



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

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

Faculté des Sciences de Technologie

Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

*En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :*

Filière : électromécaniques

Spécialité : Maintenance industrielle

THEME

***DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME DE PROTECTION
CATHODIQUE PAR COURANT IMPOSE DE MANIFOLD DU
TERMINAL MARIN DE BEJAIA***

Présenté par :

IZOUNTAR Abdeldjabbar

MESROUA Idris

Promoteur : Mme ATMANI T.D

Co- promoteur: Ing. YESSAD Abdelhanine

Résumé

L'Algérie s'est engagée depuis des décennies sur la création d'une industrie pétrolière dynamique. De ce fait, la mise en place d'une gestion de la maintenance pour l'entretien et l'amélioration du parc existant est un atout important. Ce mémoire fait l'étude donc un des systèmes clef du réseau de transport des hydrocarbures qui est le manifold. Celui-ci est soumis au phénomène de corrosion. Cette dégradation néfaste, provoque annuellement un coût beaucoup. La protection cathodique est présentée comme une solution efficace, avec une préférence pour le courant imposé, mais l'insuffisance de cette protection dans le champ de Bejaia est notée, soulignant ainsi un besoin d'amélioration. Nous réalisons donc dans ce travail une méthodologie de dimensionnement pour les manifolds. Des recommandations pour le contrôle du système de protection sont également formulées.

ملخص

لقد عملت الجزائر منذ عقود على إنشاء صناعة نفطية فعالة. لذلك فإن وضع ادارة الصيانة من اجل الحفاظ وتحسين المنشأة الحالية يعد ميزة هامة. يتناول هذا البحث دراسة أحد الانظمة الأساسية في شبكة نقل الهيدروكربونات وهو الماني فولد. هذا يتعرض لظاهرة التآكل هذا التدهور الضار يتسبب سنويا في تكلفة تبلغ في الإصلاحات واستبدال البنية التحتية المتضررة. تعتبر الحماية الكاثودية حلاً فعالاً مع تفضيل التيار المفروض. لكن تم ملاحظة قصور هذا الحماية في حقل بجاية، مما يبرز الحاجة الى تحسينها نقوم في هذا العمل بتنفيذ منهجية لتحديد الأبعاد المناسبة للمجمعات

Abstract

Algeria has been committed for decades to creating a dynamic oil industry. Therefore, the implementation of maintenance management for the upkeep and improvement of the existing infrastructure is a significant asset. This thesis explores one of the key systems of the hydrocarbon transport network, which is the manifold. "This is subject to the phenomenon of corrosion. This harmful degradation causes an annual cost of. Cathodic protection is presented as an effective solution, with a preference for impressed current, but the inadequacy of this protection in the Bejaia field has been noted. highlighting the need for improvement. Therefore, in this work, we implement a sizing methodology for the manifolds. Recommendations for controlling the protection system are also formulated.

REMERCIEMENTS

Je commence par exprimer ma gratitude envers Dieu pour son soutien inestimable qui m'a accompagné tout au long de cette entreprise. Sa guidance et sa confiance m'ont été d'un précieux secours pour mener à bien ce travail.

Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance envers mon promoteur, MDM ATMANI, enseignant à la Faculté de Technologie de l'Université de Boumerdes. Sa patience, sa disponibilité et ses conseils avisés ont été des piliers essentiels qui ont enrichi ma réflexion et ont contribué à la qualité de ce mémoire.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont apporté leur aide précieuse dans la réalisation de ce travail :

- Aux enseignants et à l'ensemble de l'équipe pédagogique de la Faculté des Technologies, dont l'encadrement et les conseils ont été d'une valeur inestimable.
- Au personnel du Terminal Marin de Béjaia, en particulier au département de protection cathodique, ainsi qu'à Messieurs LOUIBA Mustapha et YESSAD Abdelhanine, pour leur généreuse contribution en fournissant des documents pertinents ainsi que leur expérience précieuse. Leur soutien a été indispensable pour l'élaboration de ce mémoire.
- À mes parents, pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants tout au long de cette aventure.
- Et à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à la réalisation de ce travail, je leur adresse toute ma reconnaissance

Dédicace

A ceux qui n'ont jamais cessé de m'encourager et
de me soutenir, à ceux qui leur amour m'a donné

la volonté d'aller toujours de l'avant,

A mes très chers parents, que Dieu les protège

A mes très chères sœurs, A mon très cher frère,

A toute ma famille,

A tous mes amis

Et A tous mes collègues

Je dédie ce travail

Sommaire

Table des matières

Introduction générale.....	1
I Présentation et description de la région terminale de Bejaïa	3
I.2 Description de l'Activité Transport par Canalisation «TRC»	3
I.3 Naissance du T.R.C et du R.T.C	4
I.3.1 Les installations de l'activité Transport par Canalisation.....	4
I.3.2 Les régions de l'activité TRC.....	5
I.3.3 L'activité transport Bejaia centre –RTC	6
I.4 L'oléoduc de Béjaia OB1	7
II La dégradation du manifold par corrosion.....	10
II.1 Introduction	10
II.2 Dégradation des oléoducs et gazoducs par corrosion.....	10
II.3 Définition de la corrosion	11
II.4 Importance de l'étude de la corrosion	11
II.5 Processus de la corrosion.....	12
III Chapitre: la protection des pipelines	23
III.1 Introduction	23
III.2 La protection passive	23
III.3 Isolation du réseau des autres structures étrangères enterrées.....	25
III.4 Réalisation de l'isolement du métal par rapport au milieu	26
III.5 Prévention par injection d'inhibiteur de corrosion.....	26
III.6 La protection active	27
III.6.1 Etude de l'environnement (Evaluation du risque corrosion)	27
III.6.2 La protection par anode sacrificielles.....	29
III.6.3 Protection cathodique par courant imposé (par soutirage de courant)	30
III.7 Dimensionnement des systèmes de protection cathodique.....	35
III.7.1 Représentation graphique du potentiel d'une conduite	36

III.7.2	Mise en service du système	36
III.7.3	Contrôle de l'efficacité de la protection cathodique	37
IV	Chapitre : Dimensionnement du poste de protection cathodique.....	39
IV.1	Introduction	39
IV.2	Construction des manifolds	39
IV.3	La dégradation par corrosion du manifold	41
IV.4	Application de la protection du manifold contre la corrosion	41
IV.4.1	La protection cathodique du manifold	41
IV.4.2	Vérification de l'état d'avancement de la corrosion	43
IV.5	Dimensionnement de la protection cathodique d'une canalisation	44
IV.5.1	Caractéristiques dimensionnelles de l'ouvrage	46
	La résistance du backfill au sol.....	48
	La résistance du déversoir.....	49
	La résistance totale du circuit	50
	La tension du redresseur	50
IV.5.2	Caractéristiques dimensionnelles de l'ouvrage	51
IV.5.1	Installation des anodes du manifold.....	54
	Conclusion	57
ANNEXE.....		44
Références bibliographiques		69

Liste des figures

Figure I.1. Activité Transport par Canalisations.....	4
Figure I.2. Réseau de transport des hydrocarbures	6
Figure I.3. La direction régionale de Bejaia.....	8
Figure II.1. Oxydoréductions du Fer	11
Figure II.2. Illustration de la corrosion chimique.....	12
Figure II.3. La corrosion biochimique	13
Figure II.4. Équilibre d'un métal dans une solution.....	15
Figure II.5. Diagramme de POURBAIX.....	17
Figure II.6. Morphologie de la corrosion	18
Figure II.7. Corrosion généralisée ou uniforme sur un pipeline (terminal de Béjaia)	19
Figure II.8. Corrosion localisée sur un pipeline (terminal de Béjaia)	19
Figure II.9. Corrosion par piqure sur un pipeline (terminal de Béjaia).....	20
Figure II.10. Corrosion cavernueuse sur un pipeline (terminal de Bejaia)	20
Figure II.11. Corrosion galvanique - Exemple de piles galvaniques (8).....	21
Figure II.12. Fissure de fatigue d'un acier (1).....	22
Figure III.1. Méthode de WENNER à quatre piques pour la résistivité du sol (9).	28
Figure III.2. Principe de la protection cathodique par courant imposé (19).	30
Figure III.3. Principe de la protection cathodique (anode sacrificielle et courant imposé) (5).....	31
Figure III.4. Transformateur-redresseur.....	32
Figure III.5. Anode en fer de silicium.....	33
Figure III.6. Implantation du déversoir (9)	33
Figure III.7. L'anolyte (bakfill).....	34
Figure III.8. Représentation graphique du potentiel d'une conduite (9).	36
Figure IV.1. Illustration de manifold du Terminale de Bejaïa.	39
Figure IV.2. Graphe des courbes donnant le facteur de correction en fonction du nombre et la distance entre les anodes.....	49
Figure IV.3. Schéma de l'installation de l'anode sur le manifold	55

Liste des tableaux

Tableau I-1 Le réseau de canalisation	7
TableauII-1 valeurs de potentiel standard de certains métaux.	16
Tableau III-1 Type de bakfill de Coke.	34
Tableau III-2 Équation de Résistance des anodes ou déversoirs [6].....	36
Tableau IV-1 Vérification de l'état d'avancement des corrosions.....	43
Tableau IV-2 Les données de calcul	45
Tableau IV-3 Densités de courant de protection en fonction des résistivités des sols.....	46
Tableau IV-4 Caractéristiques dimensionnelles de l'ouvrage.....	51
Tableau IV-5 Tableau du matériel PC.....	56

Abréviation

m	"m" est une unité de mesure de longueur
V	"Volt" est l'unité de mesure de tension
(FeSi)	est l'abréviation du mot Ferro-Silicium.
Ω	Ohm, une unité de mesure de la résistance électrique.
A	"A" est une unité de mesure de l'intensité du courant électrique.
Kg	est l'abréviation du mot "kilogramme", qui est une unité de mesure de masse
X60 amélioré	L'acier X60 est un type spécifique d'acier au carbone moyennement allié
m ²	"mètre" est une unité de mesure de longueur "m" représente des mètres carrés une unité de mesure de surface.
kg/A·an	C'est une mesure utilisée pour évaluer la durée de vie et l'efficacité des anodes dans les systèmes .
($\Omega \cdot m$)	C'est une mesure de la capacité du sol à résister au passage du courant électrique
"mA/m ²	C'est une unité de mesure couramment utilisée pour exprimer la densité de courant électrique à travers une surface donnée

Introduction générale

Introduction générale

Les manifolds sont des structures à grande échelle utilisées pour le transport et la distribution du pétrole brut et de ses dérivés. Ils sont souvent utilisés dans les champs pétroliers pour collecter le pétrole brut de plusieurs puits et le diriger vers des installations de traitement et de stockage. Ils peuvent également être utilisés pour séparer les différents produits pétroliers (comme le GPL et le GNL) avant leur distribution ; ils sont essentiels pour l'industrie pétrolière. Les manifolds ont plusieurs formes et caractéristiques bien définies, et ceux abordés dans ce contexte sont des structures horizontales au sol avec des fondations intégrées au sol et des parois à la surface. Cependant, ces ouvrages métalliques subissent des pertes économiques importantes en raison de la corrosion, ce qui rend leur protection indispensable et prioritaire lors des travaux de conception. Cela se manifeste par des études et des expériences visant à résoudre le problème d'oxydation.

En effet, le phénomène de corrosion est un des problèmes les plus importants dans l'industrie pétrolière. Elle est définie par la détérioration des matériaux et de leurs propriétés suite au contact entre une structure et son milieu environnant qui engendre des réactions électrochimiques néfastes. La protection permanente et active, également appelée protection cathodique, est la méthode la plus efficace et la plus abordable dans les champs pétroliers. Il est nécessaire de l'accompagner d'une isolation efficace des structures à protéger, effectuée avec des revêtements adaptés aux conditions d'utilisation. La protection cathodique est relativement simple et permet une surveillance facile.

L'existence de la protection cathodique pour les bacs de stockage dans le champ de Bejaia est considérée comme insuffisante, car cette dernière protège seulement les bacs de stockage. Dans le travail qui suit, nous discutons de deux catégories de protection cathodique : la protection cathodique par anode sacrificielle et la protection cathodique par courant imposé. Le dimensionnement du système de protection repose sur cette dernière, car c'est la méthode la plus couramment employée pour protéger les structures de grande taille.

Le but de mon mémoire est de diagnostiquer le manifold de OB1 terminal marin de Béjaia, montrer une vue globale sur les causes ainsi que les conséquences de la corrosion des manifolds du site considéré et de proposer le dimensionnement d'un nouveau poste de protection cathodique de manifold avec la technique Decmine et installation de ce poste.

Cette étude sera présentée comme suit :

- Dans le premier chapitre, une présentation générale de Sonatrach et la description de la région du terminal (RTC) est donnée ;
- Dans le second chapitre, une présentation théorique sur le phénomène de corrosion ainsi que les types de corrosion seront donnés aussi ;

- Le troisième chapitre sera dédié à une étude sur la protection passive en général, et les protections active et cathodique en particulier ;
- Dans le quatrième chapitre, seront réalisés le dimensionnement du poste de protection cathodique du terminal de Bejaïa sur le manifold et l'installation et vérification de l'efficacité de ce poste sur le terrain.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale et des recommandations.

Chapitre I :

Présentation de

la région de

(RTC)

I.1 Créations de Sonatrach

Sonatrach « Spa » est une compagnie algérienne pour la recherche et l'exploitation minière, la production, le transport, la transformation et la commercialisation des hydrocarbures et de leurs dérivés. Elle intervient également dans d'autres domaines tels que la génération électrique, les énergies nouvelles et renouvelables et le dessalement d'eau de mer. Elle exerce ses métiers en Algérie et partout dans le monde où des opportunités se présentent, elle emploie 120 000 personnes dans l'ensemble du groupe.

La Sonatrach, créée par décret N° 63/491 du 31 décembre 1963, dispose d'un capital social de 350 milliards de dinars entièrement et exclusivement Souscrit et libéré par l'État. Son activité a débuté le 01/01/1964.

Sonatrach, avec sa stratégie d'internationalisation, opère également dans plusieurs pays du monde tels que le Mali, le Niger, la Libye, l'Égypte, l'Espagne, l'Italie, le Portugal, la Grande Bretagne, le Pérou et les USA.

Sonatrach, avec ses chiffres d'affaires assez importantes, est classée comme suit :

- 1ère compagnie en Afrique,
- 3ème exportateur mondial de GPL,
- 6ème Compagnie Mondiale en matière de Gaz Naturel (réserves et production),
- 5ème exportateur mondial de Gaz Naturel,
- 4ème exportateur mondial de Gaz Naturel Liquéfié (GNL),
- 12ème dans le monde.

I.2 Description de l'Activité Transport par Canalisation «TRC»

L'activité transport est confiée à la branche transport par canalisation (TRC) dont la mission principale est d'assurer le transport des hydrocarbures par pipe-line. Celle-ci a pour mission essentielles :

- ✓ La coordination des aspects stratégiques liés aux domaines du transport par canalisation ainsi que le règlement des interfaces opérationnelles critiques y afférentes ;
- ✓ La préparation de la prise de décision de portée stratégique ayant trait au domaine du transport des hydrocarbures et le suivi de leur application ;
- ✓ Le management des projets internationaux en Algérie ou à l'étranger pour lesquels l'activité aura soumissionné seule ou dans le cadre d'un partenariat ;
- ✓ L'organisation d'une conférence annuelle de ses cadres pour débattre des questions présentant un intérêt majeur en rapport avec les missions de l'activité transport par Canalisations dont le thème et le contenu seront présentés lors de la conférence des cadres de Sonatrach ;
- ✓ Le *reporting* à la direction générale sur l'organisation et les résultats de cette Conférence.

