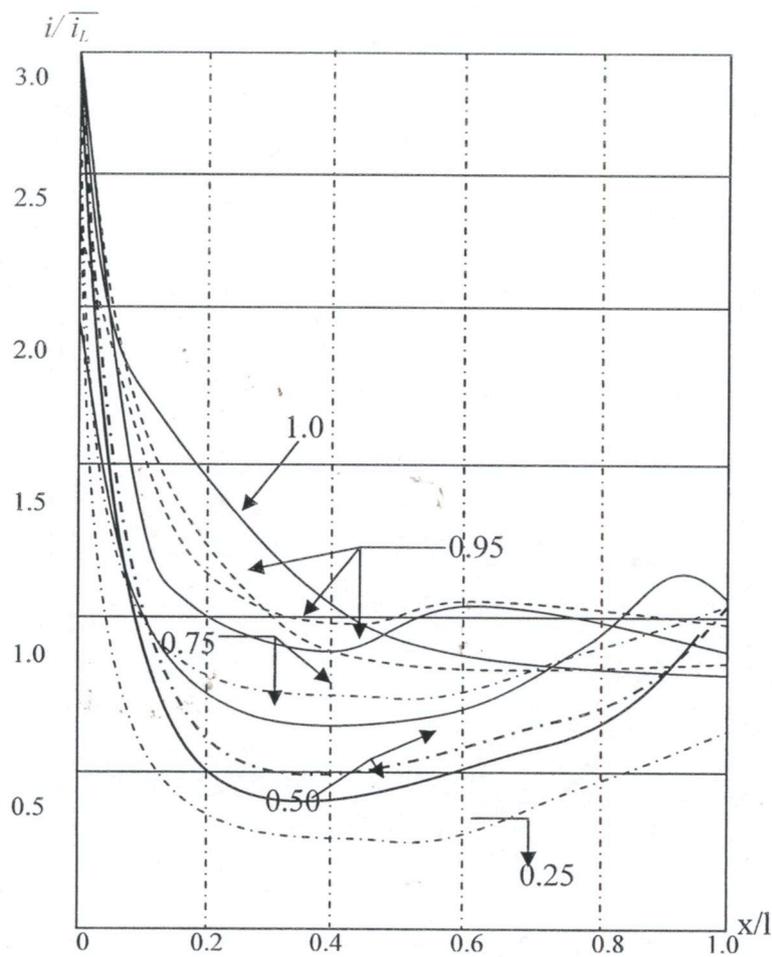


Figure. 4.7 : Distribution tertiaire de courant dans la cellule de la figure 4.2, avec écoulement laminaire du liquide parallèlement aux électrodes pour différente valeur de  $h/l$  [90]

#### 4.3 Rôle de la résistance Ohmique dans le cas de la protection cathodique

La protection cathodique consiste à imposer à la structure que l'on veut préserver un potentiel suffisamment négatif pour que la corrosion s'arrête. Pour cela il faut que le courant appliqué soit égal à la densité de courant de protection  $i_{pro}$  sur toute la surface.

Deux problèmes se posent alors :

1. quel est le courant total que peut fournir un système de protection.
2. quelle est la répartition du courant et du potentiel sur la surface à protéger.

Le courant total que peut fournir un système de protection dont on fixe la tension, ainsi que la répartition du courant et du potentiel sur la surface à protéger dépendent surtout de la **résistance ohmique** du milieu qui sépare les électrodes (déversoir anodique / pipeline).

Dans la plupart des cas, la dimension des anodes (déversoir anodique) est nettement plus petite que celle des structures qu'elles protègent. Au lieu de calculer la résistance ohmique de l'ensemble du système, il suffit d'estimer sa valeur au voisinage du déversoir anodique.

#### 4.3.1. Courant sous contrôle ohmique

Le comportement d'un système de protection cathodique par anode sacrificielle équivaut à celle d'une pile de corrosion galvanique, provoquant la corrosion de l'anode sacrificielle, l'équation (4.1) indique alors la variation du courant en fonction de la différence des potentiels de corrosion  $\Delta E_{corr}$  et des différentes résistances du système :

$$I = \frac{\Delta E_{corr}}{R_{\rho I} + R_{int} + R_{ext} + R_{\rho II}} \quad (4.7)$$

Où :

$R_{ext}$  : résistance des conducteurs électriques

$R_{\rho I}$  et  $R_{\rho II}$  : résistances de polarisation

$R_{int}$  : résistance ohmique du milieu

La résistance des conducteurs électriques dans un système de protection est normalement négligeable ( $R_{ext} = 0$ ). En plus, dans les milieux relativement peu conducteurs comme l'eau ou le sol, les résistances de polarisation  $R_{\rho I}$  et  $R_{\rho II}$  sont souvent faibles par rapport à la résistance ohmique du milieu  $R_{int} = R_{\Omega}$ . L'équation (4.7) devient :

$$I = \frac{\Delta E_{corr}}{R_{int}} \quad (4.8)$$

On appelle  $I$  l'intensité de courant sous contrôle ohmique.

D'après cette équation le courant ne dépend que de la différence de potentiel de corrosion entre l'anode et la structure à protéger ainsi que la résistance ohmique, celle-ci varie en fonction de la conductivité du milieu ainsi qu'à la géométrie des électrodes et en conséquence c'est la **distribution primaire** qui s'établit.

Contrairement aux systèmes de protection par anode sacrificielle, les systèmes de protection utilisant un redresseur de courant (courant imposé) permet de varier la tension de courant aux bornes  $\otimes$  selon les besoins. Donc pour un système de protection à courant imposé il faut remplacer l'équation (4.8) par l'équation (4.9), équation valable que si toutes les résistances  $R_{pl}$ ,  $R_{pII}$  et  $R_{ext}$  sont négligeables devant la résistance ohmique  $R_{\Omega}$ . L'intensité de courant  $I$  dépend alors de la tension appliquée  $U$  et de la résistance (interne) ohmique du système  $R_{\Omega}$ .

$$I = \frac{U - \Delta E_{corr}}{R_{\Omega}} \quad (4.9)$$

#### 4.3.2 Calcul de la résistance ohmique

Pour certains arrangements symétriques des électrodes, le calcul de la résistance ohmique se calcule facilement ; mais en cas des géométries très complexes il faut recourir à des méthodes numériques de calcul. Le calcul de celle-ci ( $R_{\Omega}$ ) passe par celui de la répartition du potentiel entre les électrodes. En l'absence d'effets dus aux surtensions, elle s'obtient en résolvant l'équation de Laplace (4.1). Les conditions limites aux parois isolantes et aux électrodes sont :

Aux parois isolantes :  $\frac{\partial \varphi}{\partial \zeta} = 0$

Aux électrodes :  $\frac{\partial \varphi}{\partial \zeta} = \frac{-i}{\kappa}$

Ici  $\xi$  représente la direction normale à la paroi.

$\kappa$  : conductivité de l'électrolyte, avec  $\kappa = 1/\rho$  et  $\rho$  représente la résistivité du milieu.

Pour le calcul de la résistance ohmique, la différence de potentiel entre le métal et l'électrolyte à la surface des électrodes est supposée constante :

$\varphi_m - \varphi_s = \text{Cst}$ , la polarisation des électrodes est donc négligée ; Cette condition correspond à une distribution primaire du courant.

#### 4.3.2.1 Résistance ohmique d'un système à électrodes sphériques

Pour une géométrie correspondant à deux électrodes sphériques concentriques de rayons  $r_1$  et  $r_2$ , telle que montrée sur la figure 4.8 :

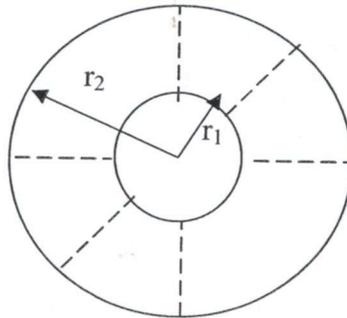


Figure. 4.8 : Cellule électrochimique à deux électrodes sphériques concentriques [15]

L'équation de Laplace s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = 0 \quad (4.10)$$

L'intégration donne :

$$\Delta \varphi_{\Omega} = \varphi_{2,s} - \varphi_{1,s} = -\frac{I}{2\pi\kappa} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (4.11)$$

Au cas où le rayon de la sphère extérieure est beaucoup plus grand que celui de la sphère intérieure ( $r_2 \gg r_1$ ), la valeur de  $\Delta \varphi_{\Omega}$  ne dépend que de  $r_1$ .

$$\Delta \varphi_{\Omega} = \varphi_{2,s} - \varphi_{1,s} = -\frac{I}{2\pi\kappa} \frac{1}{r_1} \quad (4.12)$$

La résistance ohmique vaut alors :

$$R_{\Omega} = \frac{1}{2\pi\kappa_1} \quad (4.13)$$



Cette équation reste valable même si l'électrode extérieure n'a pas la forme d'une sphère dans la mesure où sa surface est éloignée et beaucoup plus grande que celle de l'électrode sphérique. **Cette propriété des électrodes sphériques est importante pour le dimensionnement des systèmes de protection cathodique dans les sols.** Dans la plus part des situations, il suffit d'évaluer la résistance ohmique au voisinage de l'anode par l'équation précédente ou par des expressions similaires proposées pour des géométries différentes, au lieu de calculer la résistance ohmique de tout le système, ce qui constitue une tâche souvent très difficile.

Pour le cas de la protection cathodique de pipeline enterrés par courant imposé, H.B. Dwight a trouvé par des calculs empiriques la résistance ohmique de différents types de déversoir d'anodes, pour une tige cylindrique verticale par exemple la résistance ohmique est donnée par :

$$R_a = \rho \frac{1}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{r} - 1 \right) \quad (4.14)$$

Où :

$\rho$  : résistivité du sol en ( $\Omega.m$ ).

$L$  : longueur de l'anode en (m).

$r$  (m) rayon équivalent de la section droite avec  $r = P / 2\pi$   $P$  est le périmètre de cette section.

Dans le tableau (4.1) Dwight a énuméré les différentes résistances d'anodes selon leurs emplacements [91].

Tableau.4.1 : Résistances ohmique des déversoirs anodiques

Géométrie	Formules
Verticale (près de la surface)	$R_V = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{r_a} - 1 \right)$
Horizontale ou verticale (enfouie)	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{2L}{r} - 1 \right)$
Horizontale enfouie à une profondeur h	$R_H = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{4L}{r_a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \right)$
Enterrée à faible profondeur	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{D}$

## CHAPITRE 5

### TRAITEMENT MATHEMATIQUE ET REALISATION D'UNE INTERFACE DE COMMANDE DE PROTECTION CATHODIQUE PAR COURANT IMPOSÉ

Les différentes structures longilignes qu'utilise l'industrie des hydrocarbures sont soumises aux systèmes de protection cathodique par soutirage de courant. La réussite dans la conception de ces systèmes est basée sur l'étude de la distribution du potentiel et de l'intensité de courant le long de la structure à protéger.

#### 5.1 Implantation générale d'un système de protection cathodique par soutirage de courant (courant imposé)

Il importe de rappeler que la protection cathodique par soutirage de courant telle que montré sur la figure 5.1, 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 ou eau). Le courant continu débité par le générateur est diffusé dans l'électrolyte ambiant par le (ou les) déversoir(s) et est capté par la structure à protéger qui est ainsi portée à un potentiel électronégatif par rapport au milieu dans lequel elle se trouve. Le déversoir de courant doit être constitué d'un métal le moins corrodable possible pour avoir une durée de vie la plus longue possible.

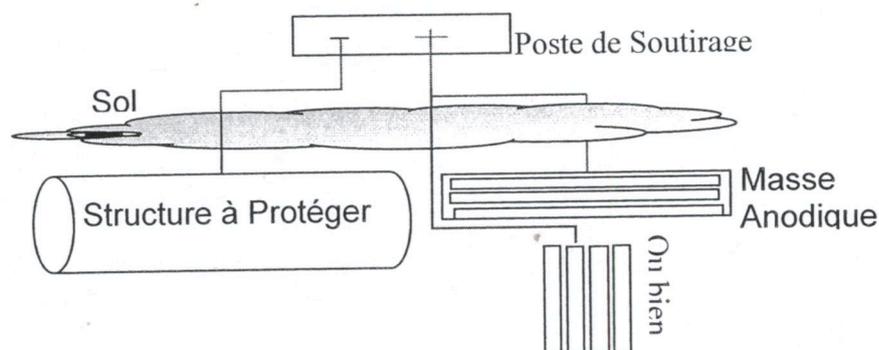


Figure. 5.1: Principe général d'Implantation d'un système de protection cathodique par soutirage de courant

## 5.2 Distribution du courant et du potentiel

En protection cathodique, il faut donc que toute la surface de la canalisation soit maintenue dans les limites de potentiel correspondant au domaine de protection. A cet effet, une étude générale sur l'influence des différents paramètres sur la distribution du potentiel le long du pipeline s'avère nécessaire. Dans le cas des pipelines, les surtensions d'activation et de concentration ne sont pas prises en compte (considérées négligeables). Par contre, la géométrie du système, la conductivité de l'électrolyte et les différentes résistances mises en jeu sont à considérer. Par conséquent, il en découle que la distribution du courant et du potentiel, dans ce type de système, serait du premier ordre ; et donc elle correspond à une distribution de type primaire.

## 5.3 Distribution de potentiel dans le cas de la protection cathodique d'une conduite enterrée en fonction de la distance

L'intensité du courant de protection  $I_s$  injecté dans le sol par le déversoir, se répartit à travers le sol et retourne à la conduite. Le passage du courant provoque dans la conduite un abaissement du potentiel.