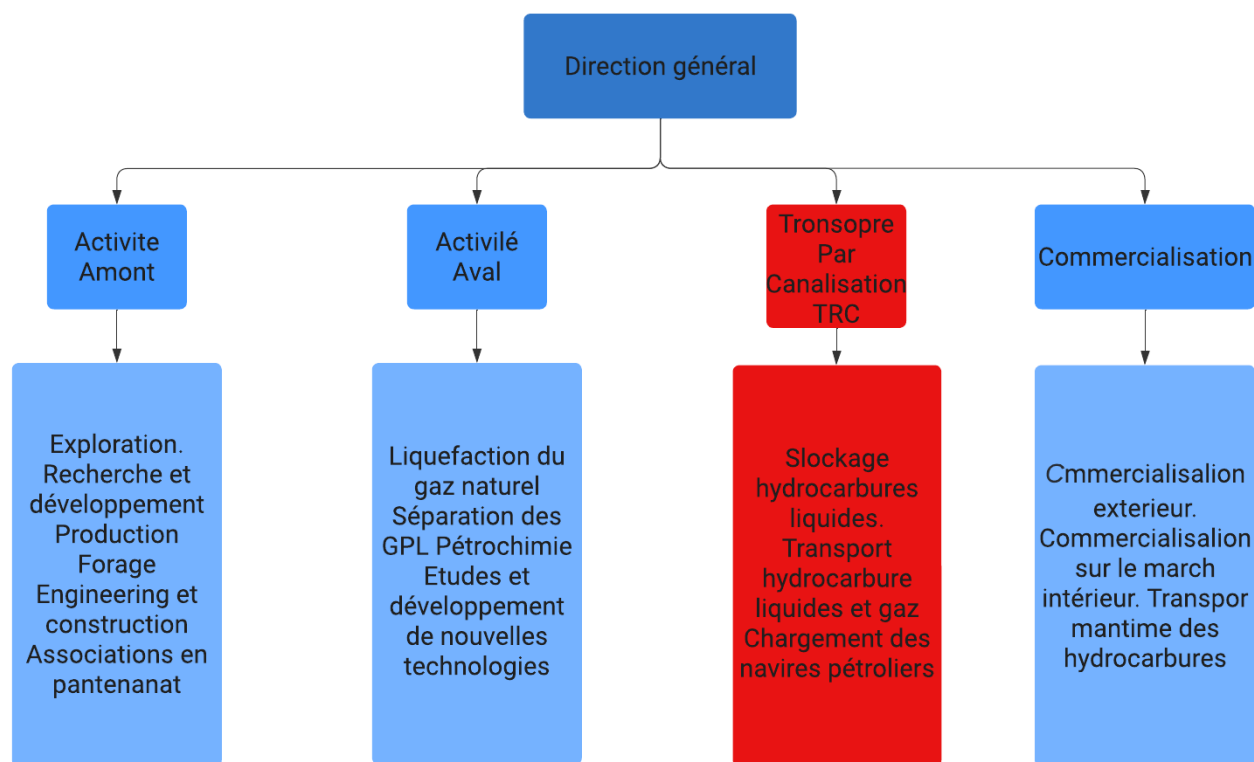


Figure I.1. Activité Transport par Canalisation

I.3 Naissance du T.R.C et du R.T.C

Dans les années 1950, les travaux d'exploration s'étendirent au Sahara avec la découverte de plusieurs gisements de pétrole et de gaz naturel. Ainsi, entre 1953 et 1957 furent découverts les champs de pétrole de *Edjelah*, de *Hassi Messaoud* et de *Zarzaitine* ainsi que les champs de gaz de *Hassi R'mel* et de *In Amenas*.

L'Algérie comporte une surface sédimentaire de plus de 1,5 millions de km² dont l'exploration est loin d'être terminée. La majorité des gisements de pétrole et de gaz découverts à ce jour sont situés dans la partie Est de la plate-forme saharienne. Cependant, afin de pouvoir exporter le précieux liquide en Europe, il était indispensable de construire une canalisation allant de *Hassi Messaoud* jusqu'à la côte algérienne. Le choix de la destination marine algérienne est porté sur *Bougie*, actuelle *Bejaia*.

I.3.1 Les installations de l'activité Transport par Canalisation

L'activité Transport par Canalisation, qui assure l'acheminement des hydrocarbures, dispose :

- d'un réseau de canalisations de près de 19 623 km en 2015 contre 14 915 en 2005, soit une augmentation de 4 708 km ;
- de 18 gazoducs d'une longueur de 10 177 km, avec des diamètres variant principalement entre 40'' et 48'', avec une capacité de 178 Milliards de Sm³/an ;

- de 21 oléoducs d'une longueur de 9 946 km, avec des diamètres variant principalement entre 20'' et 34'', avec une capacité de 248 Millions de Tep/an.

Le Réseau de canalisation avait atteint une capacité design de transport de 419 millions Tep à fin de 2015. Les centres de dispatching comptent parmi les installations névralgiques de l'Activité ; il s'agit du :

- Centre de Dispatching d'Hydrocarbures Liquides (CDHL) qui se situe au niveau de *Haoud El Hamra (Hassi Messaoud)* ;
- Centre National de Dispatching Gaz (CNDG) situé à *HassiR'mel*, qui assure la collecte du gaz naturel provenant des sites de production et son acheminement par pipeline vers les centres de consommation, de transformation (complexes de liquéfaction) et d'exportation par gazoducs.

Sonatrach, à travers l'Activité Transport par Canalisation (TRC), dispose de 22 Systèmes de Transport par Canalisation (21 en exploitation, 01 en cours de réalisation GR5) intégrant 82 stations de pompage et de compression dont 50 Stations de Pompage destinées aux hydrocarbures liquides , de plus de 290 machines tournantes principales.

Sonatrach dispose, également, de nombreux postes de chargement à quai du pétrole brut, du condensat, du GNL et des produits pétroliers au niveau des trois ports pétroliers de chargement d'hydrocarbures Arzew, Bejaia et Skikda.

Les 03 ports sont équipés de 5 bouées de chargement de pétrole en haute mer. Et de nouveaux projets de construction de gazoducs d'envergure internationale sont en cours de réalisation afin de répondre notamment à la demande du marché européen.

Sonatrach dispose également d'une capacité de stockage des structures de maintenance articulées autour de 03 bases principales de maintenance et 03 bases régionales d'intervention (DRC). Et aussi, près de 4,2 Millions de Tep (127 bacs).

I.3.2 Les régions de l'activité TRC

Il existe cinq régions de l'activité transport par canalisation qui ont été créées, à savoir :

- Région Transport *Bejaïa Centre* **(RTC)**.
- Région de Transport *Haoud –el Hamra* **(RTH)**.
- Région de Transport d'*In Amenas* **(RTI)**.
- Région de transport *Est-Skikda* **(RTE)**.
- Région transport *Ouest Arzew* **(RTO)**.

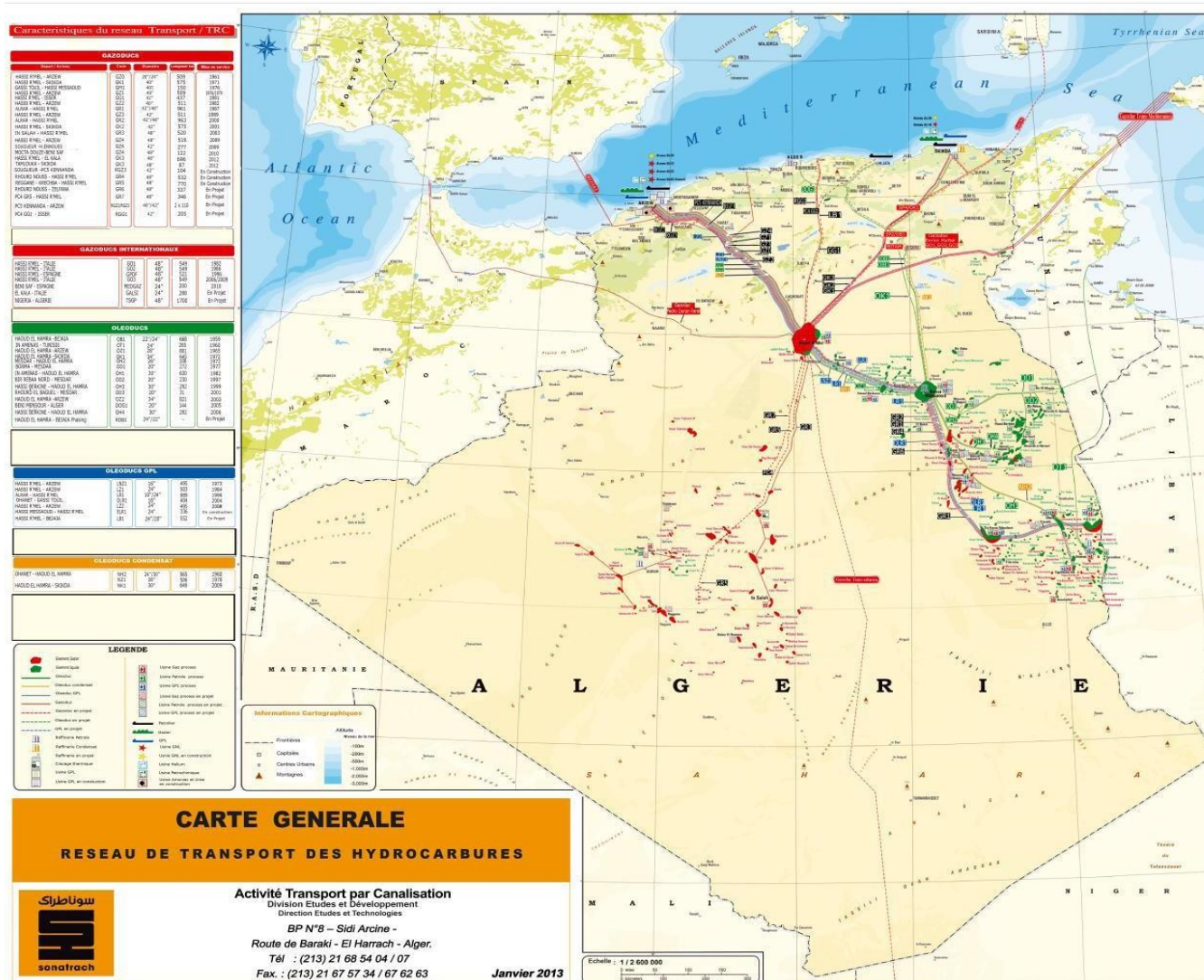


Figure I.2. Réseau de transport des hydrocarbures

I.3.3 L'activité transport Bejaia centre –RTC

La DRGB est l'une des cinq directions régionales de transport par canalisations des Hydrocarbures (TRC), et elle est rattachée directement à la division exploitation. Sa mission consiste dans l'exploitation, le transport, le stockage et la livraison des hydrocarbures.

Les patrimoines du centre –RTC de *Bejaia* sont :

- Un terminal Nord : 12 Bac de stockage à toit flottants, d'une capacité de 35 000 m³.
- Un terminal Sud : 04 Bac de stockage à toit flottants, d'une capacité de 50 000 m³.
- Un port pétrolier.

Elle se compose d'un oléoduc OB1 (22/24''), et d'un gazoduc GG1 (42'').

I.4 L'oléoduc de Béjaia OB1

I.4.1 Aperçu de la Région de Transport Centre (RTC Bejaia)

La division exploitation de la branche transport par canalisations de Sonatrach est chargée du transport, stockage, et de livraison des hydrocarbures (pétrole bruts), ainsi que du gaz naturel. La R.T.C, dispose d'un réseau de canalisation (pipe-line) dépassant 1200 Km, présenté comme suit :

- Oléoduc (OB1) «*Haoued-el-Hamra - Bejaia* » (24/22 pouces), d'une longueur de 668 Km. Il assure l'acheminement du pétrole brut de *Haoued-el-Hamra* vers la station *Beni-Mansour* et le parc de stockage de *Béjaia* ;
- Oléoduc (D'OG1) «*Beni-Mansour - Sidi-Arcine* » (20 pouces), d'une longueur de 144 Km. Il assure l'alimentation en pétrole brut de la raffinerie d'Alger (*Sidi-Arcine*) ;
- Gazoduc (GG1) «*Hassi-Rmel - Bordj-Menaël* » (42 pouces), d'une longueur de 439 Km, il compte plus de 20 postes de prélèvement destinés à l'alimentation en gaz naturel de toutes les régions du centre du pays.

La RTC dispose également de 4 stations de pompage, une station de compression, aux terminaux et un port pétrolier.

Tableau I.1 Le réseau de canalisation

Ouvrage	Ouvrage ou site	Localisation	Observations
OB1	Station SP1bis	Pk190	<i>DJAMAA (EL OUED)</i>
	Station SP2	Pk 350	<i>EL OUTAYA (BISKRA)</i>
	Station SP3	Pk 495	<i>M'SILA</i>
	Terminal marin	Pk 668	12 Bacs de stockage de 35000m3 TMB Nord, 04 bacs de stockage de 50000m3 TMB sud, 02 Manifolds Une gare à racleur
	Port pétrolier	/	03 quais de chargement
D'OG1	Station SBM		<i>Beni-Mansour</i>
	Terminal TRA		TERMINAL Alger
GG1	Station SC3	Pk 181	<i>MOUDJBARA</i>
	TBM	Pk 439	Le terminal Gazier de <i>BORJ-MNAEL</i>

I.4.1 Présentation du département PTC

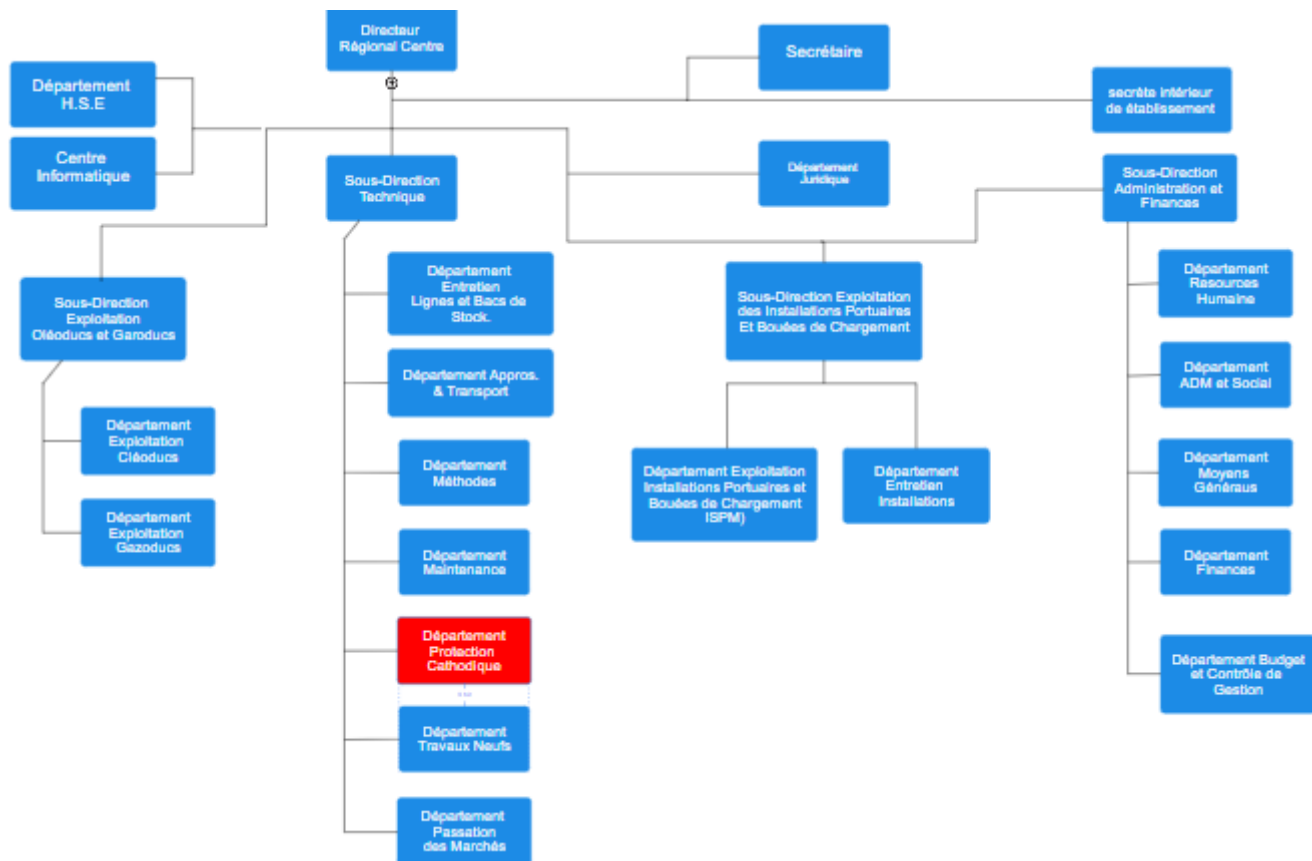


Figure I.3. La direction régionale de Bejaia

Après la mise en application du nouveau organigramme de TRC, le service protection cathodique est érigé en département, en raison de l'importance des tâches et missions qui lui sont confiées et qui consistent essentiellement à protéger les ouvrages et canalisations enterrées du réseau de transport des hydrocarbures, contre la corrosion externe.

Le département « Protection Cathodique » est l'un des départements naissants de la sous-direction technique, il est composé de deux services :

- ✓ contrôle et mesure ;
- ✓ construction et réparation.

Les principales missions des agents du département Protection Cathodique sont :

- Inspection et visite mensuelle des postes de protection cathodique des lignes OB1, GG1, DOG1, et ouvrages concentrés,
- Veiller au bon fonctionnement de la protection cathodique des canalisations et ouvrages concentrés,
- Réalisation de campagnes de mesure de potentiel ON, des lignes OB1, GG1, DOG1, et ouvrages concentrés, une fois par an,
- Réalisation de campagne de mesure de potentiel ON/OFF, des lignes OB1, GG1, DOG1, et ouvrages concentrés une fois tous les cinq ans,

- Mise en œuvre des actions de maintenance et amélioration du système de protection cathodique, à Savoir :
 - Installation et mise en service des nouveaux PPC si nécessaire au niveau des zones sous protégées.
 - Réalisation et rénovation des déversoirs de la protection cathodique (horizontaux et verticaux).
 - Maintenance des équipements de la protection cathodique tels que :
 - la réparation des transformateurs-redresseurs
 - la réparation des transformateurs aériens
 - réparation des coupures des câbles électriques enterrés.
 - Installation des prises de mesures pour la mesure du potentiel-électrode de la structure métallique, des courants et des résistances.
- Aux croisements ; autres canalisations (prise type PCTE).
 - Aux points de parallélismes avec ; autres canalisations (prise type PPS).
 - Aux droit de fourreaux métallique (prise type PTG).
 - Aux droit de joints isolants (prise type PJI).
 - Aux traversées de routes, de chemin de fer et de digues importantes.
 - Aux traversées de rivières.
 - A proximité des postes de protection cathodique
 - Aux points de raccordement des anodes galvaniques.

Avec:

PCTE : Prise de Croisement Tube Externe

PJI: Prise Joint Isolant

PMA : Prise de Mesure Ampère-métrique

PPS : Prise de Potentiel Simple

PTG: Prise de Traversé Gaine

- Installation des joints isolants pour protéger la structure métallique des autres structures, par exemple:
 - au niveau des ouvrages concentrés
 - amont et aval des nouveaux tronçons installés
 - raccordement à un ouvrage tiers.

Pour assurer la protection des installations de la RTC, le département « Protection Cathodique » dispose de plusieurs postes de protection cathodique répartis tout au long des pipe-lines (oléoducs ou gazoduc), de telle manière à atteindre une protection maximale dans tous ses ouvrages.

Chapitre II :

La Dégradation

du manifold par

corrosion

II.1 Introduction

Le développement accéléré de l'industrie et le besoin énorme en énergie exigent l'utilisation en plein rendement des réseaux de transport des hydrocarbures en place. Cela implique une exploitation correcte et efficace des installations, leur maintien en parfait état, des réparations et des interventions de la plus haute qualité, effectuées en temps voulu. Des solutions théoriques et techniques rapportées à la résolution de certains problèmes comme la corrosion sont nécessaires ; la maintenance est primordiale.

Dans ce contexte, il est nécessaire de:

- Déterminer dans quelles limites la réparation s'avère avantageuse d'un point de vue économique, puis partant de ces données, fixer les délais afin d'obtenir un service optimal de l'installation, du réseau ;
- Définir les voies permettant une organisation rationnelle des interventions.

Finalement, la nécessité de la fonction maintenance provient des dégradations diverses subies par les installations, résultant de leurs utilisation et leur exploitation (usure, rupture, dérive des caractéristiques de fonctionnement, fragilité, etc.) ou simplement du temps (dégradations physico-chimique résultant de l'environnement).

II.2 Dégradation des oléoducs et gazoducs par corrosion

Les oléoducs et les gazoducs sont des canalisations transportant les hydrocarbures liquides ou gazeux, constituant le moyen le plus économique et le plus puissant pour l'acheminement des millions de tonnes d'hydrocarbures par an. Mais ce mode de transport est exposé à différentes altérations qui perturbent son bon fonctionnement, essentiellement :

- L'existence de l'eau dans le pétrole ;
- L'existence des paraffines (c'est un mélange d'hydrocarbures saturés solides, se déposant sur la paroi du pipeline et provoquant un rétrécissement du diamètre intérieur, entraînant une augmentation de la pression ainsi que la température et se termine par l'éclatement de la conduite).

Pour les gazoducs, il existe d'autres problèmes (1) qui sont dus à :

- La présence du condensât dans le gaz (c'est des particules liquide qui se posent sur la partie inférieure du gazoduc suite à la différence de densité, entraînant un écoulement turbulent dans les conduites) ;
- Forte concentration du gaz carbonique ;
- La présence des contraintes (pression, débit, température).

Hormis les problèmes cités ci-dessus, il existe un problème majeur qui est la corrosion directe (chimique, bactérienne et électrochimique) des conduites du manifold.

La Direction Régionale de Bejaïa est une des 7 régions composant l'activité de Transport des hydrocarbures par canalisations (TRC). Elle est chargée de l'exploitation de deux oléoducs, d'un gazoduc et d'un port pétrolier. Le terminal marin, situé à 2 km au sud-ouest de la ville de Bejaïa, est la dernière station de la chaîne de transport des hydrocarbures liquides depuis *Haoud El Hamra*. Il a pour rôle la réception et le stockage du pétrole brut ainsi que son expédition pour l'exportation par navires citernes.

Il est divisé en trois parties :

Le terminal Nord, le terminal Sud et le port pétrolier qui se trouve à 5 km au nord-est du parc de Stockage.

Dans ce mémoire on s'intéresse tout particulièrement aux manifolds du Terminal Nord. Celui-ci assure le stockage du pétrole brut arrivant par le pipe-line et le chargement des pétroliers. Le manifold du terminal de *Bejaïa* est une installation technique essentielle pour la gestion des flux de produits.

II.3 Définition de la corrosion

La corrosion est une dégradation ou destruction de la matière au contact d'un milieu agressif. C'est aussi le phénomène inverse de la métallurgie à savoir le retour des métaux et alliages à leur état primitif (état stable) (Figure II.1), et qui provoque l'altération et la détérioration graduelle d'un solide par réaction avec le milieu qui l'entoure (2).

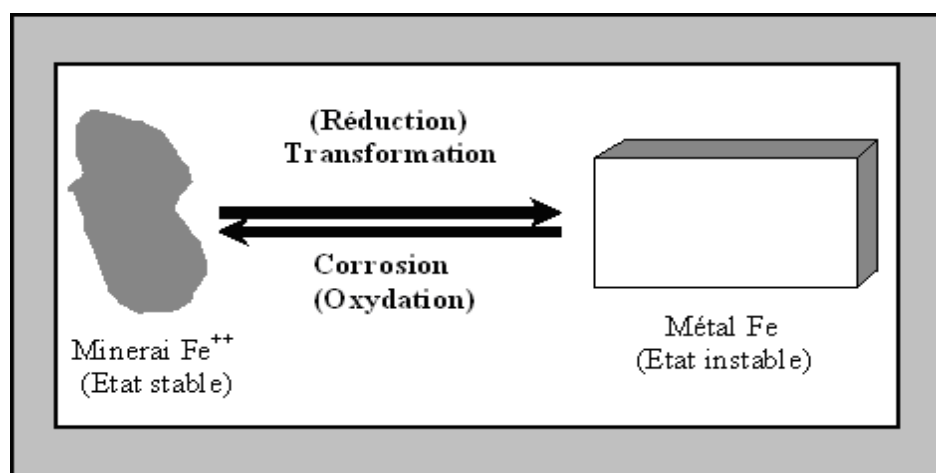


Figure II.1. Oxydoréductions du Fer

II.4 Importance de l'étude de la corrosion

La corrosion est étudiée pour trois raisons :

- ✓ **Economique**, elle concerne la réduction des pertes de métal qui résultent de la détérioration de la tubulure, de réservoir, de canalisation de pièce métallique de machine, de coque de navire, de structure marine, etc.

- ✓ **Sécurité**, des risques liés aux incidents causés par des appareils sous pression, réservoir métallique, produit radioactif, conduite de gaz, rotor et ailettes de turbines, etc.
- ✓ **Ecologique**, la pollution de l'environnement, gaspillage de l'eau et de l'énergie nécessaire à la transformation des matières premières en structure métalliques.

II.5 Processus de la corrosion

Il existe principalement, trois types de processus de corrosion :

- Dissolution en milieu électrolyte (corrosion humide)
- Oxydation à haute température (corrosion sèche)
- Attaque des installations par des organismes vivants de différentes espèces (corrosion bactérienne).

II.5.1 La Corrosion chimique (sèche)

La corrosion chimique, parfois appelée corrosion sèche, est un processus d'altération des métaux causé par des réactions chimiques avec des gaz ou des substances organiques, sans la présence de conductivité ionique (3). Elle se produit généralement en présence de gaz corrosifs tels que l'hydrogène, le sulfure d'hydrogène, le monoxyde de carbone ou des substances organiques. Contrairement à la corrosion électrochimique qui se produit dans des environnements conducteurs d'électricité, la corrosion chimique affecte la surface du matériau corrosif en contact direct avec l'agent corrosif. Cette forme de corrosion peut également toucher des matériaux non métalliques tels que le béton, les plastiques, le bois et la céramique, en fonction de l'environnement et des interactions chimiques impliquées (4; 5).



Figure II.2 Illustration de la corrosion chimique.

II.5.2 La Corrosion biochimique

Les conduites métalliques peuvent être corrodées par certaines bactéries, notamment les canalisations enterrées. Le développement des bactéries se produit sous les dépôts, sous les produits de corrosion et dans des zones de conduite peu aérées. Les bactéries sulfato-réductrices réduisent les sulfates en utilisant de l'hydrogène provenant des régions cathodiques, ce qui entraîne une formation accélérée de Fe^{2+} aux anodes. Il s'ensuit la création de marques sur le métal où se trouvent les dépôts causés par l'attaque des bactéries, en raison de la corrosion provoquée par le processus (6).



Figure II.3 La corrosion biochimique

II.5.3 La Corrosion électrochimique, corrosion en milieu aqueux

Cette corrosion est la plus répandue dans le domaine des hydrocarbures. Elle est responsable de la dégradation des structures métalliques en contact avec tout milieu susceptible de contenir de l'eau. La corrosion humide fonctionne comme une pile électromagnétique, elle doit donc réunir simultanément quatre facteurs :

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

Le métal s'oxyde à l'interface métal oxyde et les cations diffusent vers l'extérieur du film. A la surface extérieure, l'oxygène se réduit en anions O_2 qui se diffusent vers l'interface métal oxyde. Les électrons libérés à l'interface doivent traverser la couche d'oxyde avant de réagir avec l'oxygène externe.

La surface extérieure du film joue donc le rôle de cathode et l'interface métal celui d'anode. L'oxyde est ici simultanément électrolyte et conducteur électronique. Il s'agit donc d'un phénomène d'oxydoréduction au cours duquel il y a transfert d'électrons qu'accepte l'oxydant (ici l'oxygène) (7).

II.5.3.1 Les Facteurs de la corrosion électrochimique

Quatre groupes de facteurs sont susceptibles d'agir sur le processus de la corrosion.

- Les facteurs définissant le mode d'attaque (liés au milieu) :
 - Concentration du réactif oxydant,
 - Teneur en oxygène et autres gaz dissous,
 - Résistivité du milieu,
 - Acidité du milieu,
 - Température et Pression,
 - Présence de bactéries.
- Facteurs liés au métal
 - Homogénéité du métal,
 - Impuretés dans le métal,
 - Noblesse du métal,
 - Contraintes résiduelles internes résultant de traitements thermiques ou de procédés d'élaboration,
 - Nature du produit de corrosion.
- Facteurs définissant le mode d'emploi
 - Etat de surface,
 - Procédés d'assemblage (couplage galvanique – Annexe B),
 - Forme des pièces.
- Facteurs dépendants du temps
 - Fatigue,
 - Modification des dépôts protecteurs.

Tous ces facteurs ont une influence directe sur la tenue d'un matériau donné, dans un milieu donné. La compréhension du phénomène de corrosion fait appel donc à plusieurs disciplines: Métallurgie, Electrochimie, Thermodynamique, Cinétique (8).

II.5.3.2 Notion de couche double

La surface d'un métal plongée dans un électrolyte va avoir un excès d'électrons, elle se charge négativement, tout près de l'interface, au contraire se charge positivement par excès d'ions M^{n+} , les ions métalliques auront

donc de plus en plus de mal à entrer en dissolution. La réaction tend vers un équilibre qui se traduit par une différence de potentiel entre l'électrolyte et le métal. A l'équilibre on a donc « face à face » un métal chargé négativement et une couche d'ions positifs dont les limites sont mal définies du côté solution, il se produit à l'interface une structure rappelant très approximativement à celle d'un condensateur. On appelle cette structure d'interface la double couche électrique. C'est à travers cette double couche que prend naissance un potentiel appelé « potentiel d'équilibre » et qui caractérise le couple métal-électrolyte.

La mesure de ce potentiel se fait à partir d'une électrode d'hydrogène normale (dont le potentiel a été choisi conventionnellement égal à zéro) (9).

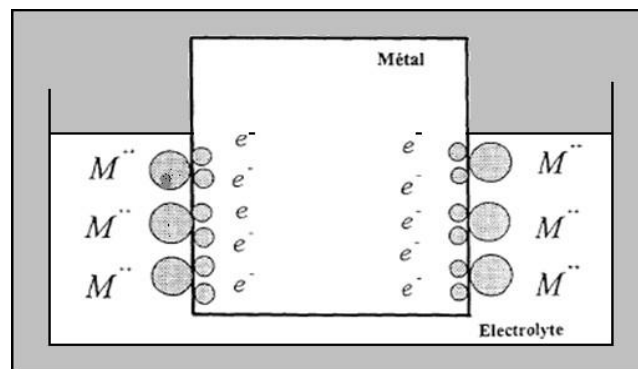


Figure II.4 Équilibre d'un métal dans une solution

II.5.3.3 Equation et l'échelle de NERNST

Le potentiel d'un métal dans une solution de concentration C (concentration de son cation M^{n+} est donnée par la formule de NERNST :

$$E = E_0 + \left(\frac{RT}{Nf} \right) \ln C \quad \text{Ou bien} \quad E = E_0 + \left(\frac{0.0592}{n} \right) \log C \quad (\text{à } 25^\circ\text{C})$$

Avec :

E : potentiel d'équilibre en volts,

E_0 : potentiel normal (standard) correspondant au potentiel du métal plongé dans une solution « normal » d'un de ces sels (1 mole par litre) en Volts.

R : constante des gaz parfait = 8.314 J/mole.K.

T : température en °K.

N : nombre d'électrons de valence.

F : constante de FARADAY = 96500 Coulombs/mole.

C : concentration du cation M^{n+}

Eléments	Couples Oxydant -réducteur	E0 (Volts)
Au	Au ³⁺ /Au	+1.42
Ag	Ag ⁺ /Ag	+0.80
H	H ⁺ /H ₂	0 (par convention)
Fe	Fe ²⁺ /Fe	-0.44
Zn	Zn ²⁺ /Zn	-0.76
Mg	Mg ²⁺ /Mg	-1.80

Tableau II.1 Valeurs de potentiel standard de certains métaux.

On peut déduire de cette échelle (Tableau II.1) que les métaux comme l'or, l'argent ou le cuivre qui présentent des potentiels standard positifs ne seront pas attaqués par l'eau puisqu'ils s'oxydent moins facilement que l'hydrogène. Ce sont des métaux dits « nobles ».

Ce tableau constitue toutefois un guide imparfait car dans certains cas de corrosion, le métal n'est pas en équilibre avec ces seuls ions, ce qui a pour effet de modifier son potentiel, ou encore voit à sa surface l'établissement d'un film passif, ce qui a également pour effet de modifier son potentiel (9).

II.5.3.4 Diagramme potentiel pH (ou diagramme de POURBAIX)

Les diagrammes potentiel pH résument les données thermodynamiques et permettent de prévoir le comportement électrochimique et de corrosion de n'importe quel métal dans l'eau. Ils sont disponibles pour la plupart des métaux dans les atlas de POURBAIX et présentent l'avantage de montrer clairement, pour les conditions de pH et de potentiels donnés, les domaines actifs, inertes, passifs et les différents produits de corrosion obtenue.

La figure ci-dessous représente un diagramme potentiel **pH** simplifié du fer. Par convention, ce diagramme a été établi pour une température de 25°C et une concentration des espèces dissoutes de 10⁻⁶ mol/l.