Considérons une conduite de longueur  $L$  et de caractéristiques suivantes :

$r$  : résistance longitudinale ohmique d'un mètre de conduite ( $r$  en Ohm/m),  $R$  : résistance transversale du revêtement isolant pour 1 mètre de conduite ( $R$  en Ohm.m). Chaque élément  $AB$  de longueur  $dx$  de la conduite, situé à la distance  $x$  du point de soutirage est représenté par le schéma ci-contre :

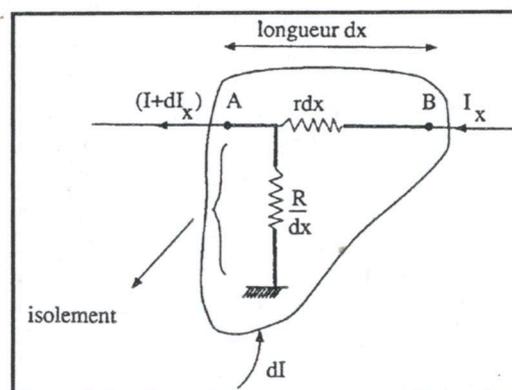


Figure. 5.2: Schéma électrique d'une portion de conduite traversée par un courant

Si l'on effectue un bilan de charges à travers l'élément  $dx$  de la conduite, en considérant que le gradient de potentiel dans la conduite obéit à une loi du type la loi d'Ohm, cet élément subit une entrée de courant transversal, à tout point de la canalisation de potentiel  $E$  donnée par:

$$dI = \frac{E}{R} dx$$

Aussi, la chute de potentiel le long de l'élément  $AB$  de la canalisation est donnée par:

$$dE = r dx \cdot I$$

En admettant que, à l'interface, seule la résistance du revêtement est à considérer et reliée au potentiel du métal par la relation linéaire  $E = R \cdot I$ . (assimilée à une résistance de polarisation dans le cas d'un transfert de charge). Ainsi, pour une valeur de potentiel fixe, si la résistance  $R$  augmente l'intensité de courant doit diminuer et vice versa.

Par conséquent,

$$dIx = \frac{Ex}{R} \cdot dx \quad (1)$$

Traduisant les entrées du courant à travers le revêtement

$$dEx = r \cdot Ix \cdot dx \quad (2)$$

Traduisant la chute du potentiel au point  $x$  de la conduite provoquée par le passage du courant.

La variation du courant  $I$  le long de la structure :

$$\begin{aligned} \frac{dEx}{dx} = r \cdot Ix &\Leftrightarrow (2) \Leftrightarrow \frac{d^2 Ex}{dx^2} = r \cdot \left( \frac{dI}{dx} \right) \\ &\Leftrightarrow \frac{d^2 Ex}{dx^2} = r \cdot \frac{Ex}{R} \Leftrightarrow \frac{d^2 Ex}{dx^2} = \frac{r}{R} \cdot Ex \\ &\Leftrightarrow \frac{d^2 Ex}{dx^2} = a^2 Ex \end{aligned}$$

On pose :

- $\alpha = \sqrt{\frac{r}{R}}$  : Facteur d'atténuation
- $\lambda = \sqrt{r \cdot R}$  : Résistance caractéristique de la conduite

D'où l'équation différentielle type Laplace :

$$\frac{d^2 Ex}{dx^2} - \alpha^2 Ex = 0 \quad (3)$$

Cette équation possède deux solutions, dont la forme mathématique est :

$$Ex = Ae^{-\alpha x} + Be^{+\alpha x} \quad (4)$$

$$\frac{dEx}{dX} = r \cdot Ix \Leftrightarrow \frac{1}{r} \frac{dEx}{dX} = Ix$$

$$Ix = \frac{1}{r} \frac{dEx}{dX} = \frac{1}{r} (4)' = \frac{1}{r} (-\alpha Ae^{-\alpha x} + \alpha Be^{+\alpha x})$$

Ou (a) décide l'abaissement de la courbe

$$Ix = -\frac{\alpha}{r} \cdot Ae^{-\alpha x} + \frac{\alpha}{r} \cdot Be^{+\alpha x} \quad (5)$$

Sachant que :

$$\frac{\alpha}{r} = \sqrt{\frac{r}{R}} r^{-1} = \frac{r^{\frac{1}{2}}}{R^{\frac{1}{2}}} \cdot r^{-1} = \frac{1}{r^{\frac{1}{2}} \cdot R^{\frac{1}{2}}} = \frac{1}{\sqrt{r \cdot R}} = \frac{1}{\lambda} \quad \text{par définition}$$

$$(5) \Rightarrow Ix = -\frac{A}{\lambda} \cdot e^{-\alpha x} + \frac{B}{\lambda} \cdot e^{+\alpha x} \quad (6)$$

On pose :

- $a = \sqrt{\frac{r}{R}}$  : Facteur d'atténuation
- $\lambda = \sqrt{r \cdot R}$  : Résistance caractéristique de la conduite

D'où l'équation différentielle type Laplace :

$$\frac{d^2 Ex}{dx^2} - a^2 Ex = 0 \quad (3)$$

Cette équation possède deux solutions, dont la forme mathématique est :

$$Ex = Ae^{-ax} + Be^{+ax} \quad (4)$$

$$\frac{dEx}{dX} = r \cdot Ix \Leftrightarrow \frac{1}{r} \frac{dEx}{dX} = Ix$$

$$Ix = \frac{1}{r} \frac{dEx}{dX} = \frac{1}{r} (4)' = \frac{1}{r} (-aAe^{-ax} + aBe^{+ax})$$

Ou (a) décide l'abaissement de la courbe

$$Ix = -\frac{a}{r} \cdot Ae^{-ax} + \frac{a}{r} \cdot Be^{+ax} \quad (5)$$

Sachant que :

$$\frac{a}{r} = \sqrt{\frac{r}{R}} r^{-1} = \frac{r^{\frac{1}{2}}}{R^{\frac{1}{2}}} \cdot r^{-1} = \frac{1}{r^{\frac{1}{2}} \cdot R^{\frac{1}{2}}} = \frac{1}{\sqrt{r \cdot R}} = \frac{1}{\lambda} \quad \text{par définition}$$

$$(5) \Rightarrow Ix = -\frac{A}{\lambda} \cdot e^{-ax} + \frac{B}{\lambda} \cdot e^{+ax} \quad (6)$$

On obtient donc le système d'équation suivant :

$$E_x = A e^{-ax} + B e^{+ax} \quad (4)$$

$$I_x = -\frac{A}{\lambda} \cdot e^{-ax} + \frac{B}{\lambda} \cdot e^{+ax} \quad (6)$$

En appliquant les conditions aux limites :

$E_{x=0} = E_0$  Potentiel minimal de protection, appelé potentiel de soutirage ( $E_s$ )

$I_{x=0} = I_0$  Courant de protection, appelé courant de soutirage ( $I_s$ )

$E_{x=L} = E_L$  Potentiel minimal de protection à l'extrémité de la conduite

$I_{x=L} = 0$  Le courant s'annule à l'extrémité de la conduite du fait de l'atténuation (a)

$$\begin{cases} E_0 = A + B \\ I_0 = \frac{-A}{\lambda} + \frac{B}{\lambda} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} E_0 = A + B \\ I_0 \lambda = -A + B \end{cases} \quad (7)$$

(8)

$$(7)-(8) \quad E_0 - I_0 \lambda = A + B - (-A) - B = 2A$$

D'où :  $A = \frac{E_0 - I_0 \lambda}{2}$

D'autre part on a:

$$(7)+(8) \quad E_0 + I_0 \lambda = A + B - A + B = 2B$$

D'où :  $B = \frac{E_0 + I_0 \lambda}{2}$

On met (A) et (B) dans l'équation (7)

$$E_x = \frac{E_0 - I_0 \lambda}{2} e^{-ax} + \frac{E_0 + I_0 \lambda}{2} e^{+ax}$$

$$\Rightarrow Ex = \frac{E_0}{2} e^{-ax} - \frac{I_0 \lambda}{2} e^{-ax} + \frac{E_0}{2} e^{+ax} + \frac{I_0 \lambda}{2} e^{+ax}$$

$$\Rightarrow Ex = E_0 \left( \frac{e^{-ax} + e^{+ax}}{2} \right) + I_0 \lambda \left( \frac{-e^{-ax} + e^{+ax}}{2} \right)$$

$$\Rightarrow Ex = E_0 (\cosh(ax)) - I_0 \lambda \left( \frac{e^{-ax} - e^{+ax}}{2} \right) \quad (8)$$

$$\Rightarrow Ex = E_0 (\cosh(ax)) - I_0 \lambda (\sinh(ax))$$

D'autre part on a :

$$Ix = -\frac{A}{\lambda} e^{-ax} + \frac{B}{\lambda} e^{+ax}$$

$$Ix = -\left( \frac{E_0 - I_0 \lambda}{2} \right) \frac{1}{\lambda} e^{-ax} + \left( \frac{E_0 + I_0 \lambda}{2} \right) \frac{1}{\lambda} e^{+ax}$$

$$\Rightarrow I_x = -\frac{E_0}{2\lambda} \cdot e^{-ax} + \frac{I_0}{2} \cdot e^{-ax} + \frac{E_0}{2\lambda} \cdot e^{ax} + \frac{I_0}{2} \cdot e^{ax}$$

$$\Rightarrow Ix = \frac{E_0}{\lambda} \left( \frac{-e^{-ax} + e^{+ax}}{2} \right) + I_0 \left( \frac{e^{-ax} + e^{+ax}}{2} \right)$$

$$\Rightarrow Ix = I_0 (\cosh(ax)) - \frac{E_0}{\lambda} (\sinh(ax)) \quad (9)$$

On appliquant les conditions aux limites on obtient le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} Ex = E_S (\cosh(ax)) - I_S \lambda (\sinh(ax)) & (8) \end{cases}$$

$$\begin{cases} Ix = I_S (\cosh(ax)) - \frac{E_S}{\lambda} (\sinh(ax)) & (9) \end{cases}$$

$x=L$

$$(9) \quad \Rightarrow I_{x=L} = 0 = I_S (\cosh(ax)) - \frac{E_S}{\lambda} (\sinh(ax))$$

$$\Rightarrow \frac{E_S}{\lambda} (\sinh(al)) = I_S (\cosh(al)) \Leftrightarrow I_S = \frac{E_S \sinh(al)}{\lambda \cosh(al)} \quad \text{dans (8)}$$

On obtient donc:

$$\begin{aligned} \Rightarrow E_x &= \frac{E_s}{\lambda} (\cosh(ax)) - \lambda \frac{E_s \sinh(al)}{\lambda \cosh(al)} (\sinh(ax)) \\ \Rightarrow E_x &= E_s \left[ \cosh(ax) - \frac{\sinh(al)}{\cosh(al)} (\sinh(ax)) \right] \\ \Rightarrow E_x &= E_s \left[ \frac{\cosh(ax) \cosh(al) - \sinh(al) \sinh(ax)}{\cosh(al)} \right] \end{aligned}$$

Ainsi la distribution du potentiel le long de la canalisation de longueur l est donnée par l'expression du potentiel en fonction de la distance

$$\Rightarrow E_x = E_s \left( \frac{\cosh \alpha(l-x)}{\cosh(\alpha l)} \right) \quad (10)$$

Pour X=L

$$(8) \Rightarrow I_{x=l} = 0 = I_s \cosh(al) - \frac{E_s}{\lambda} \sinh(al)$$

$$\Rightarrow \frac{E_s}{\lambda} \sinh(al) = I_s \cosh(al) \Leftrightarrow E_s = I_s \lambda \frac{\cosh(\alpha l)}{\sinh(\alpha l)} \quad \text{Dans (9)}$$

On obtient donc:

$$\begin{aligned} I_x &= I_s \cosh(ax) - \frac{I_s \lambda \cosh(al)}{\lambda \sinh(al)} \sinh(ax) \\ \Rightarrow I_x &= I_s \left[ \cosh(ax) - \frac{\cosh(al)}{\sinh(al)} \sinh(ax) \right] \\ \Rightarrow I_x &= I_s \left[ \frac{\cosh(ax) \sinh(al) - \cosh(al) \sinh(ax)}{\sinh(al)} \right] \end{aligned}$$

Aussi la distribution du potentiel le long de la canalisation de longueur l est donnée par l'expression du courant en fonction de la distance

$$\Rightarrow I_x = I_s \frac{\sinh \alpha(l-x)}{\sinh(\alpha l)} \quad (11)$$

Il apparaît que le facteur d'atténuation ( $a$ ) joue un rôle essentiel à la fois dans la distribution du potentiel et celle du courant. Ce facteur dépend de la résistivité du matériau du pipe et surtout de la résistance transversale du revêtement qui évolue évidemment avec le temps.

#### 5.4 Calcul de la résistance transversale du revêtement isolant

Tout revêtement isolant utilisé dans le système de protection cathodique est caractérisé à un instant ( $t$ ) par sa résistance transversale qui est fonction de la résistance d'isolement; elle-même dépendant de la résistance initiale ( $R_{is(t_0)}$ ), du coefficient Vieillessement ( $\beta$ ) et du temps d'exploitation. Pour des revêtements de type polyéthylène la résistance d'isolement ( $R_{is(t_0)}$ ), est donnée par la relation suivante [95]:

$$R_{is(t)} = \frac{R_{is(t_0)}}{(\beta \cdot t)(1 - \exp(-\beta \cdot t))} \quad (12)$$

La résistance transversale d'isolement  $R_{Trans}$  est donc donnée par la relation ci-dessous :

$$R_{Trans} = \frac{R_{is(t)}}{\pi \cdot D_{ext}} \quad (13)$$

#### 5.5 Effet de résistance transversale du revêtement sur la répartition du potentiel de protection

L'état du revêtement joue un rôle très important dans la répartition du potentiel le long de la structure à protéger et ceci se traduit par une résistance transversale du revêtement liée au facteur d'atténuation.

On trace sur La figure (5.3) ci-dessous l'évolution du potentiel de protection le long de la conduite à protéger, pour deux valeurs distinctes de la résistance d'isolement et donc de la valeur de la résistance transversale, pour un potentiel de soutirage ( $E_s$ ) et une résistance longitudinale ( $r$ ) donné.