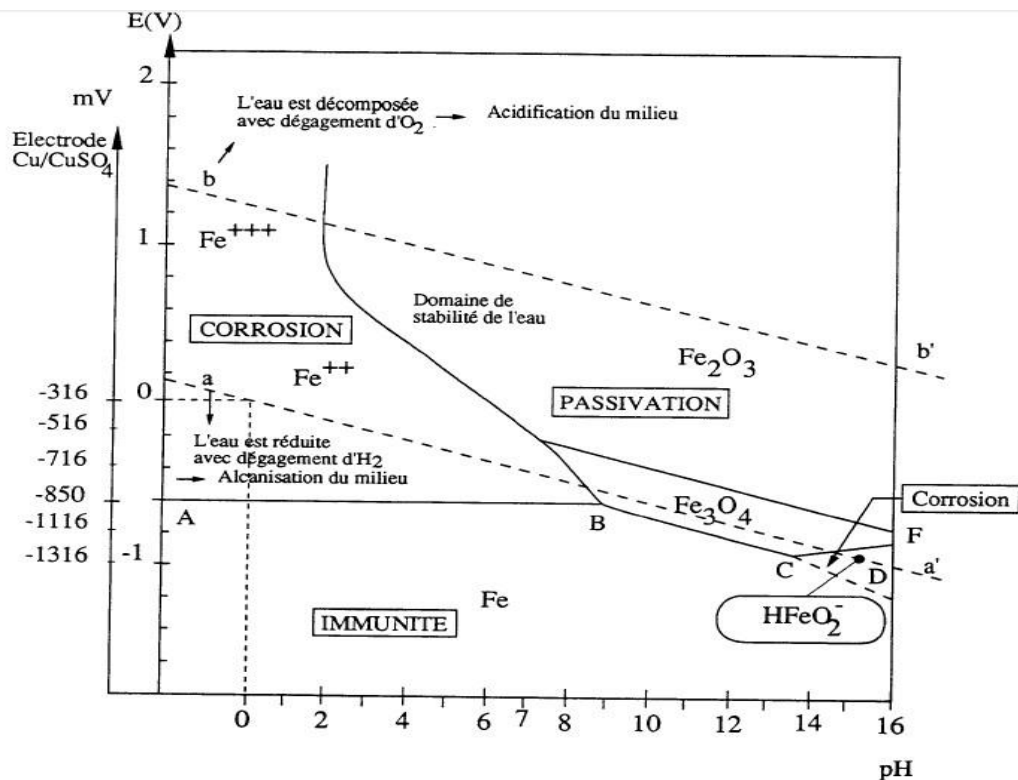
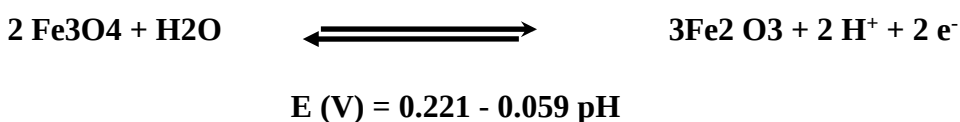


Figure II.5 Diagramme de POURBAIX

Deux oxydes solides ont été pris en compte pour la construction de ce diagramme très simplifié, l'hématite Fe₂O₃ et la magnétite Fe₃O₄. Les différentes frontières représentées correspondent aux différents équilibres existants entre le fer, ses cations, ses oxydes et l'eau ainsi qu'entre eux quand ils ont des frontières communes (9) (8) (10).

Exemple : l'équilibre représenté par la droite 4 s'écrit :



On constate qu'en milieu acide et neutre le fer peut réagir avec les protons avec dégagement d'hydrogène, alors qu'en milieu alcalin, il résiste mieux à la corrosion car les oxydes formés ne se dissolvent pas facilement par réaction avec les ions OH⁻. En effet, en milieu neutre ou acide le fer se corrodé facilement alors qu'il résiste dans un milieu alcalin.

Sur le diagramme sont aussi représentés les deux droites (a) et (b). Le domaine compris entre ses deux droites correspond au domaine de stabilité de l'eau.

D'une manière générale, ces deux droites délimitent trois régions importantes :

- **Un domaine de corrosion** où le fer se dissout dans la solution et forme des sels et des hydroxydes solubles.

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

Toutefois, les diagrammes de POURBAIX, fondés uniquement sur les considérations thermodynamiques, ne prédisent que des états d'équilibre et des possibilités théoriques de réaction, sans fournir aucune indication sur les vitesses (9) (10).

II.5.3.5 Vitesse et densité de corrosion

D'une manière générale, la vitesse de la réaction électrochimique est proportionnelle à l'intensité de courant traversant l'électrode (5) (2) selon :

$$V = I / n.F.S$$

Avec :

I : intensité de courant (A), S : Surface de l'électrode (m²), V : vitesse (mol /m².S) et F : Faraday (C /mol)

L'intensité de courant circulant dans la pile de corrosion est appelée intensité de corrosion, elle est dénommée I_{corr} . Lorsqu'elle est rapportée à la surface S du métal qui se corrode, on l'appelle densité de corrosion et on la désigne par i_{corr} . Donc :

$$i_{corr} = I_{corr} / S$$

II.5.4 Morphologie de la corrosion

Les processus élémentaires de la corrosion métalliques humide sont toujours les mêmes. La morphologie de l'attaque peut prendre des formes très diverses, résultant de la répartition des zones anodiques et cathodiques à l'interface métal-électrolyte et éventuellement, de l'interaction d'autre phénomène (électrique, mécanique, biologique, etc.) avec la corrosion (9) (7).

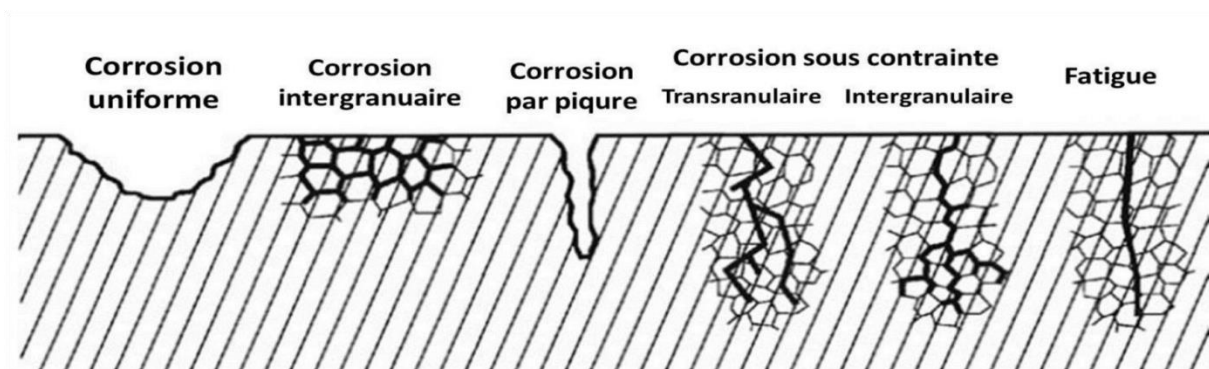


Figure II.6 Morphologie de la corrosion

II.5.4.1 Corrosion généralisée ou uniforme

Cette corrosion survient dans le cas d'un environnement homogène et lorsque le métal lui-même présente vis-à-vis de cet environnement un comportement suffisamment homogène. Elle est caractérisée par une réaction chimique ou électrochimique qui se déroule sur l'ensemble de la surface exposée (11) (2) (7). Le métal devient moins épais et finit par se dissoudre.



Figure II.7 Corrosion généralisée ou uniforme sur un pipeline (terminal de Béjaia)

II.5.4.2 Corrosion localisée

Elle provient de la localisation des zones anodiques en certains endroits de l'interface, pour des raisons d'hétérogénéité dans le métal ou dans l'électrolyte. La pénétration de la corrosion est d'autant plus rapide que le rapport de la surface anodique sur la surface cathodique est faible (7) (4).



Figure II.8 Corrosion localisée sur un pipeline (terminal de Béjaia)

II.5.4.3 Corrosion par piqûres

L'attaque se limite à des trous, très localisés et pouvant progresser rapidement en profondeur alors que le reste de la surface reste indemne. L'acidification et l'appauvrissement local de la teneur en oxygène de la solution contribuent à aggraver la situation (8) (12). Une installation peut être perforée en quelques années sans qu'une perte de poids appréciable de la structure apparaisse. La morphologie des piqûres de corrosion peut prendre plusieurs aspects selon les conditions expérimentales (13) (7).



Figure II.9 Corrosion par piqure sur un pipeline (terminal de Béjaia)

II.5.4.4 Corrosion caverneuse

Le processus de la corrosion caverneuse est proche de celui par piqûre. Il est généralement associé à la présence de petits volumes de solution stagnante dans des trous, sous des dépôts et dans des joints ou des crevasses. Cette solution s'appauvrit en oxygène et s'acidifie (6) (14). Lorsque le pH atteint une valeur limite, le film passif est réduit, la croissance de la crevasse par dissolution du métal à l'état actif devient alors très rapide (7).



Figure II.10 Corrosion caverneuse sur un pipeline (terminal de Bejaia)

II.5.4.5 Corrosion galvanique (bimétallique)

C'est en générale, lorsque deux métaux différents sont en contact ou reliés électriquement dans un milieu corrosif aqueux, La corrosion s'établit sur le métal le moins noble et s'arrête sur le métal le plus noble. Les

sites anodiques et cathodiques sont distincts. Mais, elle se manifeste aussi lorsque les deux parties d'un objet métallique d'un même métal ne sont plus au même potentiel à cause d'une hétérogénéité ou à cause d'un âge différent (8) (2) (15). Elle se traduit par l'accélération de la corrosion du métal le moins noble quand celui-ci est en continuité électrique avec un métal plus noble, exposé au même électrolyte. C'est ainsi qu'une protection cathodique par anodes sacrificielle est effectuée.

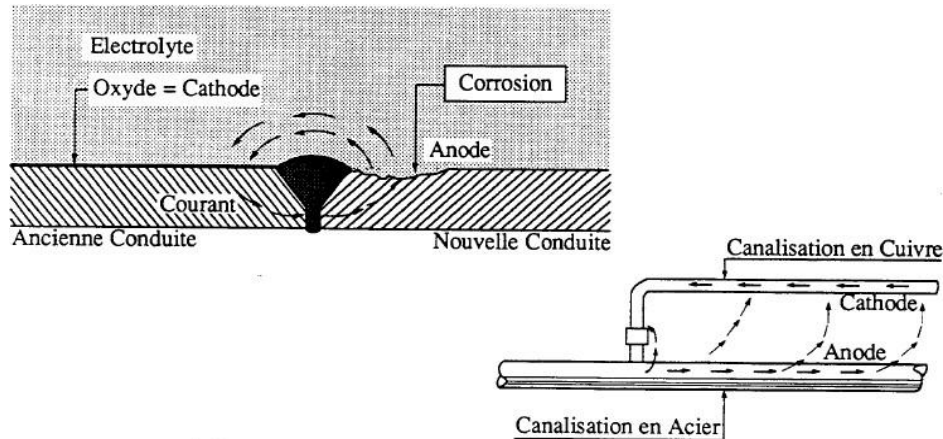


Figure II.11 Corrosion galvanique - Exemple de piles galvaniques (8)

Canalisation en acier oxydée aérienne avec canalisation masse enterrée et assemblage à brides réunissant des métaux différents.

II.5.4.6 Corrosion sous contrainte

Ce type de corrosion se définit comme un processus de développement de fissures, pouvant aller jusqu'à rupture complète de la pièce sous l'action combinée d'une tension mécanique et d'un milieu corrosif. En générale, la contrainte mécanique est incapable à elle seule de rompre le matériau et le milieu est souvent peu ou pas agressif. Les actions simultanées de contraintes et d'un milieu corrosif produisent des fissurations dans un métal. Les fissures sont inter-granulaires se présentent souvent sous forme ramifiée (15) (10).

II.5.4.7 La Corrosion sous fatigue

Très comparable à la corrosion sous contrainte, ce phénomène apparaît sous l'action conjuguée de l'environnement et d'une sollicitation cyclique. Elle se manifeste par un abaissement de la résistance du matériau à la fatigue. La fatigue ou endommagement par fatigue est une des principales causes de rupture des matériaux utilisés dans les constructions (14) (16). On entend par ce terme la modification des propriétés des matériaux consécutives à l'application des cycles d'efforts, cycles dont la répétition peut entraîner la rupture des pièces constituées avec ces matériaux (7).

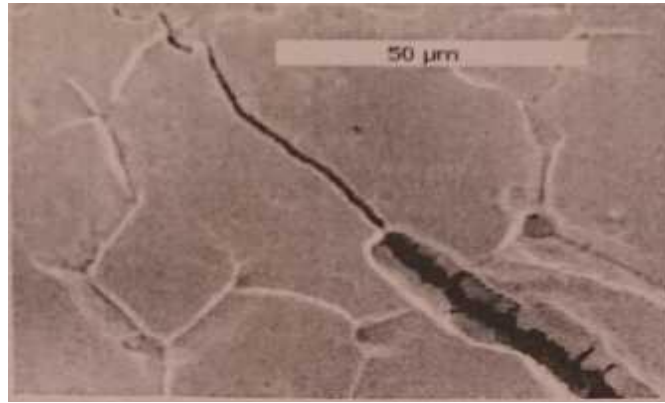


Figure II.12 Fissure de fatigue d'un acier (1)

Pour conclure ce chapitre on pourrait dire que la lutte et la protection contre la corrosion est un souci majeur pour les entreprises. Les protocoles et les moyens mis en œuvre sont très divers et souvent spécifiques à une application donnée.

Chapitre III:

La Protection des pipelines

III.1 Introduction

En dehors de la prévention de la corrosion des pipelines enterrés par un choix judicieux du matériau deux principales méthodes de protections sont en général considérées : la protection passive, l'isolation de la structure par rapport au milieu environnant, ou bien, la protection active, l'annulation du processus électrochimique de corrosion.

Pour la plus part des ouvrages importants les deux méthodes sont appliquées simultanément.

III.2 La Protection passive

Elle est constituée par le revêtement extérieur dont le rôle est de créer un effet de barrière électrique entre le métal des canalisations et le milieu environnant.

La fonction principale des revêtements est de protéger les conduites métalliques, notamment les canalisations enterrées qui peuvent être corrodées par certaines bactéries. Le développement des bactéries se produit sous les dépôts, sous les produits de corrosion et dans des zones de conduite peu aérées (11) (2).

III.2.1 Le Rôle du revêtement

Le rôle des revêtements des structures enterrées ou immergées soumises à la protection cathodique consiste soit à assurer l'essentiel de la protection contre le milieu environnement (protection dite passive). Soit à réduire le besoin en courant de protection cathodique, notamment lors de la phase de polarisation de la structure (9) (8). Dans tous les cas, il est toujours souhaitable que le revêtement utilisé possède les qualités suivantes :

- Une excellente adhérence avec le métal support pour éviter l'infiltration du milieu électrolytique et les risques de corrosion qui y sont associés malgré la présence d'un système de protection cathodique fonctionnant correctement.
- Une résistance d'isolement élevée vis-à-vis du milieu électrolytique afin de limiter la consommation de courant de protection.
- Une résistance élevée pour présenter, sous l'épaisseur d'application retenue, une résistance électrique suffisante.
- Une perméabilité et inertie minimale à l'eau, aux ions et aux gaz.

III.2.2 Caractéristiques des revêtements

Un revêtement doit toujours présenter les caractéristiques suivantes :

- Une bonne adhérence avec le métal et une perméabilité suffisamment faible pour les composants corrosifs dans des conditions de service pour éviter l'infiltration du milieu électrolytique et tout risque de corrosion associé, même si un système de protection cathodique est en place.
- Une stabilité adéquate face aux fluctuations électrochimiques, notamment grâce aux mesures de protection électrochimique, c'est-à-dire une résistance efficace à l'action des substances chimiques présentes dans l'environnement (9) (8).
- Une forte résistance à l'isolement de l'électrolyte afin de réduire la consommation de courant de protection et d'augmenter au maximum la portée de protection pour les structures de longueur plus importante.
- La résistance aux contraintes mécaniques et thermiques pendant la construction et ensuite en service, notamment lors du transport, du stockage et de l'installation, est essentielle.
- Un minimum de perméabilité à l'eau, aux ions et aux gaz.
- La résistance aux bactéries qui peuvent causer des dommages, voire la destruction, du revêtement.
- Ne pas être affecté par les mouvements du sol et les actions du fluide transporté (température, vitesse, pression, surpression).
- Une préservation efficace de ces paramètres au fil du temps.
- Ne pas être affecté par les mouvements du sol et les actions du fluide transporté (température, vitesse, pression, surpression).
- Une préservation efficace de ces paramètres au fil du temps.

III.2.3 Les Types de revêtement

Il existe différents types de revêtements :

III.2.3.1 Les Revêtements métalliques

On trouve deux types de revêtements métalliques :

Les Revêtements anodiques : Ce sont des revêtements moins nobles que l'acier. On peut citer le zinc, l'aluminium et le cadmium. Ils constituent l'anode de la pile et sont donc attaqués, tout en protégeant l'acier (13) (9) (11).

Les Revêtements cathodiques : Constitués de matériaux qui forment des revêtements plus nobles tels que le plomb, l'étain, le nickel, le cuivre, l'argent, l'or, le rhodium ou le platine. L'acier ici devient l'anode de la pile, il est donc évident que la moindre fissure du revêtement entraînera l'attaque de l'acier. On doit donc s'assurer que le revêtement soit parfaitement continu et ne contienne pas de défaut.

III.2.3.2 Les Revêtements organiques

On utilise principalement des revêtements organiques pour assurer la protection des pipelines et des réservoirs de stockage. Les peintures et vernis, les polymères et les matériaux bitumineux font partie de ces produits. Les

peintures et les vernis sont des films minces appliqués en liquide ou en résine en poudre, d'une épaisseur d'environ 0,5 mm. On utilise les vernis pour protéger l'intérieur des réservoirs de stockage. L'imperméabilité du vernis à l'eau signifie qu'il sépare l'objet protégé du milieu corrosif. La protection ne peut échouer que si ce revêtement présente des défauts et se corrode.

III.2.3.3 Les Revêtements à liants hydrocarbonés

Ils se composent d'une couche d'adhérence primaire appliquée à froid. Une ou plusieurs couches de bitumes de houille ou de bitumes de pétrole sont appliquées à chaud à l'état fondu et maintenues par une housse et un tissu de verre.

III.2.3.4 Les Bandes

Elles servent principalement à améliorer les revêtements aux endroits où les soudures de raccordement ou les zones de dégradation sont présentes. Il en existe différents types (16) (17) (8) :

Les morceaux de gras : Elles sont composées d'un support en toile de verre ou en plastique rempli de graisse paraffinée. Celles-ci sont utilisées dans les cas de colmatage de fissures.

Les bandes à froid adhésives : Élaborées à partir d'un support en polyéthylène ou en PVC plastifié recouvert d'une couche adhésive. On enroule à froid les bandes plastiques sur un primaire d'adhérence préalablement appliqué sur le métal.

En règle générale, un système de protection par bandes se compose d'une première couche appelée anticorrosion et d'une seconde couche appelée protection mécanique, qui doit être parfaitement adhérente au métal.

III.2.3.5 Les Produits thermo rétractables

Les joints PF ou PP peuvent être fabriqués en Polyéthylène ou en Polypropylène directement en utilisant un pistolet à poudre à chaud (11) (13). La qualité obtenue est excellente, mais cette méthode est très coûteuse en raison des ressources considérables nécessaires à mettre en place.

La protection passive ne constitue pas un remède totalement idéal et définitif. Aucun revêtement ne confère à un ouvrage un isolement 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 provoquées par les éléments constitutifs du terrain qui endommagent cette protection (18) (2). Et enfin le temps, en vieillissant le métal, contribue aussi à détériorer petit à petit les qualités initiales de barrière à la corrosion que constitue le revêtement (9).

III.3 Isolation du réseau des autres structures étrangères enterrées

La protection passive c'est aussi d'éviter le contact électrique de l'ouvrage à protéger avec des conduites ou ouvrages appartenant à des tiers et qui par l'importance des mises à la terre qu'il créerait, mettrait en péril la

protection cathodique de l'ouvrage en question (11) (8). C'est pour ces raisons que l'isolement de l'ouvrage doit être étudié au passage de ponts, dans les gaines métalliques, aux traversées de structures en béton armé.

III.4 Réalisation de l'isolement du métal par rapport au milieu

C'est le but du revêtement pour les conduites enterrées, ou des peintures pour certains ouvrages enterrés ou immergés. Toute imperfection, tout défaut de cet isolement, qu'il soit d'origine, dû à la pose de l'ouvrage, ou qu'il apparaît au cours de la vie de l'ouvrage (8), met le métal en contact avec le sol d'où la nécessité de l'application de la protection active.

III.5 Prévention par injection d'inhibiteur de corrosion

III.5.1 Principe

Un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qu'on ajoute au milieu corrosif à faible concentration afin d'arrêter ou de ralentir le processus de corrosion du métal qui est en contact avec ce milieu.

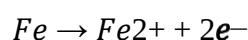
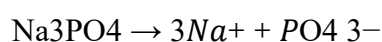
L'action des inhibiteurs est fonction du système métal + solution dont ils se trouvent. Sachant que la corrosion est un processus essentiellement électrochimique, l'action de l'inhibiteur ne peut se faire qu'au niveau d'une des étapes de réaction élémentaires (transport d'espèces en solution, formation d'intermédiaires superficiels, absorption des espèces à la surface des phases solides, transfert de charge électronique.)

L'action des inhibiteurs peut être traduite comme suit :

- L'interposition d'une barrière entre le métal et le milieu corrosif.
- Le renforcement d'une barrière préexistante.
- La formation d'une barrière par interaction entre l'inhibiteur et une ou plusieurs espèces du milieu corrosif.

III.5.2 Les Inhibiteurs anodiques

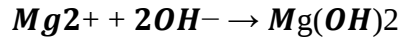
La réaction de l'anion de l'inhibiteur avec le cation métallique forme un précipité insoluble qui protège le métal par effet barrière. Prenant l'exemple de Na_3PO_4 comme inhibiteur avec le fer comme métal: (8) (11)



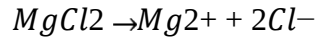
Le précipité ainsi formé est le $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ par la réaction globale suivante : $3\text{Fe}^{2+} + 2\text{PO}_4^{3-} \rightarrow \text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$

III.5.3 Les Inhibiteurs Cathodiques

Ici le précipité insoluble est obtenu à partir de la réaction du cation de l'inhibiteur avec l'ion hydroxyde contenu dans le réactif (8) (11). Prenant le Chlorure de Magnésium $MgCl_2$ comme inhibiteur :



Sachant que :



Le précipité formé est l'Hydroxyde de Magnésium : $Mg(OH)_2$

Cette méthode est facile à mettre en œuvre mais elle est loin d'être le seul moyen d'intervention sur le milieu corrosif.

III.6 La Protection active

La protection cathodique est une technique permettant de réduire la vitesse de corrosion d'un matériau métallique en présence d'un milieu aqueux, en diminuant le potentiel de corrosion du métal.

La nécessité de réaliser la protection cathodique des ouvrages métallique enterrés ou immergés est une notion indispensable (9) (2). Donc pour aborder l'étude de la protection cathodique, il faut s'intéresser aux caractéristiques de l'ouvrage ainsi qu'à son environnement immédiat. Ce n'est qu'ensuite, lorsque toutes les données concernant ces points auront été réunies, que l'étude proprement dite pourra être réalisée, cette étude devra être entreprise dès la conception du projet et se poursuivra en fin des travaux de pose de l'ouvrage (11).

III.6.1 Etude de l'environnement (Evaluation du risque corrosion)

Au moment de la conception de l'ouvrage, une étude de tracé préalable est nécessaire. Réalisée à partir de plans et des cartes géologiques. Cette étude permettra d'évaluer le risque de corrosion de l'ouvrage en question dans son milieu, afin de prendre les décisions nécessaires pour diminuer ce risque due principalement à la corrosivité des sols.

La détermination des risques de corrosion de l'acier dans le sol consiste à évaluer l'agressivité du terrain en question. Cette agressivité du sol dépend principalement de (19) (2):

- de sa nature chimique,
- de son taux d'humidité,
- du pH,
- de la granulométrie,
- de l'aération du milieu.

Ces différents facteurs sont pris globalement en compte dans la mesure de la résistivité du sol (ρ) (9) (13). Une détermination de la résistivité à l'aide de la méthode des quatre piquets (méthode de Wenner), en fonction de la distance qui sépare les électrodes (piquets) insérés dans le sol, donne approximativement la résistivité total du sol à une profondeur plus ou moins égale au trois quarts (3/4) par rapport à l'espacement des piquets. La description de la méthode est décrite comme suit (8):

- Se munir d'un mesureur de terre (Géohm) muni de quatre (04) piquets de terre et de câble de raccordement,
- Planter les quatre piquets en respectant l'équidistance (distance a) entre les piquets. La distance a devra être en fonction de la profondeur d'enfouissement,
- Raccorder les quatre piquets au mesureur de terre, en respectant l'ordre de raccordement du plus près au plus éloigné,
- S'assurer que les quatre entrées du mesureur de terre sont dé-shuntées,
- Lire sur l'afficheur du mesureur de terre la valeur de la résistance,
- Calculer la valeur de la résistivité du sol à l'aide de la formule suivante :

$$\rho = 2 \pi a R_m$$

avec

ρ : résistivité ($\Omega.m$), a : distance entre les piquets (m), R_m : résistance, valeur lue sur le mesureur de terre (Ω).

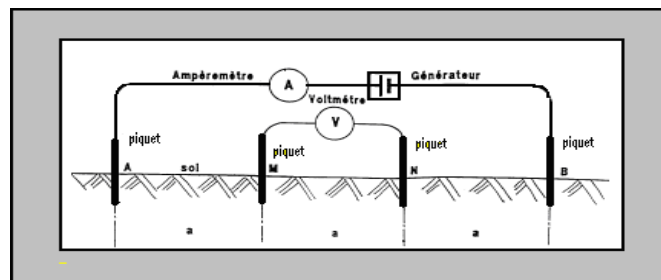


Figure III.1 Méthode de WENNER à quatre piquets pour la résistivité du sol (9).

A partir des constatations établies ci-avant, 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 (2) (9). C'est le principe de la protection cathodique. Il existe deux manières de réaliser la protection cathodique (8).

III.6.2 La Protection par anode sacrificielles

La protection cathodique d'une canalisation en acier peut être obtenue par liaison électrique à une masse métallique, appelée anode sacrificielle ou anode soluble, faite d'un métal moins noble que l'acier, de façon à baisser le potentiel de la conduite en dessous du seuil de protection (-850 mV par rapport à l'électrode Cu/Cu SO₄). En examinant la série des potentiels de corrosion des métaux, on constate que trois métaux (le zinc, l'aluminium et le magnésium) ont des potentiels plus négatifs que celui de l'acier et peuvent, de ce fait, servir d'anodes. En ce qui concerne les conduites enterrées, les anodes utilisées sont à base de zinc ou de magnésium (11) (9). En milieu marin, on utilise aussi des anodes à base d'aluminium.

III.6.2.1 Différents types d'anodes sacrificielles

Anodes à base de zinc

Les caractéristiques des anodes de zinc :

- La consommation massique pratique : environ 11,9 kg/A. an
- Potentiel dans le sol : -1 100 mV (électrode Cu/Cu SO₄)
- Écart de potentiel par rapport au critère de protection : 250 mV.

Anodes en magnésium

Les caractéristiques des anodes de magnésium :

- Consommation massique pratique : environ 7 kg/ A.an
- Potentiel dans le sol : - 1600 mV (électrode Cu/Cu SO₄)
- Écart de potentiel par rapport au critère de protection : 750 mV. (9) (2)

III.6.2.2 Domaine d'utilisation de la protection par anodes sacrificielles

Les anodes galvaniques ne servent qu'à protéger les réseaux dont l'isolation est adéquate, de petite taille (1 à 2 km de conduites) et pour lesquels on peut être certain que des extensions importantes ne seront pas réalisées dans les années à venir. Elles peuvent également être mises en place pour assurer la mise à la terre électrique d'un bâtiment, tout en garantissant la protection cathodique de celui-ci, et en évitant ainsi les tensions galvaniques acier/cuivre qui peuvent se former lors de l'utilisation de terres en cuivre dans des terrains très fréquentés.

III.6.3 Protection cathodique par courant imposé (par soutirage de courant)

Ce mode de protection est appelé, plus communément, protection par soutirage. Le principe de cette protection consiste à relier au pôle négatif d'une source à courant continu, l'ouvrage à protéger, tandis que le pôle positif est relié à une pièce conductrice (en métal) enterrée à une certaine distance. Le courant partant de cette pièce appelée déversoir, traverse le sol, est capté par la canalisation et retourne au générateur par circulation dans le métal de la conduite. La canalisation est alors rendue négative par rapport au sol. Si le critère de potentiel est atteint en tous points, la conduite est protégée cathodiquement (9) (11). L'utilisation de la protection cathodique est basée sur l'injection d'un courant continu qui permet d'abaisser le potentiel naturel du métal de la zone active vers la zone d'immunité. Le système de protection cathodique a vu un développement rapide et une application beaucoup plus large dans l'industrie pétrolière et gazière produite par les réactions d'oxydation d'une part, et une formation d'un dépôt métallique crée par les réactions de réduction aux sites cathodiques d'une autre part.

III.6.3.1 Principe de la protection cathodique par soutirage de courant

La Protection Cathodique d'un ouvrage métallique en contact avec un électrolyte consiste à placer cet ouvrage à un potentiel électrique négatif tel que la corrosion devienne thermodynamiquement impossible (Figure III.2). Comme valeur de potentiel, au-dessous duquel l'acier ne peut se corroder dans un milieu ayant un pH compris entre 4 et 9, on admet le critère de -850mV, mesuré par rapport à l'électrode impolarisable au sulfate de cuivre en solution Saturée (9).

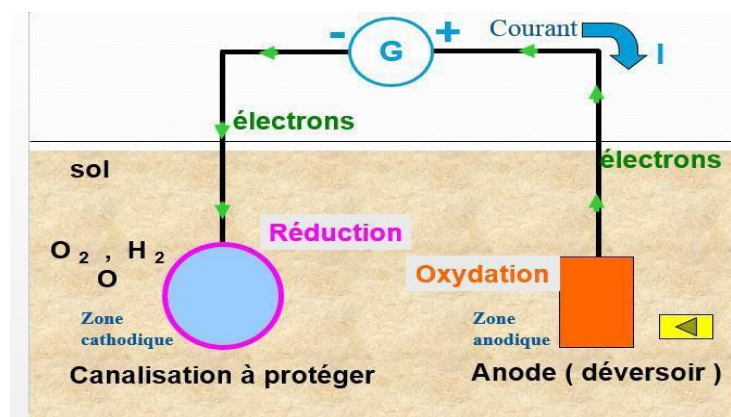


Figure III.2 Principe de la protection cathodique par courant imposé (19).

Le principe de la Protection Cathodique trouve son application dans la pile élémentaire ou l'une des électrodes (anode) est toujours corrodée alors que l'autre ne l'est pas.

Deux méthodes sont utilisées pour réaliser une protection cathodique en utilisant :

- L'anode sacrificielle appelée encore anode réactive (Figure III.2 (a)),
- Le soutirage de courant ou dispositif à courant imposé (Figure III.2(b)).

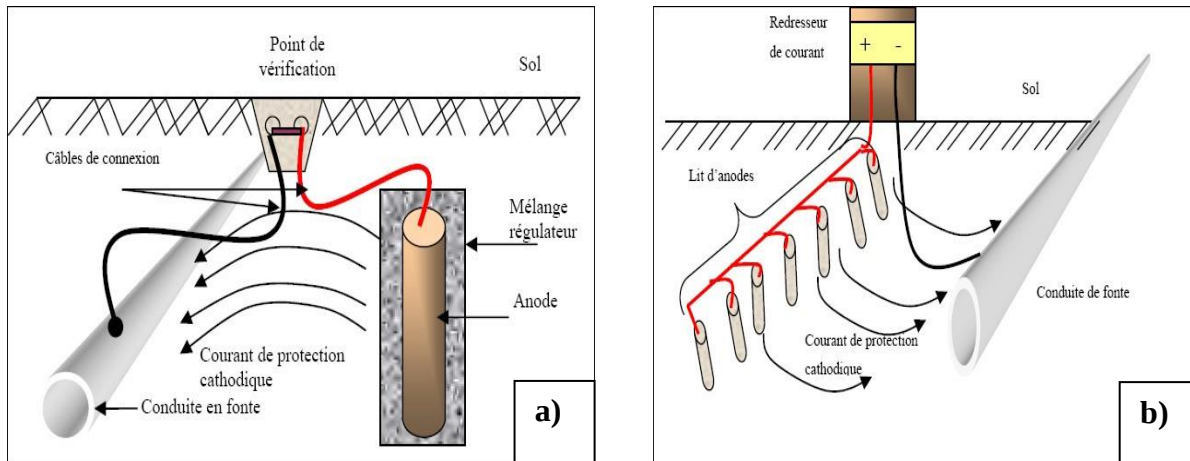


Figure III.3 Principe de la protection cathodique (anode sacrificielle et courant imposé) (5).

III.6.3.2 Équipements utilisés pour la protection cathodique par soutirage de courant

➤ Transformateur-redresseur

Le poste de soutirage est habituellement constitué par un transformateur redresseur alimenté à partir du réseau électrique basse tension (220 - 380 V). Dans certaines situations où l'énergie électrique basse tension n'est pas disponible, il est nécessaire d'avoir recours à d'autres sources d'énergie autonomes (8) (11) telles que l'énergie solaire, accumulateurs et piles, ou groupes électrogènes (Figure III.4).