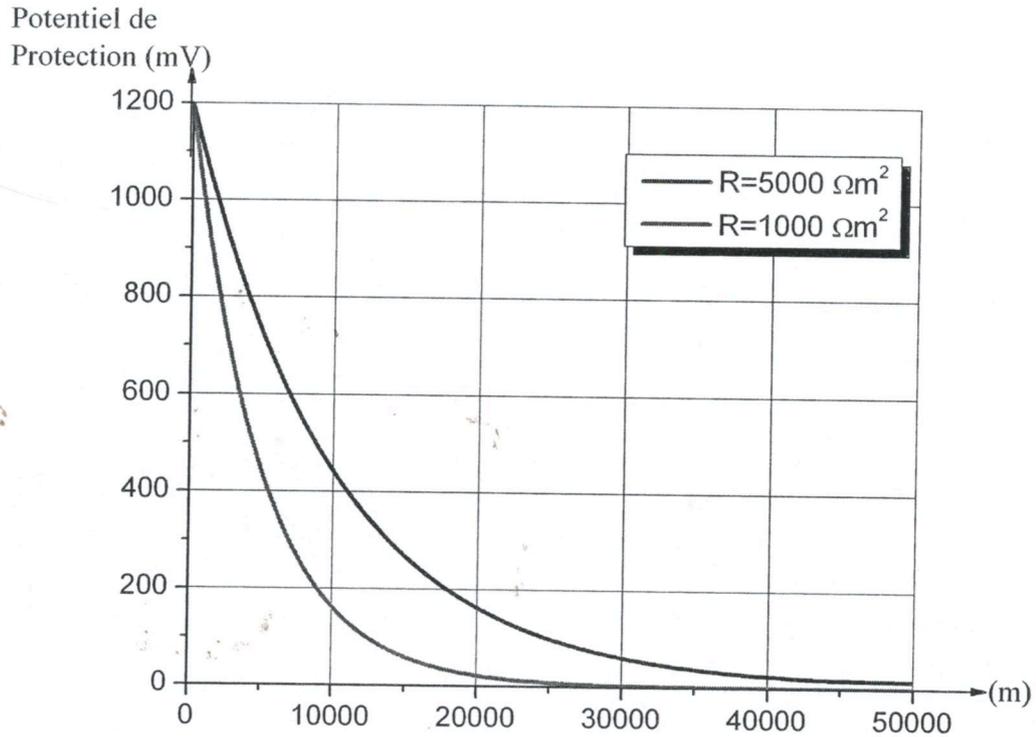


Figure. 5.3 : Evolution du potentiel de protection le long de la canalisation pour deux résistances d'isolement différentes

De cette évolution du potentiel on constate que plus la résistance d'isolement est importante plus le facteur d'atténuation devient faible, et plus la portée du soutirage croît.

Inversement avec un facteur d'atténuation important, la portée du soutirage qui est fonction de la résistance d'isolement se réduit; aussi la protection d'un ouvrage de faible valeur d'isolement devra nécessiter l'installation de plusieurs soutirages répartis tout le long de l'ouvrage.

Les coûts de la protection sont donc fonction de l'état du revêtement de l'ouvrage à protéger; le contrôle de l'intégrité de celui-ci joue alors un rôle prépondérant dans le maintien de bas coûts de revient du système de protection.

### 5.6 Calcul de la résistance du déversoir (résistance de terre)

Tel qu'abordé au chapitre 2, le déversoir sert à injecter le courant de protection cathodique dans le sol. Il doit donc être constitué de matériaux conducteurs de courant. La masse du matériau constituant le déversoir devra être déterminé pour que l'installation ait une durée de vie de l'ordre de 15 à 20 ans ou plus selon le cahier de charge établi par le maître de l'ouvrage.

Le calcul de la résistance du déversoir passe par une bonne optimisation des différentes dimensions d'anodes. Dans la pratique on s'arrange pour avoir des déversoirs présentant des résistances d'environ 10 Ohm ( $R_{Thé}$ ) [13].

Pour nôtre étude on étudiera deux types d'implantations à savoir vertical et horizontal tel que données par Dwight (chapitre 4).

#### Implantation verticale du déversoir :

Constitué généralement d'anodes de forme cylindrique, circulaire ou parallélépipédiques, la résistance de ce type d'implantation est donnée par la formule suivante :

$$R_V = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{r_a} - 1 \right) \quad (14)$$

Avec :

$R_V$  : Résistance, en Ohm

$\rho$  : Résistivité du sol, en Ohm.m

$r_a$  : Rayon de l'anode, en m

#### Implantation horizontale du déversoir

La résistance d'un déversoir de ce type constitué d'une rangée d'anode est donnée par la formule suivante :

$$R_H = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{4L}{r_a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \right) \quad (15)$$

Avec :  $R_H$  : Résistance, en Ohm

$\rho$  : Résistivité du sol, Ohm.m

$2L$  : longueur, en m

$\frac{s}{2}$  : Profondeur, en m

$r_a$  : Rayon de l'anode (rail, profilé, etc.)

### 5.6.1 Différents types d'anodes utilisées pour les déversoirs

Les anodes disponibles sur le marché ont des caractéristiques définies par le constructeur, il suffit donc simplement de faire le calcul de la résistance totale du déversoir correspondant, qu'il soit implanté de manière verticale ou horizontale. A titre d'exemple les tableaux suivants donnent la longueur et le diamètre ainsi que le pouvoir de dissolution.

Pour des anodes en Ferro-silicium livrées généralement sous forme de barreaux cylindriques, les dimensions les plus courantes sont données au tableau suivant [13] :

Tableau. 5.1: Dimensions des anodes Ferro-silicium

Diamètre (mm)	Longueur (m)	Masse en kg
38	0.915	7.5
51	1.22	19.0
51	1.525	23.0
64	1.525	35.0
76	1.525	50.0
114	1.525	100.0

Pour des anodes en graphite généralement sous forme cylindrique ; les dimensions les plus courantes sont les suivantes :

Tableau. 5.2: Dimensions des anodes graphite

Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Masse (kg)
60	1500	7.5
70	1850	9.2
70	1500	10.2
100	1200	13.0
100	1500	20.8
100	1850	32.0
150	1850	57.6

Pour des raisons économiques, on a choisi des anodes en fer qui sont largement disponibles sur le marché algérien et à des prix modérés sous forme de rails, de canalisations ou de poutrelles de rebut en acier. Dans le cas du rail qui est constitué en majorité de fer, sa masse linéaire est de 40kg/m, et d'après la loi de Faraday son pouvoir de dissolution est de 9 kg/A/an. La masse anodique du déversoir est calculée avec la loi :  $M = I \cdot p \cdot t$  (kg) [6]. Il suffit de calculer à présent la longueur du rail qui est le rapport entre la masse anodique du déversoir (rails) et sa masse linéaire.

#### 5.6.2 Mise en évidence de différentes dimensions sur le calcul de la résistance du déversoir

Comme la valeur de la résistance du déversoir est d'un rôle capital dans la distribution du potentiel de protection le long de la structure, et pour une bonne optimisation de celle-ci, il est important de mettre en relief l'impact de chacun des paramètres sur le calcul de cette dite résistance, par le biais de l'interface de commande élaborer en programme Matlab, on tracera les graphes suivants montrant ainsi l'effet des différentes dimensions sur le calcul de la résistance d'un déversoir de type Ferro-Silicium (Fe-Si), en position verticale et horizontale. Les graphes suivants montrent l'effet de différentes dimensions telles que : la résistivité  $p$  du sol, la longueur et le rayon d'anode pour les deux types d'implantation, et la profondeur d'emplacement d'anode pour le cas d'une implantation en horizontal.

### Implantation verticale

#### 1. Effet de la résistivité du sol :

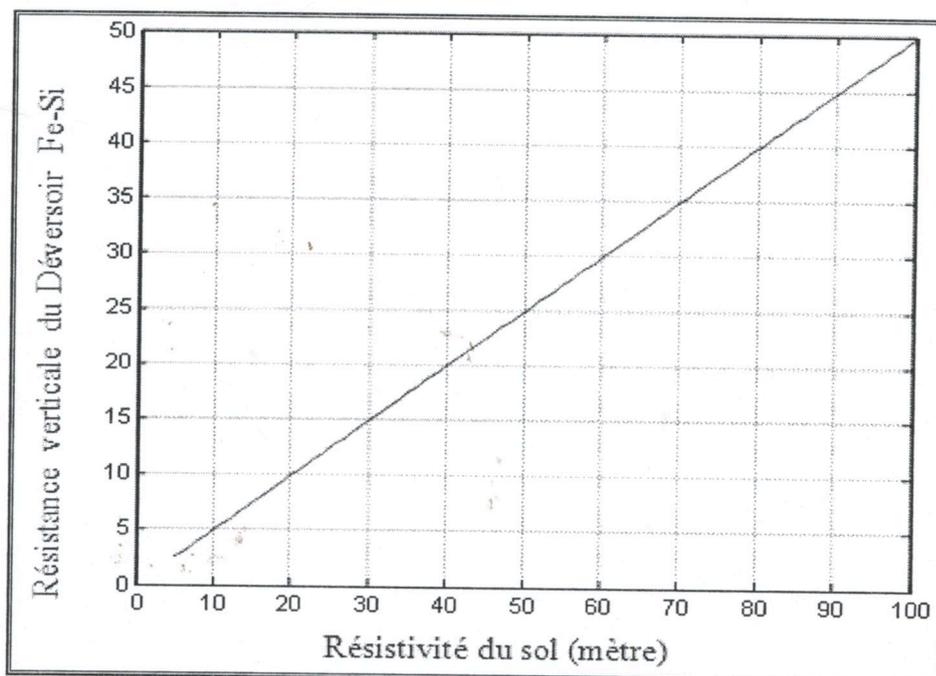


Figure .5.4 : Effet de la résistivité du sol sur la résistance verticale du déversoir (Fe-Si)

#### 2. Effet de la longueur d'anode :

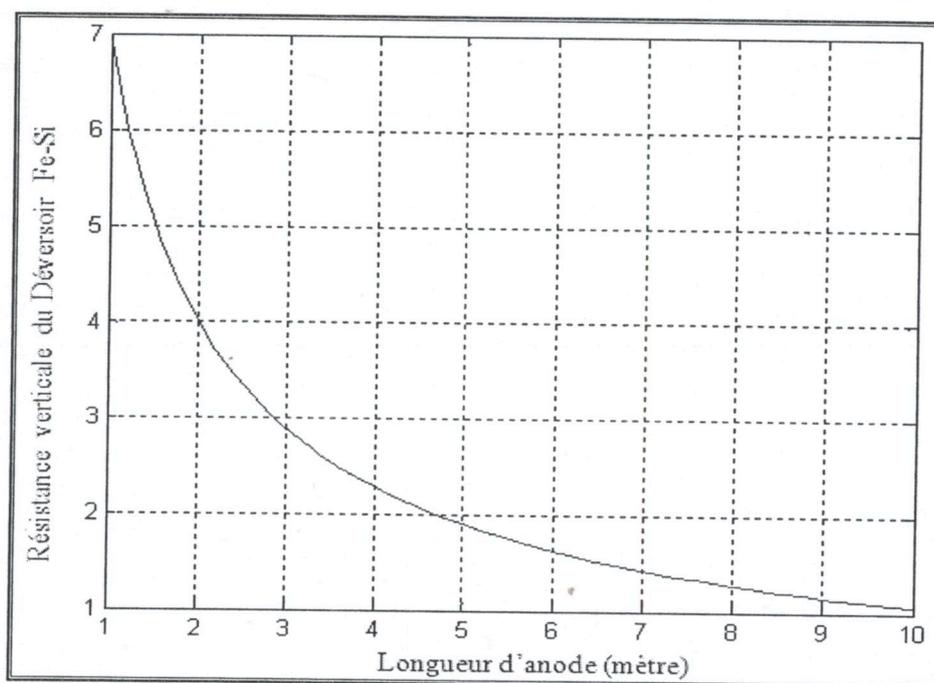


Figure. 5.5: Effet de la longueur d'anode sur la résistance verticale du déversoir (Fe-Si)

### 3. Effet du rayon d'anode :

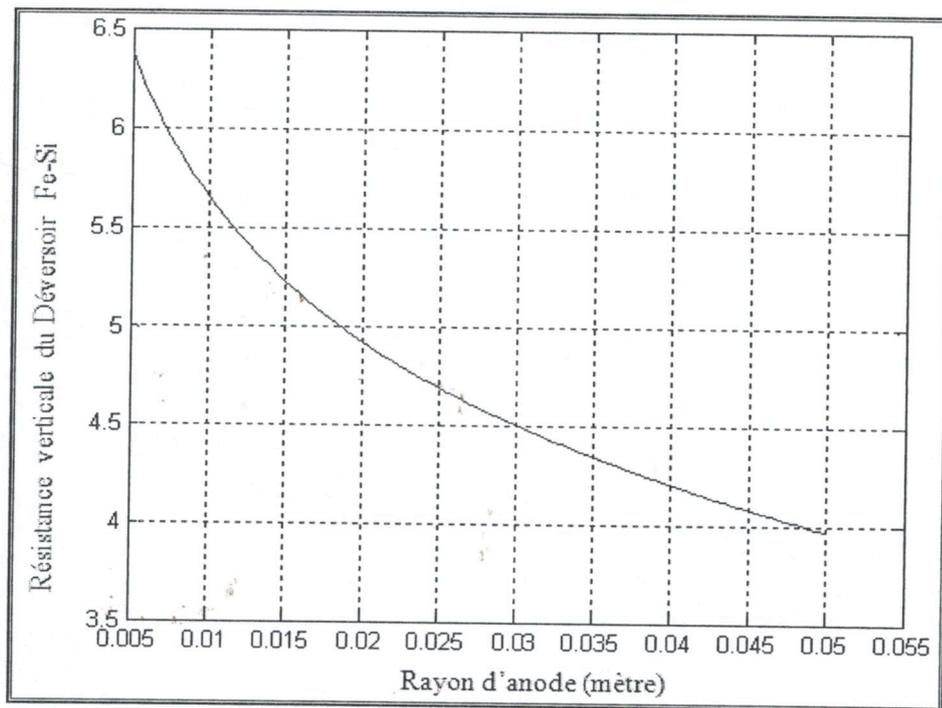


Fig. 5.6 : Effet du rayon d'anode sur la résistance verticale du déversoir (Fe-Si)