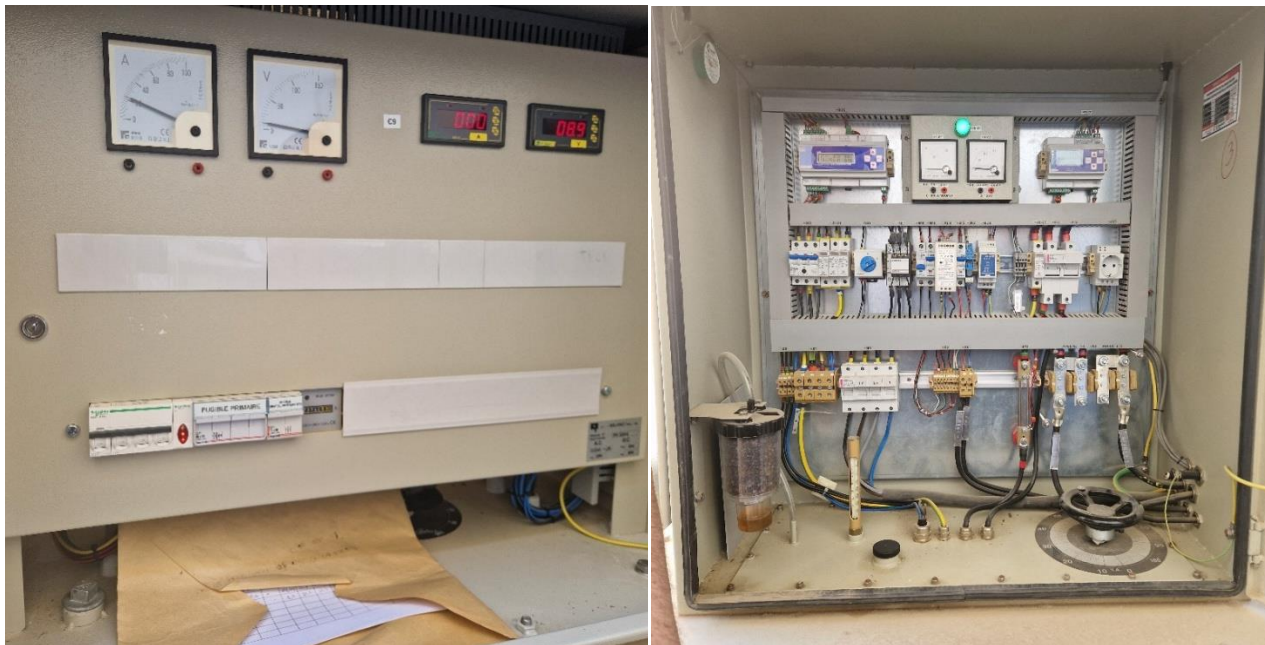


Figure III.4 Transformateur-redresseur

➤ Déversoir

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 souhaité (idéalement de l'ordre de 15 à 20 ans) (9).

➤ Matériaux de déversoir

L'acier sous forme de rails, type lourd (50 kg au mètre) ou sous la forme de tubes épais utilisés pour les forages. Dans ce cas, la consommation du déversoir est de 10 kg/A.an. Compte tenu des risques de coupure prématurée du déversoir par corrosion,. Utiliser dans tous les types de sols, eau douce et eau de mer graphite, se présente sous forme de rondins de 7 cm de diamètre et de 1,5 mètre de longueur, en poudre de graphite agglomérée par un liant.

La consommation de l'anode est de l'ordre de 1 kg par A.an

Le Ferro silicium : Il se présente sous la forme de rondins de diamètre 7 cm, de longueur 1,5 mètre, en fonte à 16 % environ de silicium et 4,5 % de molybdène ou de chrome (9). La consommation du matériau est d'environ 0,5 kg par A.an avec pour densité limite 10 A/m². Les rondins de ferro silicium à 4 % de chrome sont utilisables dans tous les types de sols et de milieux liquides chlorurés (Figure III.5).



Figure III.5 Anode en fer de silicium

➤ **Résistance de terre des déversoirs**

La résistance de terre d'un déversoir doit être estimée lors des études, pour être compatible avec les possibilités du générateur de courant continu, et fournir le courant nécessaire ou à prévoir, pour la protection du réseau (8) (9) (2). Cette résistance dépend de la forme du déversoir, de ses dimensions, de la résistivité du sol et peut être calculée à partir de formules empiriques.

➤ **Implantation du déversoir**

Le déversoir devra être installé à moins de 15 mètres de la canalisation, de façon à favoriser son rayonnement et augmenter ainsi la portée du poste de protection. Il faudra veiller impérativement à s'écarter d'au moins 50 mètres de tout ouvrage métallique enterré susceptible de capter les courants déversés (Figure III.6) (9).

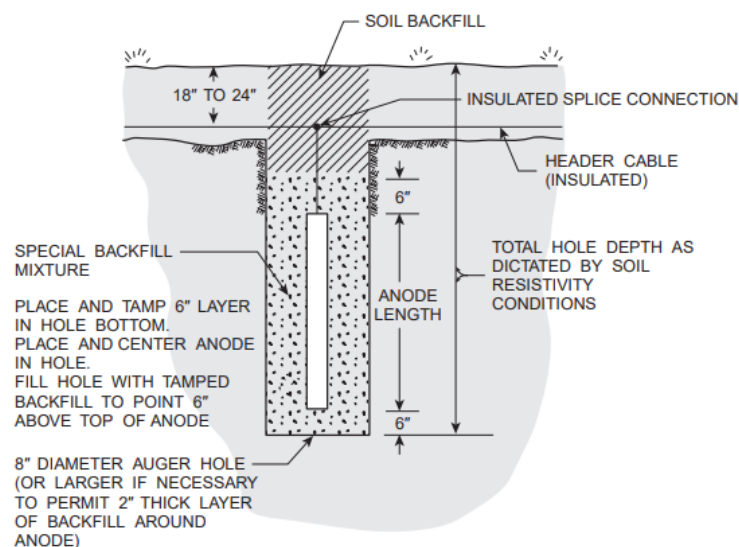


Figure III.6 Implantation du déversoir (9)

➤ L'anolyte (bakfill)

L'anolyte est le milieu encaissant le remplissage, qui entoure le déversoir. Le terme "backfill" est parfois employé. Ce milieu homogène permettra, de plus, une corrosion plus uniforme du déversoir et prolongera ainsi sa durée de vie. Dans certains milieux très compacts, vases ou argiles, le rôle du backfill de granulométrie appropriée est aussi de favoriser l'émission du gaz, ainsi que d'éviter la formation d'une gangue qui bloque le déversoir (Figure III.7) (9).



Figure III.7 L'anolyte (bakfill)

Pour les déversoirs anodiques à terre, il est recommandé de toujours entourer les anodes d'un backfill dont le rôle est de permettre une consommation uniformément répartie et une meilleure résistance déversoir/milieu.

Tableau III.1 Caractéristiques du bakfill de Coke.

Type de backfill	Résistivité ($\Omega.m$)	Remarques
Poussière de coke	<0.5	Ne pas utiliser dans un sol sujet à des variations de niveau d'eau
Grenaille de fer	<0.01	A utiliser pour des prises de terre profondes

III.7 Dimensionnement des systèmes de protection cathodique

Il s'agit tout d'abord de mesurer, quand cela est possible, mais le plus souvent d'estimer par le calcul, le besoin en courant de protection cathodique de la structure, c'est-à-dire le courant qu'elle doit recevoir pour que le seuil de protection soit atteint. Il s'agit d'utiliser des hypothèses déduites de l'expérience. Le tableau suivant donne les valeurs de densité de courant cathodique couramment utilisées dans les sols ou dans certaines eaux de mer, pour l'acier au carbone non revêtu.

Des expériences établies par UHLIG donnent pour l'acier nu les critères suivants :

- **0.7 mA/m²** pour un acier dans le ciment.
- **5 mA/m²** pour un acier dans un sol en aérobie sans bactérie.
- **5 mA/m²** pour un acier dans un sol aéré 7mA/m² pour un réseau de canalisation enterrées.

Ces valeurs sont des moyennes et doivent toujours, au moment des projets, être ajustées en fonction des caractéristiques réelles du métal mais surtout de la nature de l'électrolyte. Le besoin en courant de protection sert à la détermination de la masse et du nombre d'anode, ainsi qu'au dimensionnement électrique de la source de courant éventuelle. Le courant délivré doit être estimé au mieux, non seulement pour des risques économiques, mais aussi à cause de certains effets néfastes des intensités trop élevées: tel que le décollement cathodique des revêtements, la fragilisation par l'hydrogène de certains alliages, problèmes de sécurité liés aux risques d'étincelles électrique, ou aux interventions humaines sur la structure, problèmes d'interférence avec les structures voisines.

Enfin, le dimensionnement des systèmes de protection cathodique doit tenir compte de la résistance électrique des éléments du circuit. Pour cela, la résistance opposée au courant par l'électrolyte (**RA**) doit être évaluée. Les lignes de courant étant généralement très concentrées autour des anodes, on parle souvent de "**résistivité d'anode**". Celle-ci est calculée à partir de la résistivité de l'électrolyte (**ρ**), de l'environnant, et de la géométrie de l'anode, tel que:

RA: rayon d'anode **l**: longueur de l'anode.

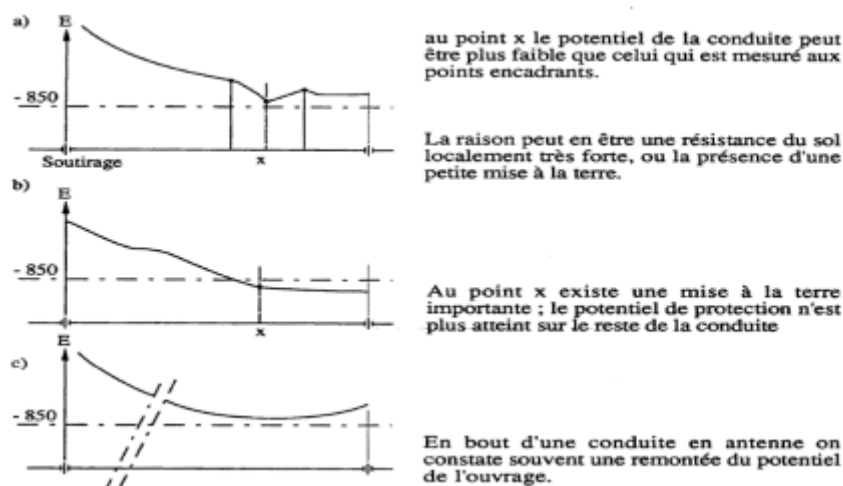
Le tableau suivant donne les formules le plus souvent utilisées pour le calcul de la résistance d'anode RA

Tableau III.2 Équations de Résistance des anodes ou déversoirs (8).

Géométrie Anode cylindrique (ou assimilée)	formule	auteur
Verticale sprès de la surface) ou off-shore	$R_a = \frac{\rho}{2\pi l} * (\ln \frac{\rho}{r_a} - 1)$	dwight
Horizontale ou verticale profondément enfouie	$R_a = \frac{\rho}{2\pi l} * (\ln \frac{\rho}{r_a} - 1)$	dwight
Horizontale enfouie à une hauteur h	$R_a = \frac{\rho}{2l} (\ln \frac{l^2 + L\sqrt{4h^2 + l^2}}{4h} - \frac{2h}{l} - \frac{\sqrt{4h^2 - l^2}}{l})$	dwight

III.7.1 Représentation graphique du potentiel d'une conduite

Sur les courbes réelles, certains situations qui peuvent s'expliquer mathématiquement conduisent à des profils de potentiels tels que visualisés ci-dessous :

**Figure III.8 Représentation graphique du potentiel d'une conduite (9).**

III.7.2 Mise en service du système

Lors de la mise en service du système, il faut :

- Procéder à la mise en marche et à la vérification du fonctionnement correct du poste à courant imposé ;
- Régler le poste de façon à obtenir le niveau de potentiel prescrit dans l'étude. Si des écarts importants apparaissent, il convient d'en préciser la raison à l'aide de mesures ;
- Si nécessaire, dans le but de limiter le courant débité, la liaison des anodes galvaniques à la structure protégée peut s'effectuer par l'intermédiaire d'une résistance variable.

Effectuer ensuite les mesures suivantes :

- Tension de sortie du redresseur au poste à courant imposé.
- Intensité du courant de protection.
- Potentiel à courant établi au point de soutirage (l'électrode doit être positionnée en dehors du cône de tension anodique).
- Potentiel à courant établi relié aux extrémités de chacune des parties de la structure Protégée par un redresseur.
- Potentiels à courant établi et besoins en courant des électrodes étrangères.
- Influences possibles du courant alternatif ou du courant continu.
- en présence de courants vagabonds, effectuer des mesures pour déterminer le niveau des influences et assurer l'efficacité de la protection cathodique. Ces mesures doivent être effectuées avec les postes de protection cathodique alternativement hors et en service. (9) (8).

III.7.3 Contrôle de l'efficacité de la protection cathodique

Le contrôle de l'efficacité de la protection contre la corrosion d'un ouvrage enterré consiste à vérifier, par des mesures appropriées de potentiel et de courant, que les critères de protection cathodique sont bien atteints en tous points de l'ouvrage. Mais ce contrôle doit s'attacher à vérifier aussi que la protection passive, telle qu'elle a été précédemment définie dans ses divers rôles, est toujours intacte (9) (2). C'est pourquoi il sera nécessaire d'apprécier la valeur d'isolement apportée par le revêtement, comme il sera nécessaire de vérifier l'isolement par rapport à d'autres structures enterrées (conduites,...), et l'efficacité des raccords isolants.

III.7.3.1 Mesure des potentiels

La mesure du potentiel d'une canalisation se fait aux points accessibles du réseau. Ces points de mesure sont constitués par tous les accessoires de réseau isolés du sol (vannes, robinets de branchement d'abonné et parties aériennes) par les postes de détente et de comptage, par les prises de potentiel réalisées à l'aide d'un câble électrique soudé sur la conduite. Le nombre et les emplacements de ces points de mesures sont définis lors des études. On prévoit en général au moins un point de mesure tous les 500 mètres en zone urbaine et tous les 2 km ou 2.5 km hors la zone urbaine (rase campagne). La protection cathodique étant en service, on mesure le potentiel dit à courant établi, ou potentiel "ON", qui est le potentiel du métal sous application du courant de protection cathodique (9) (2). A la coupure du courant de protection, on mesure le potentiel à courant coupé, ou potentiel "OFF". Si cette mesure pouvait se faire instantanément, quelques secondes après la coupure, ce potentiel pourrait représenter le potentiel réel du métal sous protection cathodique, sans prendre en compte les chutes de tension dues à la circulation des courants de protection dans (8).

III.7.3.2 Mesure des courants

Les mesures de courant sont effectuées avec des appareils de mesure extérieurs appropriés. Elles sont nécessaires pour les anodes galvaniques, les postes à courant imposé, les liaisons équipotentielles, les postes de drainage et les courants circulant dans les canalisations. Elles permettent d'établir si des changements significatifs sont intervenus ou non (9) (11) (8).

III.7.3.3 Vérification de l'isolement de la structure par rapport à d'autres ouvrages

La vérification de l'isolement d'une conduite par rapport à d'autres ouvrages se fait à partir de mesures de potentiel (9) (2) (5). Si les deux structures sont en contact, elles ont des potentiels identiques. Si les potentiels des structures sont voisins, on peut lever le doute sur un contact éventuel en installant un chronorupteur dans le système d'alimentation de la protection cathodique de la conduite. Cet appareil crée alternativement des cycles de coupure et de mise en service de la protection cathodique. On vérifie si l'ouvrage suspecté est soumis, ou non, au même cycle pour déclarer qu'il est en contact ou non avec la conduite.

Chapitre IV :

Dimensionnement du poste de protection cathodique

IV.1 Introduction

Dans ce mémoire on s'intéresse tout particulièrement au dimensionnement du poste de protection du manifold du Terminal Nord. Celui-ci assure le stockage du pétrole brut arrivant par le pipe-line et le chargement des pétroliers. Le manifold du terminal de *Bejaïa* est une installation technique essentielle pour la gestion des flux de produits et la protection de cette structure est d'une importance primordiale.

IV.2 Construction des manifolds

Le manifold centralise les flux de produits, tels que les hydrocarbures, et les dirige vers les zones de stockage ou vers les navires. Il permet un contrôle précis des opérations de chargement et de déchargement, garantissant la sécurité et l'efficacité des transferts. Ceci met en lumière l'importance du manifold dans les opérations portuaires, assurant ainsi la fluidité et la sécurité des échanges commerciaux au terminal de *Bejaïa*.



Figure IV.1 Illustration de manifold du Terminale de Bejaïa.

Les manifolds sont généralement fabriqués en acier inoxydable ou en alliages spéciaux pour résister à la corrosion, aux températures élevées et à la pression des fluides transportés. Sur la figure IV.1 est représenté le schéma du manifold du terminal de *Bejaïa*.

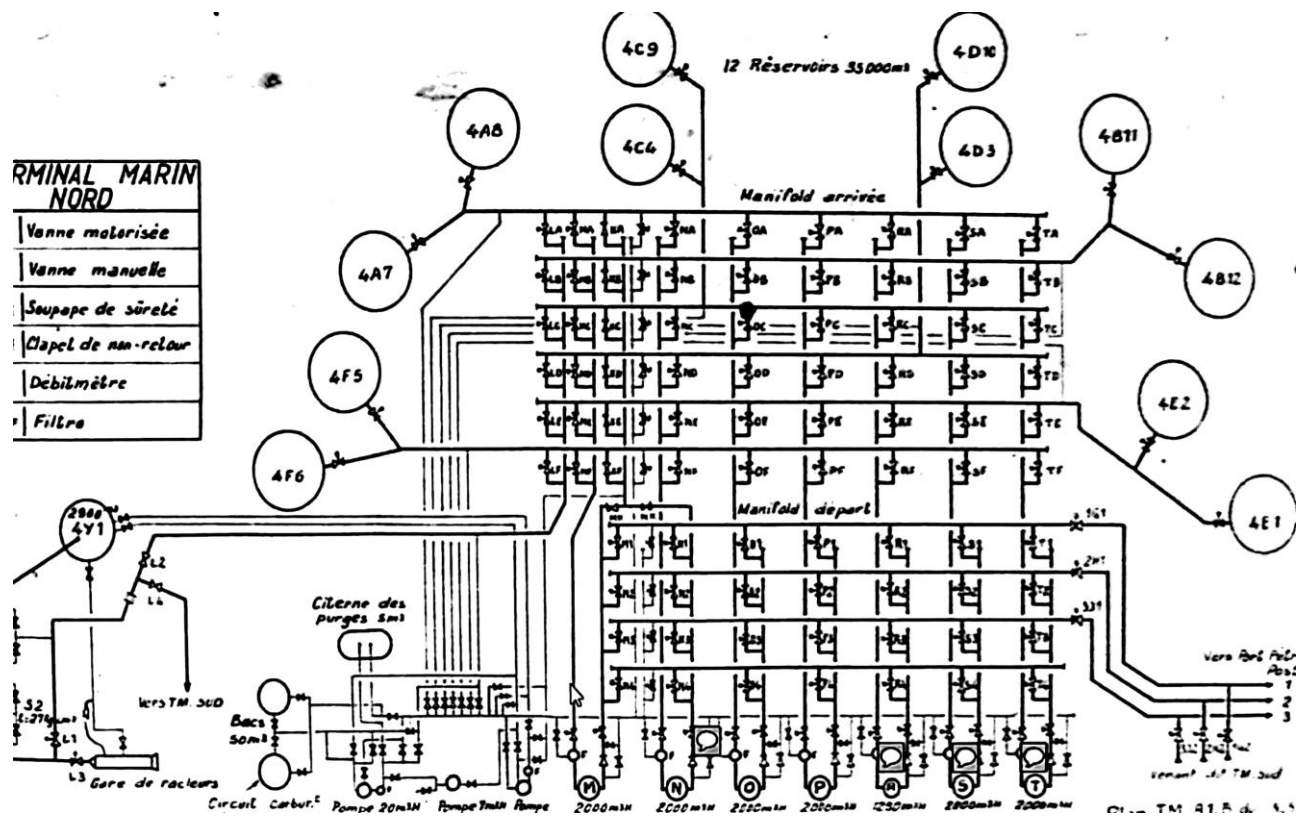


Figure IV.1 Schéma de manifold

La constitution d'un manifold au terminal de *Bejaïa* est composée de :

- Tuyauteries, les tuyaux en acier inoxydable ou en alliages résistants à la corrosion sont utilisés pour transporter les fluides sans risque de contamination ou de détérioration.
- Vannes, des vannes de contrôle permettent de réguler le flux des produits, de les diriger et de les isoler en cas de besoin.
- Capteurs, des capteurs de pression et de température sont installés pour surveiller les conditions de fonctionnement et assurer la sécurité.
- Joints, les joints d'étanchéité sont essentiels pour prévenir les fuites et maintenir l'intégrité du système.
- Collecteurs, les collecteurs réunissent plusieurs entrées ou sorties, facilitant la distribution ou la collecte des fluides.
- Instruments de mesure, des instruments comme les débitmètres mesurent le volume ou la vitesse de flux des produits

IV.3 La Dégradation par corrosion du manifold

Les types de dégradation par corrosion qui peuvent affecter les manifolds, sont celles provoquées par la corrosion externe et la corrosion interne.

IV.3.1 La corrosion externe

Les types de corrosion externe qui peuvent affecter les manifolds, tels que ceux utilisés à *Bejaïa* pour le transport de pétrole, incluent :

Corrosion atmosphérique : causée par l'exposition à l'air et à ses polluants,

Corrosion par contact : due au contact avec d'autres métaux ou matériaux,

Corrosion par piquûres : formation de trous localisés, souvent en présence de chlorures,

Corrosion filiforme : se manifeste par des lignes ou des filaments sous des revêtements,

Corrosion due aux agents biologiques : causée par des organismes vivants comme les algues ou les bactéries,

Corrosion par cavitation : formation de cavités dues à la formation et à l'implosion de bulles dans un fluide,

Corrosion sous tension : fissuration due à la combinaison de contraintes mécaniques et de corrosion,

Corrosion due à l'oxydation à haute température : se produit à des températures élevées, formant des oxydes sur les métaux.

IV.4 Application de la protection du manifold contre la corrosion

IV.4.1 La Protection cathodique du manifold

Selon l'expérience, les systèmes de protection par anodes sacrificielles ne garantissent pas la distribution de courant uniforme nécessaire tout au long de leur durée de vie et sont susceptibles de défaillir prématurément dès que les anodes galvaniques sont consommées. Un courant de protection élevé est nécessaire pour les pipelines de manifold enterrés et aérien, ce qui exclut généralement l'utilisation d'anodes galvaniques. Aujourd'hui, la plupart des systèmes de protection conçus pour les bacs aériens sont équipés d'un courant imposé afin de fournir le courant nécessaire sur une longue période.

IV.4.1.1 La Protection cathodique par courant imposé

Les déversoirs en profondeur vont éliminer la question de la répartition uniforme du courant, tout en introduisant d'autres problèmes liés aux interférences avec les structures voisines, qui peuvent engendrer une corrosion sévère où le courant passe par d'autres structures afin de retourner au système.

Cependant, il y a des zones où les déversoirs profonds ne peuvent pas être utilisés en raison des conditions du sol ou de la configuration du site. Dans ce cas là, les anodes peuvent être installées horizontalement, directement sous le manifold, pour assurer une bonne distribution de courant à l'ensemble du fond du manifold.

Les anodes utilisées pour la protection externe du manifold doivent être constituées de matériaux comme le graphite, les métaux platinés, la magnétite, la fonte à haute teneur en silicium, etc. Elles sont connectées à la borne positive de la source de courant continu, individuellement ou en groupe, par des conducteurs isolés, tandis que le bac est connecté à la borne négative.

IV.4.1.2 La Protection cathodique par anodes sacrificielles

Le nombre d'anodes nécessaires à la protection cathodique des manifolds aériens dépend du besoin en courant total et du courant de décharge généré par les anodes vers le sol.

L'emplacement des anodes des déversoirs dépend de plusieurs facteurs influençant la distribution actuelle sur la géométrie de la structure. En général, une meilleure distribution du courant et une polarisation plus uniforme sont obtenues par une répartition uniforme des anodes autour du manifold ou sous les manifolds lors de leur conception.

Quand aux réservoirs enterrés, les anodes utilisées sont généralement fournies pré-conditionnées dans un sac en coton entouré d'un backfill, ce qui aide à générer un courant de sortie et une vitesse de dissolution plus uniformes, bien qu'il réduise la résistance de l'électrolyte. Dans le cas d'un sol à faible résistivité, les anodes peuvent être fournies nues.

L'intérieur des manifolds du brut sont souvent protégés par des systèmes de protection, inhibiteur anodique.

IV.4.1.3 Actions nécessaires pour l'optimisation du système de protection

Il est vivement conseillé de prendre les mesures suivantes pour améliorer la protection :

- effectué des tests sur les tôles des fonds afin d'effectuer une évaluation approfondie et de fournir un dossier technique complet de l'équipement. Il ne faut pas oublier d'effectuer des analyses de la composition chimique sur un échantillon de tôle découpée afin d'obtenir sa couleur.

- Pour vérifier la gravité des tassements et des déformations, il est nécessaire d'obtenir un relevé de la rotondité et de la verticalité du manifold depuis l'extérieur, ainsi que des relevés de l'intérieur du fond. (Conformément au code API 653).
- Changer les supports endommagés des tubes de jaugeage.
- Il est important de supprimer les nids de piqures et d'égratignures ainsi que les cratères de corrosion afin d'éviter toute propagation en profondeur.
- Effectuer des études concernant l'agressivité du sol. En échantillonnant, même si des analyses sur l'agressivité des substances manifold ont été effectuées.
- Éliminer les particules de soudure et remplir les joints de soudure des supports et des rustines.
- Lors de la réparation d'un fond, il est important de suivre une approche adéquate afin de garantir l'intégrité globale de l'équipement.

Après avoir introduit les éléments essentiels de mon étude, y compris le lieu géographique, les caractéristiques de manifold à protéger, et les différentes méthodes de protection cathodique qu'on peut appliquer, il est important de spécifier que le dimensionnement du système prenne en compte seulement la protection externe des fonds de manifold par courant imposé. Dans ce qui suit, nous allons entamer les calculs nécessaires qui vont donner naissance au système de protection.

IV.4.2 Vérification de l'état d'avancement de la corrosion

Tableau IV.1 Vérification de l'état d'avancement des corrosions

Description de l'indication	Profondeur (% ép)		Longueur (mm)		Largeur (mm)		Potentiel mesuré sur site (mv)	Observation
	ILI	Ins dir	IL I	Ins dir	ILI	Ins p Dire c		
Corrosion par piquûres	45.7	57.4	22	22	29	29	-550	Corrosion évaluée en profondeur
Corrosion caverneuse	58.3	80	22	80	30	80	-550	Corrosion évoluée

IV.5 Dimensionnement de la protection cathodique d'une canalisation

Le dimensionnement de la protection cathodique d'une canalisation procède à la fois par les calculs à partir des paramètres à mesurer, et de l'expérience du projecteur. Avant d'entamer une étude de la protection cathodique certains paramètres ou conditions doivent être connus et sont indispensables pour les calculs à savoir :

Caractéristique dimensionnelles de l'ouvrage : longueur de la canalisation et l'épaisseur du tube.

Résistivité du milieu encaissant (calculé ou estimé) : Résistivité du sol.

Durée de vie de l'installation de protection cathodique.

Afin de réaliser une contre étude sur cette canalisation certains paramètres doivent d'abord être établis, comme cité auparavant.

Tableau IV.2 Récapitulatif des données de calcul

Paramètre	Valeur numérique
Le diamètre de manifold	2749.22 m ²
Longueur du pipe	1163m
Epaisseur	11.62
Type de revêtement	Brai de Houille (le revêtement dégradée)
Nuance d'acier	X60 amélioré
La résistivité du sol ρ_s	10 Ω .m
La densité de courant J	20 mA/m ²
Le coefficient de dégradation du revêtement X	50%
La durée de vie du système t	20 ans
Le matériau d'anodes utilisé	Ferro-Silicium (FeSi)
Le diamètre de l'anode D1	64 mm
La longueur de l'anode L1	1525 mm
Le poids de l'anode m	35 kg
Le taux de consommation de l'anode C	0.5 kg/A.an
Le facteur d'utilisation de l'anode U	85%
L'efficacité du courant e	90%
Matériau de backfill	Coke de charbon
Diamètre du backfill D2	200 mm
Longueur du backfill L2	1800 mm
Résistivité du backfill ρ_b	50 Ω .cm
Les câbles de connexion	PE/PVC
Résistivité des câbles (Cuivre) ρ_c	0.145 Ω .m
Section des câbles S _c	50 mm ²
Longueur du câble anodique L _a	282.7 m
Longueur du câble cathodique L _c	320 m
Sortie du transformateur redresseur	100V / 100A

IV.5.1 Caractéristiques dimensionnelles de l'ouvrage

On cherche à protéger seulement l'extérieur des fonds des bacs. La surface de pipeline de manifold à protéger est alors :

$$S_f = \pi * r^2 \quad \text{équ. 1}$$

IV.5.1.1 Densité du courant de protection

Notée « J », c'est l'intensité par unité de surface. Elle dépend essentiellement de la qualité d'isolement du revêtement et de l'agressivité du milieu environnant.

La densité du courant est généralement estimée suivant l'expérience des cas réels, et conformément aux normes. Voici un tableau qui donne des différentes valeurs de densité de courant pour l'acier nu pour des sols de résistivités variables.

Tableau IV.3 Densités de courant de protection en fonction des résistivités des sols.

Résistivité du sol en $\Omega.m$	Densité de courant mA/m ² (acier nu)
Inférieure à 10	20
10-100	10
100-1000	5
Supérieure à 1000	1

IV.5.1.2 Calcul du courant de protection

C'est le courant que la structure doit recevoir pour atteindre le seuil de protection. Il est mesuré quand cela est possible, mais le plus souvent estimé par le calcul qui se base sur la densité du courant et l'état du revêtement. On le calcul comme suit :

$$I_p = J * S_f * X \quad \text{équ. 2}$$

Avec :

J : La densité du courant (A/m²),

S_f : La surface protégée (m²),

X* : le coefficient de dégradation du revêtement.

*Dans le cas d'une structure revêtue, on prend en compte un coefficient de mise à nu de l'acier par dégradation. Il est noté «X» et il est en fonction de la qualité présumée du revêtement.

La masse totale d'anode requise est de :

$$Ma = \frac{C * t * I_p}{u * e} \quad \text{équ. 3}$$

Avec :

Ma : Masse totale en kg. C : Consommation de l'anode en kg/A.an.

t : Durée de vie du système en années,

I_p: Courant de protection total en Ampères,

U : Facteur d'utilisation de l'anode,

e : l'efficacité du courant.

Le nombre d'anode requis est de :

$$N = \frac{Ma}{m} \quad \text{équ. 4}$$

Avec :

m : la masse d'une anode de Ferro-Silicium (kg).

IV.5.1.3 Calcul des résistances électriques

Il est important de tenir compte des résistances électriques des différents éléments du circuit. Pour cela, on doit déterminer la résistance opposée au courant par l'électrolyte. On parle souvent de résistance d'anode ou de déversoir en général qui est calculée en fonction des paramètres géométriques des anodes et de la résistivité de l'électrolyte environnant.

Puisque notre cas n'est pas celui d'une structure longiligne, on néglige la résistance électrique de la structure elle-même.

La résistance d'une anode au backfill

Le courant doit avant tout passer par le backfill afin d'atteindre le sol, ce qui nous exige de calculer la résistance du déversoir en plusieurs étapes.

Parmi le nombre de formules connues, on choisit celle qui convient à un déversoir horizontal avec des anodes verticales. Elle s'écrit comme suit :

$$Ra/b = \frac{\rho b}{2\pi l_1} \left(\ln \frac{4l_1}{r_1} - 1 \right) \text{ équ. 5}$$

Avec

ρb : La résistivité du backfill ($\Omega.m$),

L_1 : La longueur de l'anode (m),

r_1 : le rayon de l'anode (m).

La résistance du backfill au sol

La deuxième partie de calcul de la résistance du déversoir est de déterminer la résistance du backfill au sol. Il s'agit de l'équation 5, en changeant quelques paramètres. Le backfill utilisé ici est du coke de charbon.

$$Rb/c = \frac{\rho_s}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r_2} - 1 \right) \text{ équ. 6}$$

Avec

ρ_s : La résistivité du sol ($\Omega.m$),

L_2 : La longueur du backfill (m),

r_2 : le rayon du backfill (m).

La résistance du déversoir

En considérant que l'anode et le backfill présentent des résistances au courant en série, elles doivent être additionnées :

$$R' = Ra/b + Rb/s \quad \text{équ. 7}$$

On introduit par la suite le coefficient de couplage qui prend en compte le nombre d'anodes et l'espacement entre eux afin de générer un facteur qui corrige la valeur de la résistivité. Il est tiré du graphe des courbes (Figure IV.4) donnant la facteur de correction en fonction du nombre d'anode et de la distance les séparant.