### Implantation horizontale

#### 1. Effet de la résistivité du sol :

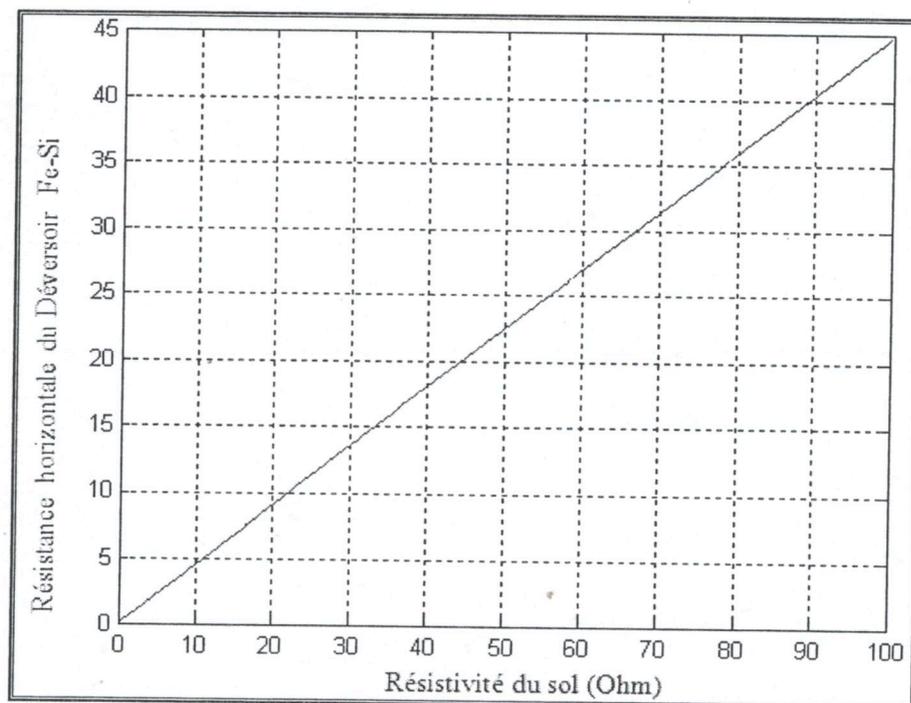


Figure. 5.7 : Effet de la résistivité du sol sur la résistance horizontale du déversoir (Fe-Si)

## 2. Effet de la longueur d'anode :

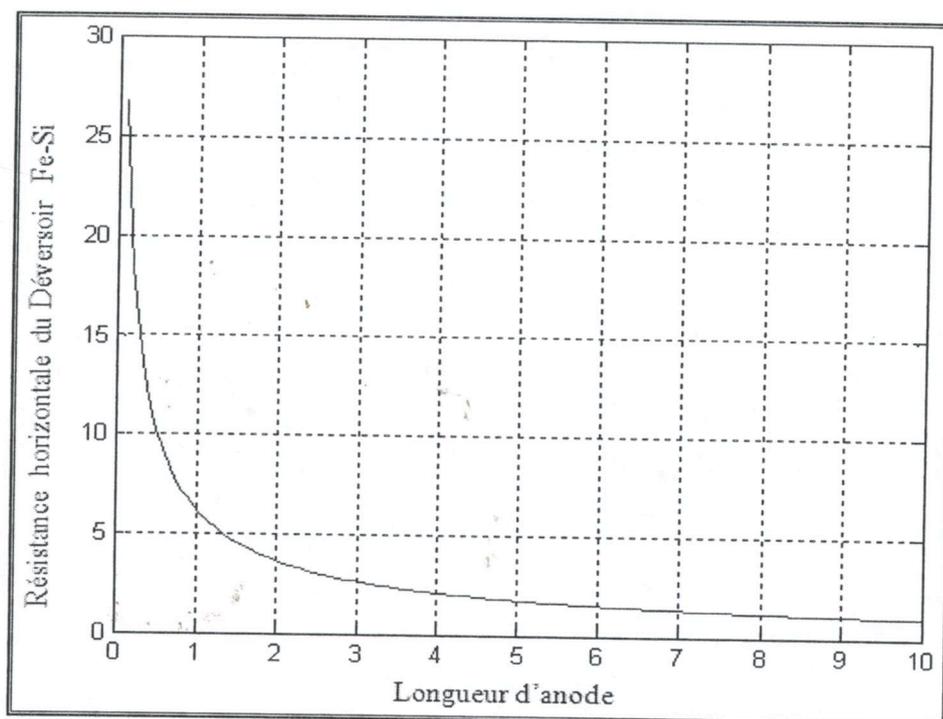


Figure.5.8 : Effet de la longueur d'anode sur la résistance horizontale du déversoir (Fe-Si)

## 3. Effet du rayon d'anode :

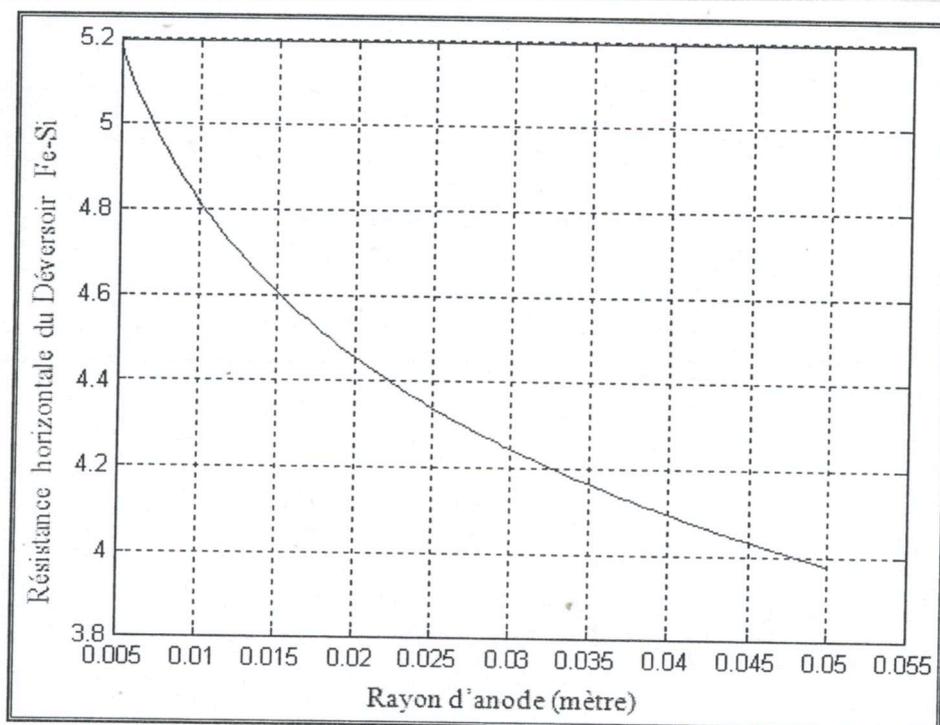


Figure. 5.9 : Effet du rayon d'anode sur la résistance horizontale du déversoir (Fe-Si)

#### 4. Effet de la profondeur d'emplacement d'anode :

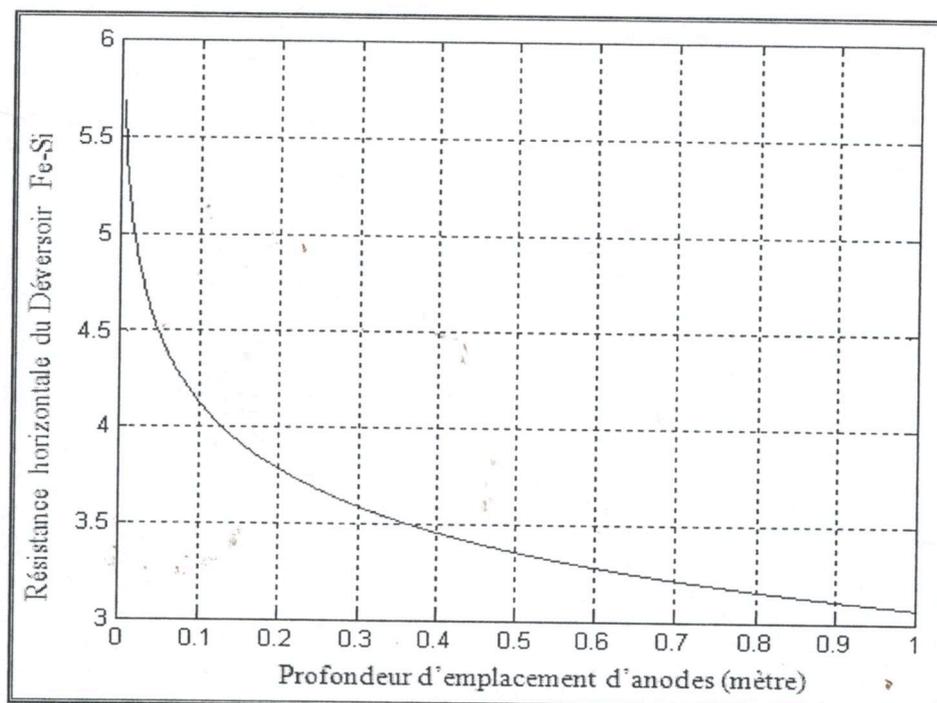


Figure. 5.10 : Effet de la profondeur d'emplacement sur la résistance horizontale du déversoir (Fe-Si)

Il apparaît à travers ces graphes que les grandeurs tels que la résistivité, la longueur d'anode, le rayon, ainsi que la profondeur d'emplacement influent d'une façon considérable sur la résistance dans les deux cas d'implantation.

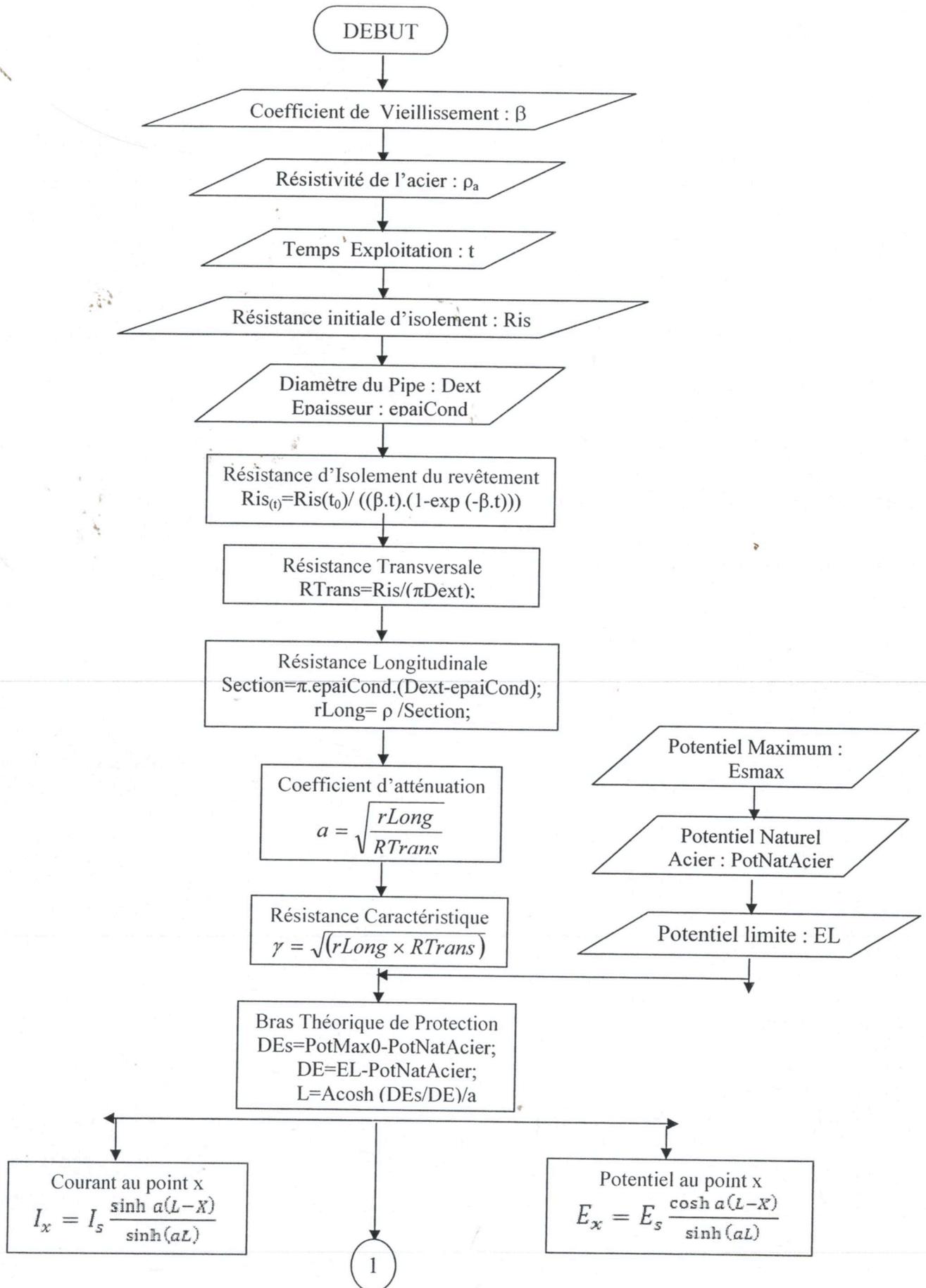
Ceci dit, mis à part la résistivité du sol, valeur dépendante de la nature du sol (électrolyte) et dont il faut prendre une valeur moyenne minimale, il est possible d'optimiser les autres dimensions dans le but d'arriver à une résistance de déversoir la plus proche de celle de la résistance idéale d'environ 1 Ohm et avec une estimation en coût la plus modérée [13].

### 5.7. Organigramme de calcul et interface de commande du système de protection cathodique par soutirage de courant

La bonne distribution du potentiel de protection le long de la structure dépend essentiellement de l'optimisation des emplacements et des valeurs des résistances de terre (déversoirs anodiques), ainsi que de la valeur du coefficient d'atténuation ( $\alpha$ ) qui est fonction de la résistance d'isolement et donc de l'état du revêtement.

Notre travail consiste à réaliser une interface de dimensionnement et de contrôle moyennant l'outil de programmation « **MATLAB7** » (voir Annexe) avec laquelle une simulation interactive est possible. Cette simulation interagit avec plusieurs paramètres afin d'optimiser la résistance de terre et adapter celle-ci en tant que paramètre essentiel dans le dimensionnement et prendre les coûts comme paramètres complémentaires. Ceci permettra une interaction entre le besoin d'engineering et l'implantation du système de **PC**, ce mode interactif pourra être étendu à un monitoring en temps réel permettant ainsi d'éviter des catastrophes écologiques (déversement de produits) et économique (perte et arrêt de production) et surtout préserver des vies humaines.

On présente ci-dessous l'organigramme du programme « **MATLAB7** » qui permet de déterminer et d'optimiser les différents paramètres de dimensionnement de notre système, ainsi que l'interface qui permet d'agir sur ce programme pour faire varier les paramètres de la protection cathodique afin de les adapter pour n'importe quelle structure.



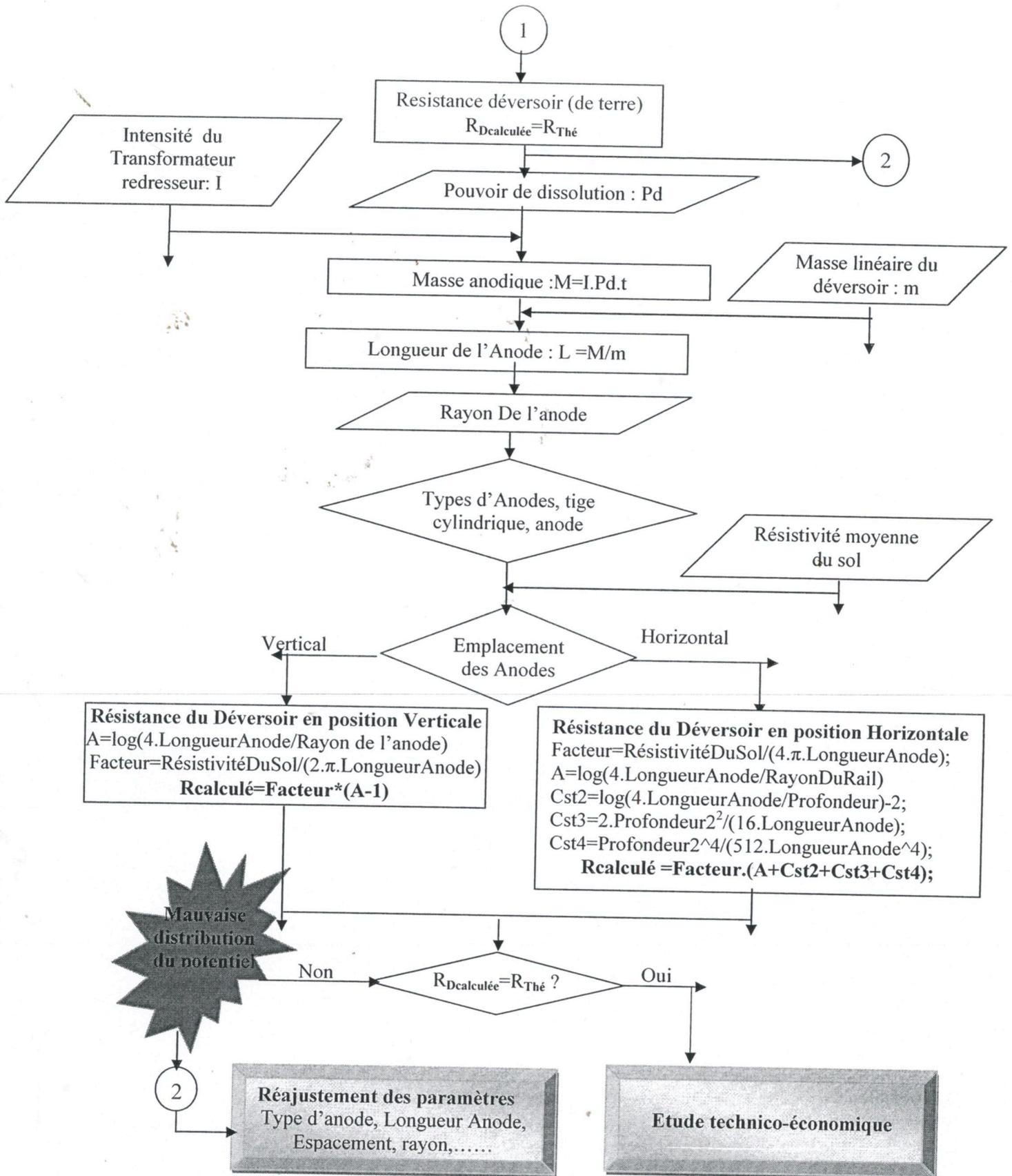


Figure. 5.11: Organigramme de l'interface de commande et de contrôle du système de protection cathodique par soutirage de courant

### 5.7.1. Réalisation d'une interface de dimensionnement et de contrôle du système de protection cathodique par soutirage de courant

A l'issue du programme établi selon l'organigramme présenté ci-dessus, on a élaboré une interface de dimensionnement et de contrôle avec une implantation du déversoir d'anodes en fer respectivement en position verticale et horizontale a été comme montrer dans les figures 5.12 et 5.13 .

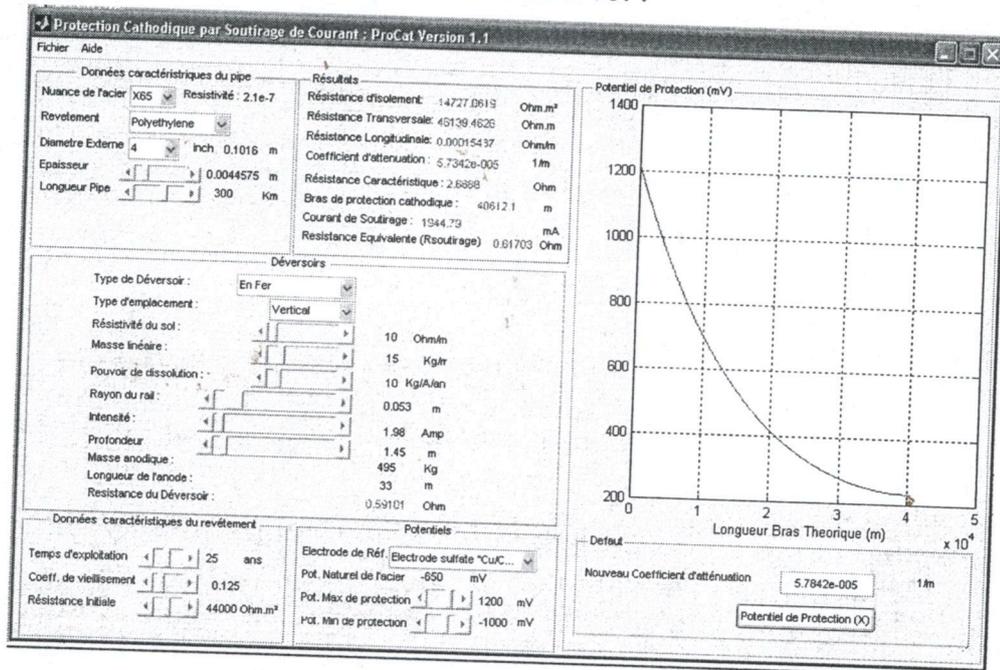


Figure. 5.12: Interface de dimensionnement et de contrôle du système de protection cathodique avec une implantation verticale d'un déversoir en Fer

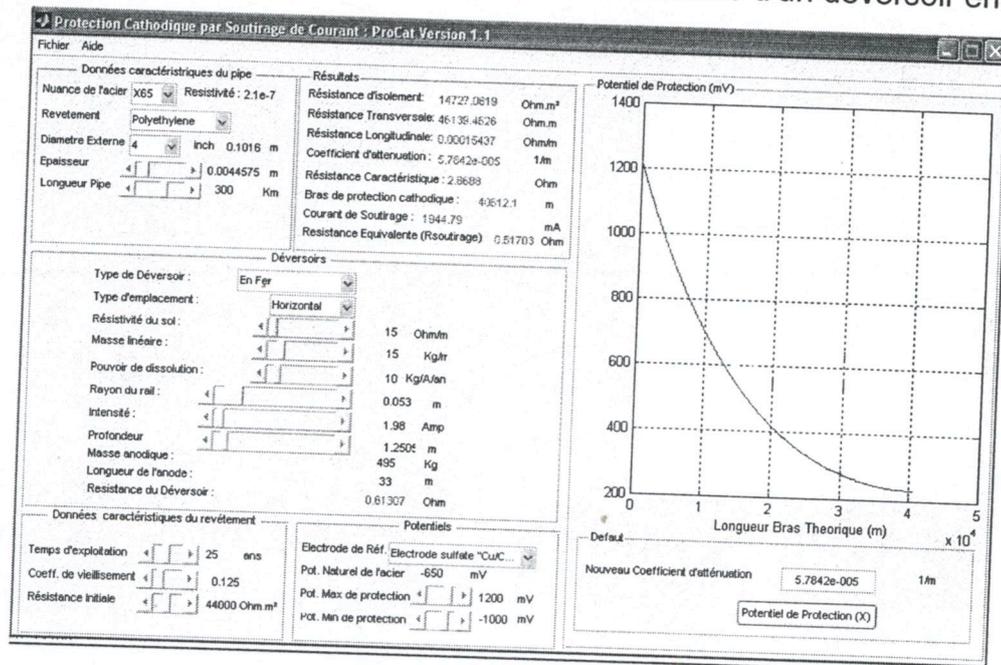


Figure. 5.13: Interface de dimensionnement et de contrôle du système de protection cathodique avec une implantation horizontale d'un déversoir en Fer

### 5.7.2 Utilisation de l'interface dans le monitoring à distance

Nous avons jugé utile d'utiliser cette interface pour assurer une surveillance en continu de l'état de notre pipeline en temps réel et d'intervenir au moment opportun.

A cet effet un programme a été établi, pour un coefficient d'atténuation constant ( $a_1$ ) ; notre conduite est maintenue dans la zone de protection ceci est symbolisé par une couleur bleu, lorsque un défaut inapparent surgit au niveau de l'isolement par exemple l'atténuation de la courbe de potentiel de protection s'accroît de plus en plus et est mise en évidence par la couleur rouge caractéristique d'un nouveau coefficient d'atténuation ( $a_2$ ), la figure 5.14 montre bien cette effet.

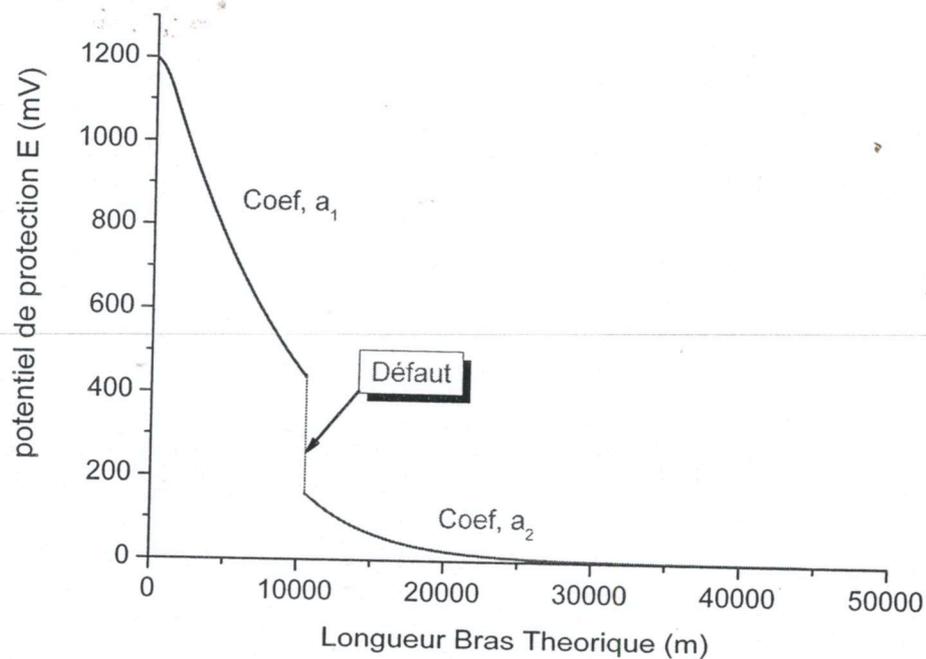


Figure. 5.14: Effet de différents coefficients d'atténuation sur l'évolution du potentiel de protection

Par le biais de l'interface telle que reporté sur la figure 5.15, ce cas de figure est également mis en évidence.

Ainsi, à l'aide d'enregistrements de potentiel à des points pris à des distances bien déterminées de notre structure, nous pourrons grâce à cette interface détecter l'endroit exact du défaut et sur ce, pouvoir intervenir en temps réel afin assurer les réparations nécessaires.

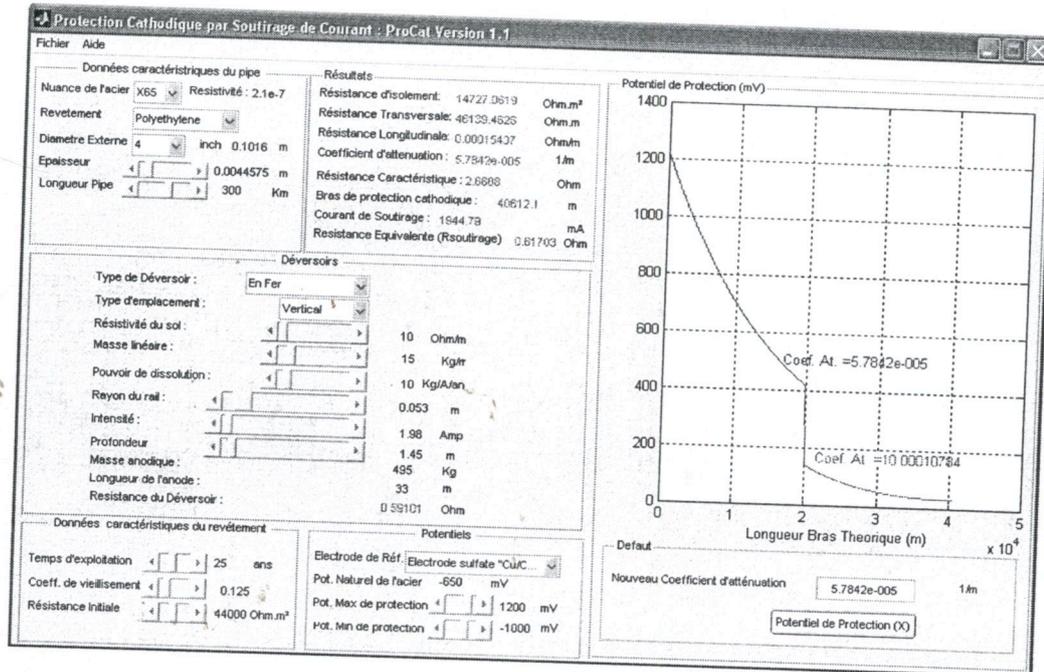


Figure. 5.15 : Mise en évidence de l'effet du coefficient d'atténuation sur l'évolution du potentiel de protection par le biais de l'interface

## 5.8 Conclusion

La détérioration du revêtement avec le temps entraîne une diminution de la résistance d'isolement donc une augmentation du coefficient d'atténuation qui oblige l'augmentation du nombre de poste de soutirage le long de l'ouvrage.

Comme l'état du revêtement, la résistance du déversoir d'anode est aussi d'une grande importance dans le système de protection cathodique. L'optimisation des paramètres de la résistance du déversoir permettra de se rapprocher le mieux possible de la valeur de la résistance de soutirage au meilleur coût.

Enfin on a montré qu'il est possible, par le biais de l'interface élaborée avec l'outil de programmation « **MATLAB7** », de dimensionner et de contrôler le système de protection et éventuellement d'intervenir lors d'apparition d'irrégularités dans le système.

## CONCLUSION

La protection cathodique par courant imposé couplée à une protection passive (PE), présente l'inconvénient majeur d'exiger le contrôle et la maîtrise de toute une batterie de paramètres en temps réel et qui peuvent être affectés par le moindre défaut dans la structure ou dans le revêtement qui la protège. Une mauvaise distribution du potentiel appliqué sur les canalisations entraîne des protubérances (court circuit), pertes énergétiques par effet joule. Lorsque la protection cathodique n'est pas totalement maîtrisée différents défauts peuvent apparaître sur les revêtements.

Dans ce travail, nous avons montré que la maîtrise de la distribution du potentiel, qui doit être maintenu le long de la conduite à un niveau de protection minimum, passe nécessairement par le contrôle strict d'un nombre de paramètres caractéristique à la fois du milieu, de l'environnement et des outils de protection utilisés. La nature du sol, la nuance du matériau pipelinier, le type de revêtement, ainsi que nature, dimensions et emplacements des déversoirs sont tous des grandeurs à considérer dans la mise en œuvre de la technique de protection cathodique. La bonne distribution du potentiel de protection le long de la structure dépend essentiellement de l'optimisation des emplacements et des valeurs des résistances de terre (déversoirs anodiques), et surtout de la valeur du coefficient d'atténuation ( $a$ ) qui est fonction de la résistance d'isolement et donc de l'état du revêtement. Plus la valeur de la résistance d'isolement est importante, plus le facteur d'atténuation est faible, et donc une portée de soutirage plus grande. Inversement avec un facteur d'atténuation important, la portée du soutirage est réduite et aura pour conséquence une augmentation des postes de soutirage répartis le long des canalisations lorsque l'on aura affaire à un ouvrage de faible valeur de la résistance d'isolement, d'où la nécessité d'un contrôle optimal de l'état du revêtement et d'une maîtrise du potentiel de protection.

Grâce à l'outil de programmation « MATLAB7 » nous avons réalisé une interface de dimensionnement et de contrôle pour la maîtrise de l'intégrité de l'ouvrage à travers le coefficient d'atténuation ( $\alpha$ ) pour un bon fonctionnement du système de protection cathodique. Cette simulation interagit avec plusieurs paramètres, qui influent sur la résistance de terre, permettant de l'adapter selon le besoin en tant que paramètre essentiel dans le dimensionnement de notre installation.

Une fois le dimensionnement effectué, on pourra avec cet outil de programmation connaître le coût de revient de tout le système de protection. Ce mode interactif pourra être étendu à un monitoring en temps réel en installant des enregistreurs de potentiel le long de la structure à des distances prédéterminées, permettant ainsi d'éviter des catastrophes écologique (déversement de produits) et économique (perte et arrêt de production) et surtout préserver des vies humaines.

Enfin, Il reste toutefois à vérifier sur le terrain l'apport et efficacité de notre modeste contribution.

## APPENDICE A

### LISTE DES SYMBOLES ET ABBREVIATIONS

A	: Surface à protéger (m <sup>2</sup> )
A.P.I	: American Petroleum Institute
A.S.T.M	: American Standard Test Methods
ba	: Pente anodique
bc	: Pente cathodique
BSR	: Bactéries sulfatoréductrices
C <sub>dc</sub>	: Capacité de la double couche à l'interface métal-solution
C <sub>k</sub>	: Gradients de concentration des espèces ioniques en solution
E	: Potentiel
E <sub>a</sub>	: Potentiel anodique
E <sub>c</sub>	: Potentiel cathodique
E <sub>corr</sub>	: Potentiel de corrosion
E <sub>p</sub>	: Potentiel de protection
F	: Constante de Faraday (96500 C/mole)
F.I.H	: Fissuration induite par l'hydrogène
ΔG <sup>0</sup> <sub>298</sub>	: Variation d'énergie de Gibbs
G.P.L.	: Gaz propane liquéfié
(G.R.I)	: Gas Research Institute
H.I.C	: Hydrogen Induced Cracking
h	: Distance séparant les deux électrodes
I	: Intensité en ampère (A)
I <sub>corr</sub>	: Courant de corrosion (A)
I <sub>prot.min</sub>	: Courant minimum de protection
I <sub>p</sub>	: Intensité de courant de protection
i	: Densité de courant
ISO	: International Standard Organisation
j	: Densité de courant à la distance de l'électrode
$\bar{j}$	: Densité de courant moyenne
K <sub>s</sub>	: Constante de la réaction
k	: Consommation spécifique en kg/ (A.an)
K	: Conductivité de l'électrolyte
L	: Longueur en m,
Δm	: Variation de la masse
MPEI	: Interface métal/polymère/électrolyte
NBS	: National Bureau Standard
NACE	: National Association Corrosion Engineering's
NF T	: Normes Françaises Techniques

NIST	: National Institute of Standards and Technology
$n_a$ et $n_c$	: Nombre d'électrons échangés à l'anode et à la cathode
OPS	: Office of Pipeline Safety
P	: Pression
$P$	: Périmètre de la section
P	: Masse totale de l'anode sacrificielle (kg)
R	: Résistance transversale d'isolement (Ohm par mètre de longueur)
$R_a$	: Résistance de l'anode
$R_c$	: Résistance de la cathode
$R_{ext}$	: Résistance des conducteurs électriques
$R_{int}$	: Résistance ohmique du milieu
$R_t$	: Résistance à l'échange d'électrons, appelée de transfert de charge
$R_{pl}$ , $R_{pll}$	: Résistances de polarisation
r	: Résistance longitudinale ohmique d'un mètre de conduite (Ohm /m)
$r_e$	: Rayon équivalent de la section droite avec $r=p/2\pi$ (m)
S	: Surface
$\Delta S_{298}^0$	: Variation d'entropie
S	: Surface cathodique qu'elle protège
T	: Température
t	: Temps d'utilisation prédit
$V_{corr}$	: Vitesse de corrosion en ( $A.m^{-2}$ )
$X_1$	: Résistivité (ohm.cm)
$X_2$	: pH
$X_3$	: Humidité (%)
$X_4$	: Aération (%)
$x$	: Distance comptée à partir du milieu de l'électrode
V	: Tension en volt (V)
Y	: Vitesse de corrosion (mils (1.6 Km)/an)
$\eta_a$	: Polarisation
$\alpha$ et $\beta$	: Coefficients de transfert de charge anodique et cathodique
$n_a$ et $n_c$	: Nombre des électrons échangés à l'anode et à la cathode
$\rho$	: Résistivité électrique ohm-mètre ( $\Omega.m$ )
$\bar{\delta}_c$	: Densité de courant cathodique moyenne ( $A.m^2$ )
$\varphi$	: Potentiel électrique au point x, y, z
$\varphi_m$	: Potentiel du métal
$\varphi_s$	: Potentiel de l'électrolyte à la surface des électrodes
$\epsilon$	: Direction normale à la paroi

## APPENDICE B

### MENU PRINCIPAL DU PROGRAMME DE L'INTERFACE DE COMMANDE

```
%% Menu principal
function varargout = Menu2(varargin)
% MENU2('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
% Copyright 2002-2003 The MathWorks, Inc.
% Last Modified by GUIDE v2.5 09-Sep-2005 18:41:13
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;gui_State = struct('gui_Name', mfilename, 'gui_Singleton',
gui_Singleton, 'gui_OpeningFcn', @Menu2_OpeningFcn, ...
'gui_OutputFcn', @Menu2_OutputFcn, 'gui_LayoutFcn', [], 'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1}) gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:}); else
gui_mainfcn(gui_State, varargin{:}); end
% End initialization code - DO NOT EDIT

%% --- Executes just before Menu2 is made visible.
function Menu2_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject; guidata(hObject, handles);
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Menu2_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% Get default command line output from handles structure varargout{1}
=handles.output;

%% Changement dans la nuance d'acier
function NuanceAcier_Callback(hObject, eventdata, handles) ValeurNuance =
get(handles.NuanceAcier,'Value');switch ValeurNuance;
case 1
ResistiviteAcier=2.1e-7; % Ohm metre
case 2
ResistiviteAcier=2.1e-7; % Ohm metre
case 3
ResistiviteAcier=2.1e-7; % Ohm metre
end
set(handles.ResistiviteAcierV,'String',double(ResistiviteAcier))figure1_Window
ButtonMotionFcn(hObject, eventdata, handles) guidata(hObject,handles);
```

**%% Changement du Diamètre Externe**

```
function DiametreExternePopUp_Callback(hObject, eventdata, handles)
val = get(handles.DiametreExternePopUp,'Value');
string_list = get(handles.DiametreExternePopUp,'String');
DiametreExterne= str2double(string_list{val})*2.54/100;
set(handles.DiametreExterneV,'String',DiametreExterne);
figure1_WindowButtonMotionFcn(hObject, eventdata, handles)
guidata(hObject,handles);
```

**%% Changement de l'epaisseur du pipe**

```
function EpaisseurSlider_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.EpaisseurV,'String',num2str(get(hObject,'Value')/1000));
figure1_WindowButtonMotionFcn(hObject, eventdata, handles)
guidata(hObject,handles);
```

**%% Changement de la longueur du pipe**

```
function LongueurPipeSlider_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.LongueurPipeV,'String',num2str(get(hObject,'Value')));
guidata(hObject,handles)
```

**%% Changement du temps d'exploitation**

```
function TempsExploitationSlider_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.TempsExploitationV,'String',num2str(get(hObject,'Value')));
figure1_WindowButtonMotionFcn(hObject, eventdata, handles)
guidata(hObject,handles);
```

**%% Changement du coefficient de vieillissement**

```
function CoefficientDeVieillissement_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.CoefficientdevieillissementV,'String',num2str(get(hObject,'Value')));
figure1_WindowButtonMotionFcn(hObject, eventdata, handles)
guidata(hObject,handles);
```

**%% Changement de la résistance initiale**

```
function ResistanceInitiale_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.ResistanceInitialeV,'String',num2str(get(hObject,'Value')));
guidata(hObject,handles)
```

**% --- Executes on slider movement.**

```
function ResistanceInitialeSlider_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.ResistanceInitialeV,'String',num2str(10*get(hObject,'Value')));
figure1_WindowButtonMotionFcn(hObject, eventdata, handles)
guidata(hObject,handles);
```

**%% Changement du potentiel de Protection maximum**

```
function PotentielMaxProtectionSlider_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.PotentielMaxProtectionV,'String',num2str(-get(hObject,'Value')));
figure1_WindowButtonMotionFcn(hObject, eventdata, handles)
guidata(hObject,handles);
```

**%% Changement du potentiel de Protection maximum**

```
function PotentielMinProtectionSlider_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.PotentielMinProtectionV,'String',num2str(-get(hObject,'Value')));
figure1_WindowButtonMotionFcn(hObject, eventdata, handles)
guidata(hObject,handles);
```

**%% Changement de la resistivité du sol**

```
function ResistiviteDuSolSlider_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.ResistiviteDuSolV,'String',num2str(get(hObject,'Value')));
ResistanceDeversoir(hObject, eventdata, handles)
guidata(hObject,handles)
```

**%% Changement de la masse linéaire**

```
function MasseLineaireSlider_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.MasseLineaireV,'String',num2str(get(hObject,'Value')));
figure1_WindowButtonMotionFcn(hObject, eventdata, handles)
ResistanceDeversoir(hObject, eventdata, handles)
guidata(hObject,handles)
```

**%% Changement du pouvoir de dissolution**

```
function PouvoirDeDissolutionSlider_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.PouvoirDeDissolutionV,'String',num2str(get(hObject,'Value')));
figure1_WindowButtonMotionFcn(hObject, eventdata, handles)
ResistanceDeversoir(hObject, eventdata, handles)
guidata(hObject,handles)
```

**%% Changement de la longueur du rail**

```
function RayonDuRail_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.RayonDuRailV,'String',num2str(get(hObject,'Value')));
ResistanceDeversoir(hObject, eventdata, handles);
guidata(hObject,handles);
```

**%% Changement de l'intensité de soutirage maximale**

```
function IntensiteSlider_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.IntensiteV,'String',num2str(get(hObject,'Value')));
figure1_WindowButtonMotionFcn(hObject, eventdata, handles);
ResistanceDeversoir(hObject, eventdata, handles)
guidata(hObject,handles);
```

**%% Changement de la résistance longitudinale**

```
function CalculResistanceLongitudinale(hObject, eventdata, handles)
% Collecte des informations
ResistiviteAcier=str2double(get(handles.ResistiviteAcierV,'String'));
Epaisseur =str2double(get(handles.EpaisseurV,'String'));
DiametreExterne=str2double(get(handles.DiametreExterneV,'String'));
SectionDroite =pi*Epaisseur*(DiametreExterne-Epaisseur);
```

% Calcul

```
ResistanceLongitudinale=ResistiviteAcier/SectionDroite;
```

```
% Mise à jour
set(handles.ResistanceLongitudinaleV,'String',num2str(ResistanceLongitudinale));
CalculCoefficientAttenuation(hObject, eventdata, handles);
CalculResistanceCaracteristique(hObject, eventdata, handles);
guidata(hObject,handles);
```

### %% Changement de la résistance d'isolement

```
function CalculResistancelsolement(hObject, eventdata, handles)
```

```
%%% Collecte d'information
```

```
TempsExploitation
```

```
=str2double(get(handles.TempsExploitationV,'String'));
```

```
Coefficientdevieillissement
```

```
=str2double(get(handles.CoefficientdevieillissementV,'String'));
```

```
ResistancelInitiale
```

```
=str2double(get(handles.ResistancelInitialeV,'String')) ;
```

```
%%% Calcul
```

```
Resistancelsolement=ResistancelInitiale/((Coefficientdevieillissement*TempsExploit
ation)*(1-exp(-Coefficientdevieillissement*TempsExploitation)));
```

```
%%% Affichage
```

```
set(handles.ResistancelsolementV,'String',num2str(Resistancelsolement));
```

```
CalculResistanceTransversale(hObject, eventdata, handles);
guidata(hObject,handles)
```

### %% Changement de la résistance transversale

```
function CalculResistanceTransversale(hObject, eventdata, handles)
```

```
%%% Collecte d'information
```

```
Resistancelsolement =str2double(get(handles.ResistancelsolementV,'String')) ;
```

```
DiametreExterne =str2double(get(handles.DiametreExterneV,'String'));
```

```
%%% Calcul
```

```
ResistanceTransversale=Resistancelsolement/(pi*DiametreExterne);
```

```
%%% Affichage
```

```
set(handles.ResistanceTransversaleV,'String',num2str(ResistanceTransversale));
```

```
CalculCoefficientAttenuation(hObject, eventdata, handles);
```

```
CalculResistanceCaracteristique(hObject, eventdata, handles);
```

```
guidata(hObject,handles)
```

### %% Changement du coefficient d'attenuation

```
function CalculCoefficientAttenuation(hObject, eventdata, handles)
```

```
%%% Collecte d'information
```

```
ResistanceLongitudinale=str2double(get(handles.ResistanceLongitudinaleV,'Strin
g'));
```

```
ResistanceTransversale
```

```
=str2double(get(handles.ResistanceTransversaleV,'String'));
```

```
%%%
```

```
CoefficientAttenuation=sqrt(ResistanceLongitudinale/ResistanceTransversale);
```

```
%%% Affichage
```

```
set(handles.CoefficientAttenuationV,'String',str2double(num2str(CoefficientAttenua
tion)));guidata(hObject,handles)
```

**%% Changement de la résistance caractéristique**

```
function CalculResistanceCaracteristique(hObject, eventdata, handles)
%%% Collecte d'information
ResistanceLongitudinale=str2double(get(handles.ResistanceLongitudinaleV,'String'));
ResistanceTransversale
=str2double(get(handles.ResistanceTransversaleV,'String'));
%%% Calcul
ResistanceCaracteristique=sqrt(ResistanceLongitudinale*ResistanceTransversale)
%%% Affichage
set(handles.ResistanceCaracteristiqueV,'String',str2double(num2str(ResistanceCaracteristique)));
guidata(hObject,handles)
```

**%% Changement de la longueur du bras cathodique**

```
function CalculLongueurBrasTheorique(hObject, eventdata, handles)
%%% Collecte d'information
PotentielMaxProtection=str2double(get(handles.PotentielMaxProtectionV,'String'));
PotentielMinProtection=str2double(get(handles.PotentielMinProtectionV,'String'));
PotentielNaturelAcier=str2double(get(handles.PotentielNaturelAcierV,'String'));
CoefficientAttenuation=str2double(get(handles.CoefficientAttenuationV,'String'));

%%% Calcul
DEs=PotentielMaxProtection-PotentielNaturelAcier;
DE=PotentielMinProtection-PotentielNaturelAcier;
LongueurBrasTheorique=acosh(DEs/DE)/CoefficientAttenuation;
%%% Affichage
set(handles.LongueurBrasTheoriqueV,'String',str2double(num2str(LongueurBrasTheorique)));
guidata(hObject,handles)
```

**%% Changement de la longueur du bras cathodique**

```
function CalculCourantDeSoutirage(hObject, eventdata, handles)
% CalculResistanceDeversoirTheorique(hObject, eventdata, handles)
%%% Collecte d'information
PotentielMaxProtection=str2double(get(handles.PotentielMaxProtectionV,'String'));
PotentielMinProtection=str2double(get(handles.PotentielMinProtectionV,'String'));
CoefficientAttenuation=str2double(get(handles.CoefficientAttenuationV,'String'));
ResistanceCaracteristique=str2double(get(handles.ResistanceCaracteristiqueV,'String'));
LongueurBrasTheorique=str2double(get(handles.LongueurBrasTheoriqueV,'String'));
PotentielMaxProtection=str2double(get(handles.PotentielMaxProtectionV,'String'));
%%% Calcul
CourantSoutirage=PotentielMinProtection*sinh(CoefficientAttenuation*LongueurBrasTheorique)/ResistanceCaracteristique;
ResistanceDeversoir=PotentielMaxProtection/ CourantSoutirage;
```

```
%%% Affichage
set(handles.CourantSoutirageV,'String',str2double(num2str(CourantSoutirage)));
set(handles.ResistanceDeversoirV,'String',str2double(num2str(ResistanceDeversoir)));
guidata(hObject,handles);
```

### %% Changement de la masse anodique

```
function CalculMasseAnodique(hObject, eventdata, handles)
%%% Collecte d'information
Intensite=str2double(get(handles.IntensiteV,'String'));
PouvoirDeDissolution=str2double(get(handles.PouvoirDeDissolutionV,'String'));
TempsExploitation=str2double(get(handles.TempsExploitationV,'String'));
MasseLineaire=str2double(get(handles.MasseLineaireV,'String'));

%%% Calcul
MasseAnodique=Intensite*PouvoirDeDissolution*TempsExploitation;
LongueurRailDeversoir=MasseAnodique/MasseLineaire;
%%% Affichage
set(handles.MasseAnodiqueV,'String',str2double(num2str(MasseAnodique)));
set(handles.LongueurAnodeV,'String',str2double(num2str(LongueurRailDeversoir)));
guidata(hObject,handles)
```

### %% --- Executes on mouse motion over figure - except title and menu.

```
function figure1_WindowButtonMotionFcn(hObject, eventdata, handles)
CalculResistancelsolement(hObject, eventdata, handles);
CalculResistanceTransversale(hObject, eventdata, handles);
CalculResistanceLongitudinale(hObject, eventdata, handles);
CalculCoefficientAttenuation(hObject, eventdata, handles);
CalculResistanceCaracteristique(hObject, eventdata, handles);
CalculLongueurBrasTheorique(hObject, eventdata, handles);
CalculMasseAnodique(hObject, eventdata, handles) ;
CalculCourantDeSoutirage(hObject, eventdata, handles) ;
ResistanceDeversoir(hObject, eventdata, handles) ;
```

### %% --- Executes on selection change in ChoixConduite.

```
function ChoixConduite_Callback(hObject, eventdata, handles)
%%TracageDesCourbes(hObject, eventdata, handles)syms x;
CoefficientAttenuation=str2double(get(handles.CoefficientAttenuationV,'String'));
PotentielMaxProtection=str2double(get(handles.PotentielMaxProtectionV,'String'));
PotentielMaxProtection=str2double(get(handles.PotentielMaxProtectionV,'String'));
L=str2double(get(handles.LongueurBrasTheoriqueV,'String'));
ResistanceCaracteristique=str2double(get(handles.ResistanceCaracteristiqueV,'String'));
b=get(handles.ChoixConduite,'Value');
EL=PotentielMaxProtection/cosh(CoefficientAttenuation*L) ;
```

```
% mV
switch b
case 1
```

```

axes(handles.VoltageDrawing);      ezplot(EL*cosh(CoefficientAttenuation*(L-x)),[-
100000,150000]); grid on;title    ' Voltage de Soutirage (mV)';
axes(handles.CourantDrawing);
ezplot(EL*sinh(CoefficientAttenuation*(L-x))/ResistanceCaracteristique,
[-100000,150000]); grid on;title ' Courant de Soutirage (mA)';
case 2
case 3
end;

%% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
ChoixConduite_Callback(hObject, eventdata, handles) ;

%% Resistance Du Deversoir
function ResistanceDeversoir(hObject, eventdata, handles)
TypeMateriel=get(handles.MateriauxDeversoir,'Value');
TypeEmplacement=get(handles.EmplacementDeversoir,'Value');
ResistiviteDuSol=str2double(get(handles.ResistiviteDuSolV,'String'));
LongueurAnode=str2double(get(handles.LongueurAnodeV,'String'));
RayonDuRail=str2double(get(handles.RayonDuRailV,'String'))/10;
switch TypeMaterie
case
switch TypeEmplacement
case 1
Cst1=ResistiviteDuSol/(2*pi*LongueurAnode);
Cst2=294.0*LongueurAnode/RayonDuRail;
ResistanceDuDeversoir=Cst1*log(Cst2);
set(handles.ResistanceDuDeversoirV,'String',str2double(num2str(ResistanceDuD
eversoir)));
guidata(hObject,handles);
case 2
case 3
end;
case 2
switch TypeEmplacement
case 1
case 2
case 3
end;
case 3
switch TypeEmplacement
case
case
case 3
end;
end;
end;

```

```
%% --- Executes on selection change in MateriauxDeversoir.
function MateriauxDeversoir_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to MateriauxDeversoir (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: contents = get(hObject,'String') returns MateriauxDeversoir contents as
cell array
ResistanceDeversoir(hObject, eventdata, handles);
```

```
%% --- Executes on selection change in EmplacementDeversoir.
function EmplacementDeversoir_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to EmplacementDeversoir (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: contents = get(hObject,'String') returns EmplacementDeversoir contents
as cell array
ResistanceDeversoir(hObject, eventdata, handles);
```

```
% -----
function Untitled_6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Untitled_6 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

## REFERENCES

1. Arav, M., « Protection contre la Corrosion : maintenance préventive – cas des grands chantiers », Journées techniques - CEFRACOR, France, (25-26 novembre 1997), 41.
2. Neveux, M., « La corrosion des conduites d'eau et de gaz-Causes et remèdes », Eyrolles, Paris, 1987.
3. Glazov, N.P., « Enhancement of corrosion protection of steel pipelines »; Protection of metals, V.37, N°5, (2001), 112-118.
4. <http://gp34.gadzarts.org/VisiTrapil/Pipelines.htm>
5. Bridoux, D., « développement de nouveaux aciers à hautes caractéristiques pour transport de gaz et de pétrole acides », Revue de métallurgie, (Mai 1988), 24-30.
6. Genod, J.V., « le transport des hydrocarbures liquides et gazeux par canalisation », ed. Technip, Paris 1979.
7. Grumbach, M., « Aciers d'usage général, propriétés des alliages », Techniques de L'ingénieur, M 305.
8. Marchal, R., « Rôle des bactéries sulfurogènes dans la corrosion du fer », Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, V.54, n°5 (1999), 649-659.
9. Altoé, P., et Al., « Evaluation of oilfield corrosion inhibitors in CO<sub>2</sub> containing: a Kinetic Study », Electrochimica Acta, V. 40, n° 7, (1996), 1165-1172.
10. Bailey, Y. J., et Kinsilla, B., « An investigation of the formation and destruction of corrosion inhibitor films using electrochemical impedance spectroscopy (EIS) », Corrosion science, V.38, n° 9, (1996), 1545-1561.
11. AFNOR, « Corrosion des métaux et alliages: termes principaux et définitions », NFEN ISO 8044, Paris : AFNOR, (2000), 78.
12. Hélie, M., « Matériaux métalliques: Phénomènes de corrosion », [en ligne], disponible sur: <http://www.cefracor.org/html/publica.htm>, (consulté le 11.06.2005).
13. Basalo, C., « Les canalisations d'eau et de gaz: Corrosion dégradation et protection » ; Technique et documentation Lavoisier 1987.
14. Gastaud, S., Influence de l'état du revêtement hydrocarboné sur le risque de corrosion des canalisations enterrées de transport de gaz », Thèse de Doctorat INSA de Lyon (2002), 49.
15. Landot, D., « corrosion et chimie de Surfaces, dans traité des matériaux », ed PPUR, Lausanne (1997), 552.
16. Uhlig, H.H., « corrosion et Protection », Paris, Dunod (1970), 374.

17. Jeffers, K.E., et Orazem, M., « Application of electrochemical impedance spectroscopy to characterize the time dependent corrosion of steel in simulated soils environment », 198th Electrochemical Society meeting, Phoenix: Arizona, (2000), n°339, 140-157.
18. Taffoureau, C., « Etude des produits de corrosion sur des conduites de gaz enterrées », Rapport de stage, Saint -Denis : Direction de la recherche Gaz de France, (2000), 72.
19. Wilmott, T.J., Sutherby, R., et Worthingham, R., « Cathodic protection potential Penetration under disbonded pipeline coating », Materials performance, 1995, V. 34, n°11, 19-22.
20. Crollet, J.L., « Mécanisme de corrosion uniforme sous dépôt de corrosion », Métaux, Corrosion, Industrie, n° 757, (1988), 279-302.
21. Pourbaix, M., « Leçons en corrosion électrochimique », 2<sup>ème</sup> ed. Cebelcor: Bruxelles, (1975), 99-101.
22. Townsend, H.E., « Potential-pH diagrams at elevated temperature for the system Fe-H<sub>2</sub>O », Corrosion Science, (1970), V.10, 343-358.
23. Groysman, A., et Groysman, O., « Corrosion for Everybody » Eurocorr, (2005), 3.
24. Dean, A.J., « Lange's Handbook of Chemistry », 5th Edition, McGraw-Hill, Inc, New York, (1999), 6.98.
25. ASTM, « Standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion Test specimen », G1-90, in « ASTM book of standards: wear and erosion, metal corrosion », V. 3.02, Pennsylvania, (USA 1998), 7.
26. Fiaud, C., « Utilisation des méthodes électrochimiques pour la mesure des vitesses de corrosion », Deuxième Ecole Maghrébine de Corrosion, Alger, (1993).
27. Campaignolle, X., « Etude des facteurs de risque de la corrosion bactérienne des aciers au carbone induite par les bactéries anaérobies sulfogènes », Thèse ENSCT, Toulouse, (1996), 327.
28. Normand, B., Cabillac, C., Crousier, J., et Rameau, J., « Méthodes électrochimiques classiques de caractérisation. Présentation et recommandations pour l'analyse de la corrosion des métaux », Revue de Métallurgie-CIT/ Science et Génie des Matériaux, (Septembre 2002), 689-697.
29. Boukhallat, N.E., « Prévention et remèdes, corrosion interne des pipes à écoulement multiphasique », MD Media, n°4, (1998), 5.
30. Le quotidien du soir d'Algérie (22 septembre 2004).
31. <http://www.industrie.gouv.fr/energie/petrole/pdf/transports-petroliers.pdf>.
32. Starkey, R.L., et Wight, K.M., « Anaerobic corrosion of iron in soil », Amer. Gas Assoc. Tech. Rept. Distrib. Comm., New York, (1945), 108.

33. Booth, C., Cooper, A., et Cooper, P., «Criteria of soil aggressiveness towards buried metals. II. Assessment of various soils », *British Corrosion Journal*, (1967), V. 2, 109-115.
34. AFNOR, «Corrosion par les sols- Evaluation de la corrosivité-Canalisations enterrées en matériaux ferreux non ou peu alliés», A 05-250, Paris : AFNOR, (1990), 15.
35. AFNOR, «Corrosion par les sols- Evaluation de la corrosivité Ouvrages en acier enterrés (palplanches et pieux) », A 05-251, Paris : AFNOR, (1990), 10.
36. DIN, «Corrosion of metals; probability of corrosion of metallic materials when subject a corrosion from the outside, buried and underwater and structural components», DIN, Berlin (1985), 50-929-3.
37. UNI, « Cathodic protection of buried metallic structures in confined area. Design, installation and inspection », SS UNI U68.00.008.0, UNI: (Milan 1995), 5.
38. Romanoff, « Underground corrosion », Circular 579-PB-168350, National Bureau of standards, Springfield VA: National information Service, (1957), 227.
39. Payer, J.H., Fink, K.M., Rodriguez, R.E., Song, I., et Trautman, B., « corrosion and cathodic protection at disbonded coatings », *International Pipeline Conference*, v.1, (1996), 471-477.
40. Jack, T., Wilmott. M., et Sutherby, R., «External Corrosion of line pipe A Summary of Research Activities», *Materials performance*, V. 35, n°3, (1996), 18-24.
41. Marec, M., « la protection cathodique des ouvrages », Département d'expertise et de services protection cathodique contre la corrosion, 1997.
42. Pansau, M., Gautheryou, J. et Loyer, J., «l'analys du sol :échantillonna instrumentation et contrôle», MASSON, Paris, 1998.
43. Perdomo, J.J., «Chemical and electrochemical conditions on steel under disbonded Coatings», Ph.D.Thesis, USA: Case Western Reserve University, 1996, p.238.
44. Michot, M.D., « Intérêt de la géophysique de subsurface et de la télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intraparcellaire », Thèse de Doctorat de Paris 6, 2003.
45. Laver, J.A., et Griffiths, H., « The variability of soils in earthing measurements and earthing system performance », *Rev, Power Engineering*, (2001), 57.
46. Bashi, S.M., Maillah, N.F., et Radzi, M.A., members, IEEE, «Cathodic Protection System », National Power and Energy conference, Bangui, Malaysia, 2003.
47. Lara, P.F., et Klechka, E. «Corrosion mitigation under disbonded coating», National Association of corrosion engineer's annual conference, San Diego, Houston: NACE, n°611, ( Mars 1998), 27.
48. Brousseau, R., et Qian, S., «Distribution of steady state cathodic currents underneath a disbonded coating», *Corrosion*, V.50, n°12, (1994), 907-911.

49. Peterson, M.H., et Lenox, T.J., «A study of cathodic polarization and pH changes in metal crevices», Corrosion, V.29, n°10, (1973), 406-410.
50. Jack, T., Willmot, R.M., et Sutherby, R., «Indicator Minerals Formed During External Corrosion of Line Pipe», Materials Performance, V.34, n°11, (1995), 19- 22.
51. Casanova, J.C., «Caractérisation de la dégradation en milieu marin d'un revêtement epoxy-vinyle d'anticorrosion déposé sur un substrat acier», thèse de Doctorat U.F.R. Des sciences ET techniques, Dijon: Université de Bourgogne, (1994,) 200.
52. ASTM, «Standard practice for substitute ocean water», ASTM D 1141-90. West Conshohocken (USA), ASTM, (1990), 2.
53. Pourbaix, A., Carpentier, P., et Bregoor, R., «Chemical and electrochemical conditions underneath coating, under cathodic protection», Aix en province, Paris: CEFACOR, EFC event n°254, (2002), 133-138
54. Sen, P.K., Nelson, J.P., et Malmedal, K., «Steel Grounding Design Guide and Application Notes», Rural Electric Power Conference IEEE, (2002).
55. Lacombe, P.P., « Protection contre la corrosion dans les sols: généralités sur la corrosion dans les sols », CEFACOR, (1997).
56. Magot, M., Jacquenod, T., et Crolet, J.L., «An updated portrait of the sulfidogenic Bacteria potentially involved in the microbial corrosion of steel » dans microbially induced corrosion EFC pub. N°22, the institute of metals, Landres, (1997), 3-9.
57. Bakhta, S., « Synthèse et pyrolyse de nouveaux hétérocycles dérivés de l'imidazopyridine, application dans l'inhibition de la corrosion acide et bactérienne », mémoire de magister, IAP, Boumerdes, (2001).
58. Sutter, B., « la corrosion, différentes formes, prévention »; corrosion et anticorrosion Journées Cetim du (25 et 26 novembre), (1997).
59. Fiaud, C., «Inhibiteurs de corrosion dans l'industrie pétrolière », Deuxième Ecole Maghrébine de corrosion, Alger, (1993).
60. Beranger, G., et Mazille, H., « Corrosion et Anticorrosion », Lavoisier, (2002).
61. Diguët, L., « Protection contre la corrosion par des revêtements organiques en milieu H<sub>2</sub>S », Thèse de Doctorat UPR 15, Université Paris VI, (1996), 250.
62. Kittel, J., « Nouvelles données sur l'origine du pouvoir anticorrosion de revêtements organiques et sur sa dégradation », Thèse de Doctorat UPR 15, Université Paris VI, (2001), 129.
63. Paumelle, P., « Simulation des systèmes de protection cathodique », Corrosion et Anticorrosion, CETIM, (25 au 26 novembre 1997), 71-84.
64. Pavel, N., «Steel passivity induced by industrial cathodic protection», Eurocorr, (2005).
65. Scwenk, W., « Fundamentals and concepts of corrosion and Electrochemical Protection », Cp Right by Elsevier, USA, (1997).

66. Pallass, M.M., Moinard, A., et Calais, M., « Manuel de Protection Cathodique », Editions Technip Paris, (1970).
67. Webster, H.A., « Economics of Cathodic Protection »; Corrosion Service company Limited, Ontario, Canada, Journal of Cathodic and Anodic Protection, (1992).
68. Galland., « Traitement de Surface », Technique de l'ingénieur, M1428, (1993).
69. Debbach, S., « Etude de la protection cathodique d'un oléoduc », Centre de recherche scientifique et technique en soudage et contrôle, Chéraga, (1995).
70. « la protection cathodique – guide pratique », Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel, Ed TCHNIP, France, (1986).
71. Cherya, B.W., et Goulgm, N., « Disbondment Mechanism for a heat Shrink Polyethylene Coating on a Cathodically Protected Hot Pipeline », Journal of Adhesion, V.33, (1991), 223-237.
72. Kamimura, T., et Kishikawa, H., « Mechanism of cathodic disbonding of three Polyethylene coated steel pipes », Corrosion, V.54, n°12, (1998), 979-987.
73. Cherry, B.W., « The Mechanism of Cathodic Disbonding », Swiss bonding (2000), 71-79.
74. Stratmann, M., « The scanning Kelvin probe, a new technique for the in situ analysis of the delamination of organic coatings », Progress in Organic Coatings, V.27, (1996), 261-267.
75. Beavers, JA., Thompson N.J., « Corrosion beneath disbonded pipeline coatings », Materials Performance, V. 36, n°4, (1997), 13-19.
76. Korzhenko, A.A., « Investigation of processes occurring at the metal/polymer Coating/electrolyte interface », Journal of Adhesion, V.71, (1999), 55-80.
77. Amouroux, N., « Organic coating on metal: A review of the degradation mechanisms in a corrosive medium », (EURADH 2000), 513-516.
78. Amouroux, N., « Mécanisme de décollement cathodique de revêtements sur acier », Revue de métallurgie, (SF2M JA2001), 125.
79. Korzhenko, A.A., « Investigation of processes occurring at the metal/polymer coating/electrolyte interface », Journal of Adhesion, V.71, (1999), 55-80.
80. Koehler E.L., « The Mechanism of Cathodic Disbondment of Protective Organic Coatings-Aqueous Displacement at Elevated pH », Corrosion Science, V.40, n°1, (1984), 5-8.
81. Castle, J.E., et Watts, J.F., « Corrosion control by Organic Coating », Ed. NACE, H. Leidheiser, Huston, 1981.
82. Brousseau, R., et QIAN, S., « Distribution of steady-state cathodic currents underneath a disbonded coating », Corrosion, 50, (1994), 907-911.

83. Watts, J.F., et Castle, J.E., «The application of X-Ray photoelectron spectroscopy to the study of polymer-to-metal adhesion: part 2», *Materials Science*, 19, (1984), 2259-2272.
84. Watts, J.F., «Mechanistic Aspects of the Delamination of Organic coatings», *Journal of Adhesion*, V.31, (1989), 73-85.
85. Guyen, T.N., et Hubbard, J.B., «Unified Model for the Degradation of Organic Coatings on Steel in a Neutral Electrolyte», *Journal of Coatings technology*, V. 68 n°855, (1996), 45-56.
86. Dewitt, «Organic and Inorganic Coatings», *Corrosion mechanisms in theory and practice*, (1993), 595.
87. Gan, F., «Cathodic Protection to mitigate External Corrosion of Underground Steel Pipe Beneath Disbonded Coating», *Corrosion Science*, V.50, n°10, 1994, 804-816.
88. Fessler, R.R., «Cathodic Protection Levels Under disbonded Coatings», *Corrosion*, V. 39, n°1, (1993), 20-25.
89. Parkins, R.N., «Hydrogen Gas Evolution from Cathodically Protected surfaces», *Corrosion*, V.41, (1985), 389-397.
90. Ibl, N., «Distribution du Courant dans les Systèmes électrochimiques», *Technique de L'ingénieur*, D902, (1978).
91. Kasper, C., Revue de «*Trans. Electrochem. Soc*», USA, (1940), 131.
92. Stern, M., et Geary, A.L., «Electrochemical polarization (An theoretical analysis of the shape of polarization curves)», *J. Electrochim Soc*, USA, (1957).
93. Rousselot, R.H., «Current-Distribution Improving Aids», *Metal Finishing*, (1961), 57-63.
94. Georgiadou M., «Modeling current density distribution in electrochemical systems», *Electrochimica Acta*, Marseille (2003), 4089-4095.
95. Debad, M., «Notes de calcul en protection cathodique», GAZ de France, (1997).