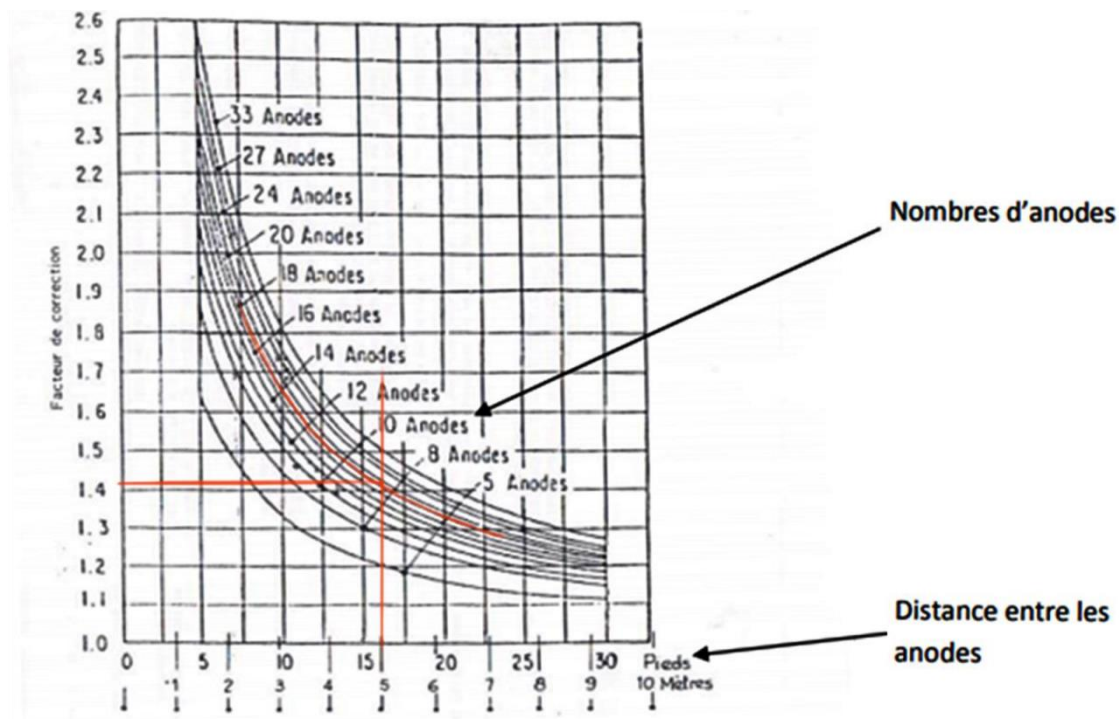


Figure IV.2 Graphe des courbes donnant le facteur de correction en fonction du nombre et la distance entre les anodes

La formule devient donc :

$$R'' = (Ra + Rb) * F \quad \text{équ. 8}$$

Avec

F : Le facteur de correction.

Sachant que les anodes sont liées en parallèle, la résistance du déversoir est calculée par la formule suivante :

$$R_d = \frac{R''}{N} \quad \text{équ. 9}$$

Avec

R'' : la résistance corrigée (Ω),

N : le nombre des anodes dans le déversoir.

La résistance des câbles

Des câbles en PE/PVC sont employés avec des longueurs de 90 m pour le câble anodique et 150 m pour le câble cathodique. Ces derniers ont une section de 50 mm² et le matériau conducteur est du cuivre.

$$R_c = \rho_c * \frac{L_{\text{cable}}}{S_{\text{cable}}} \quad \text{équ. 10}$$

Avec

ρ_c : La résistivité du matériau conducteur du câble ($\Omega.m$),

L_{cable} : La longueur du câble (m),

S_{cable} : La section du câble (m²).

La résistance totale du circuit

C'est la somme de toutes les résistances qu'on a calculé ci-dessus. On peut l'écrire comme :

$$R_t = R_d + R_c \quad \text{équ. 11}$$

La tension du redresseur

En employant la loi d'Ohm, la tension aux bornes du redresseur s'exprime avec la formule suivante :

$$U = R_t * I_p \quad \text{équ. 12}$$

IV.5.2 Caractéristiques dimensionnelles de l'ouvrage

Les critères de la base de calcul sont :

Durée d'exploitation : 30 ans

La consommation d'anodes : 0,5 kg/A.ans

Potentiel spontané : -550 mV

Résistance d'isolement initiale de 10000 Ω m²

Densité de courant : 20 mA/m².

Potentiel de protection maxi : < -950 mV.

Tableau IV.4 Caractéristiques dimensionnelles de l'ouvrage

Diamètre (")	longueur (m)	Superficie (m²)
32	98.7	251.86
28	240.38	536.66
22	187.5	328.52
20	165.1	251.23
18	47.5	68.17
16	28.95	36.90
8	59.2	37.17
6	33.6	15.82
2	337.19	52.93
Surface total (M²) (+20%)		1579.28

Après calcul des différents paramètres du dimensionnement, nous obtenons les résultats suivants (résumés sur le tableau IV.5):

Tableau IV.5 Tableau donnant les résultats de calcul spécifique au dimensionnement.

Paramètre	Application	Résultats
Le courant de protection	$I = 20 \times 0.5 \times 1579.28$	16 A
La résistance du câble cathodique	$R_c = \frac{\rho L}{s}$	0.0081Ω
La résistance du câble anodique	$R_a = \frac{\rho L}{s}$	0.08Ω
La résistance d'anode au backfill :	$R_{ab} = \frac{\rho_b}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right)$	0.2218Ω
La résistance du backfill au sol	$R_{b/s} = \frac{\rho_b}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right)$	2.8972Ω
La résistance de déversoir R'	$R' = R_{a/b} + R_{b/s}$ $R' = 2.8972 + 0.2218$	3.1192Ω
La résistance apparente d'une anode R''	$R'' = (0.2218 + 2.8972) \times 1.5$	4.678Ω
La résistance de déversoir	$R_d = \frac{R''}{N} = \frac{4.678}{9}$	0.5198Ω
La masse anodique totale	$Ma = \frac{c \cdot t \cdot i_p}{u \cdot e} = \frac{16 \times 30 \times 0.5}{0.85 \times 0.9}$	313.8 Kg
Le nombre d'anodes « N »	$N = \frac{Ma}{m}$	9
La résistance totale du circuit « Rt »	$R_t = R_c + R_d = 0.5198 + 0.08181$	0.60Ω
La tension du redresseur « U »	$U = R_T \times I = 0.60 \times 16$	9.72 V

Nous obtenons :

- Masse anodique et nombre d'anodes :
 - Masse Anodique = 313.6 kg
 - 9 anodes après arrondissement
- Courant total débité par le Poste de Soutirage :
 - Courant Total = 16 A
 - Courant par Anode = 1.75 A
 - Nombre Total d'Anodes = 9
 - Courant Total = Courant par Anode * Nombre Total d'Anodes = 1.75 A * 9 = 15.75 A (proche de 16 A)
- Profondeur des Anodes :
 - Profondeur = 0.8 m
- Résistance du Déversoir :
 - Doit être inférieure à 1 Ω
- Résistance du Circuit :
 - Doit être inférieure à 2 Ω
- Résultats Obtenus pour la Résistance du Déversoir et du Circuit :
 - Résistance du Déversoir = 0.5198 Ω
 - Résistance du Circuit = 0.60 Ω
- Tension du Redresseur :
 - Tension du Redresseur = 9.72 V
- Transformateur Redresseur de Sortie :
 - Tension de Sortie = 100 V
 - Courant de Sortie = 100 A

Interprétation

- ✓ Pour la résistance du déversoir, on a obtenu 0.5198 Ω , ce qui est inférieur à la limite de 1 Ω , satisfaisant ainsi aux exigences.
- ✓ Pour la résistance du circuit, on a obtenu 0.60 Ω , ce qui est inférieur à la limite de 2 Ω , également satisfaisant.
- ✓ La tension de redresseur est de 9.72 V, ce qui est bas, mais conforme aux besoins.
- ✓ Le transformateur redresseur de sortie est dimensionné pour une tension de sortie de 100 V et un courant de 100 A, ce qui permet d'adapter le système aux variations des exigences.

Les résultats obtenus répondent aux exigences en termes de résistance du déversoir, de résistance du circuit et de tension de redresseur, et le choix du transformateur redresseur de sortie semble approprié pour s'adapter aux variations des exigences du système.

Pour que cette protection soit réalisée correctement il faut suivre le mode opératoire ci-dessous :

- Vérifier que l'anode débite (faire une mesure à vide, souvent, l'anode ne débite pas si elle n'est pas mouillée).
- S'assurer que l'anode et la structure à protéger baignent dans le même électrolyte !
- L'anode doit être posée à une distance de 3 m et de même profondeur que la génératrice inférieure de la canalisation.
- Noyer l'anode dans l'eau avant de la remblayer.
- Procéder à l'isolement total des deux extrémités nues de chaque tronçon posé (L'isolement fera lors de mise en fouille en se servant des calles) afin d'éviter les fuites des courants et dans le but de maintenir le potentiel au-dessus du seuil de protection cathodique.
- Après la mise en fouille du premier tronçon, ce dernier sera protégé par une anode sacrificielle, néanmoins, les prochains tronçons seront alimentés en les shuntant avec le tronçon protégé, et chaque fois qu'il y aura une chute de potentiel à l'extrémité, on procède à un emplacement d'une nouvelle anode Mg.
- Procéder à la mesure du potentiel spontané de chaque tronçon posé avant son alimentation (avant la connexion pipe-anode).
- La protection cathodique de chaque tronçon posé sera après 24 heures de mise en fouille (Mesurer l'intensité de courant et le potentiel) (Voir Le transformateur redresseur d'alimentation).

IV.5.1 Installation des anodes du manifold

Sur la figure IV.3 est représenté le schéma, suggéré après calcul, de l'installation des anodes sur le manifold du Terminal de Bejaïa.

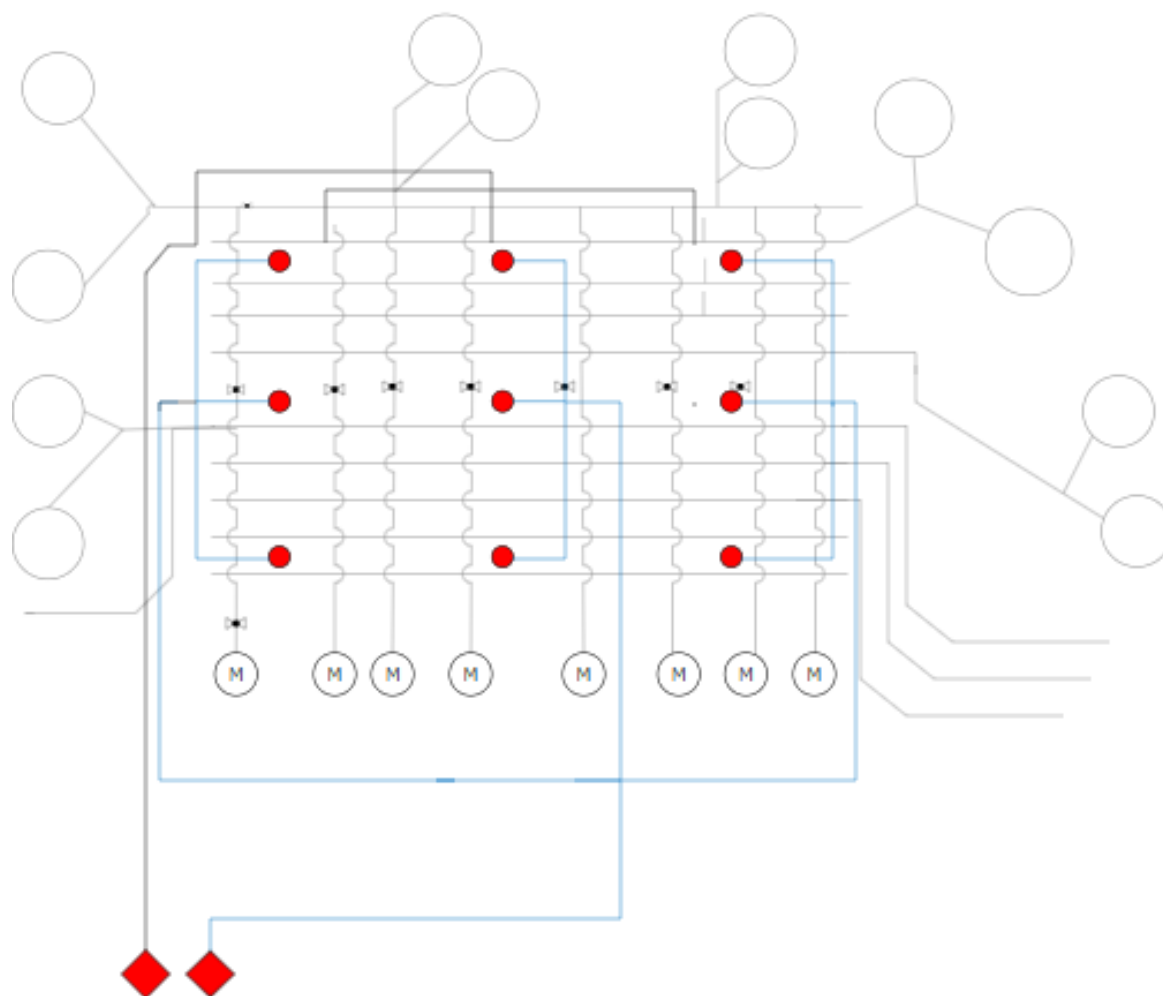


Figure IV.3 Schéma de l'installation de l'anode sur le manifold

IV.5.1.1 Etude économique

Dans le tableau suivant sont énumérés la liste ainsi que le coût du matériel « protection cathodique » utilisé pour la protection externe du manifold :

Tableau IV.6 Tableau du matériel utilisé pour la protection cathodique.

N°	Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	TOTAL
2	Câble 1x50 mm ²	ml	350	2500 DZ	875000 DZ
3	Câble 1x35mm ²	ml	250	1700 DZ	425000 DZ
4	Coffret CAA de 03 entrées	U	1	75000 DZ	75000 DZ
5	Coffret CSC de 03 entrées	U	2	37000 DZ	74000 DZ
6	Prise simple	U	1	1000 DZ	1000 DZ
7	BACFALL	Kg	350	250 DZ	87500 DZ
8	Boite scotch cast	U	3	2500 DZ	7500 DZ
9	Electrode de réf. Fe/Si	U	9	35000DZ	315000 DZ
10	Boite de jonction	u	6	6500 DZ	39000 DZ
				TOTAL	1 863 900 DZ

❖ Ce manifold aura une protection cathodique commune avec l'ouvrage ce terminal arrivé en se servant d'un seul transfo-redresseur de 150V/100A.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre recherche a été orientée sur l'étude de la protection cathodique par courant imposé d'un ouvrage concentré défini par un manifold de 1600 m² de surface. Celui-ci est posé sur multiples niveaux, en sous-sol et en surface, pour permettre de distribuer le pétrole. Notre travail s'est focalisé spécifiquement à l'extérieur des pipe-lines en sous-sol du manifold, tout en profitant de la symétrie du site pour distribuer les anodes sacrificielles et l'installation de poste.

Une partie de ce travail a été consacrée à la description détaillée du phénomène de corrosion du manifold du site considéré et les méthodes appliquées pour gérer ce dernier et minimiser tous dégâts engendrés au cours des années. Après avoir détaillé les caractéristiques du site et lié les informations citées précédemment au cas spécifique du manifold de pétrole, nous nous sommes dirigé vers le dimensionnement d'un poste de soutirage ayant la capacité de protéger avec efficacité le manifold pendant une durée de vie de 30 ans. Les résultats obtenus sont donc dupliqué en six unités afin de pouvoir couvrir le parc tout en entier.

Suite à l'identification des paramètres de design et le choix de l'emplacement des postes et tous les équipements nécessaires au bon fonctionnement du système, il est important de le maintenir en état parfait afin de s'assurer de son efficacité pendant toutes ces années. Pour cela, il est impératif d'effectuer des contrôles et des mesures périodiques, des recommandations que Nous mentionnons dans le dernier chapitre comme un point final qui aide à relier toutes les informations et conclure l'étude.

Annexe A

Rappels sur la corrosion électrolytique : les métaux et électrolytes

La corrosion découle de l'interaction entre deux éléments, à savoir le métal et le milieu corrosif qui sont :

- L'*environnement* qui est un milieu corrosif dès lors qu'il renferme de l'eau. Celle-ci est un milieu complexe avec des quantités d'espèces chimiques dissoutes ou en suspension,
- Les *sols* également, renferment tous une humidité variable,
- ainsi que les *gaz* qui provoquent des condensations d'eau,
- Il s'agit également de la majorité des *milieux industriels liquides*.

La corrosion humide est le résultat d'une réaction électrochimique, où les particules sont échangées, gagnées ou perdues, entre une électrode métallique et un électrolyte qui se neutralisent en contact. Ces réactions, apparaissent au contact d'une phase métallique et d'une phase liquide. Les phases aqueuses, mettent en jeu à la fois les électrons du métal et certains éléments chimiques, neutres ou ionisés, contenus dans la solution (17).

Électrode métallique

Un métal M se compose d'une structure cristalline d'ions positifs Mn^+ dans laquelle des électrons libres circulent. Ce nuage électronique est connu pour être à l'origine de la conductibilité des métaux. Ces électrons se déplacent sous l'action d'un champ électrique, ce qui entraîne une circulation de courant dans le métal (9). Un conducteur métallique se distingue par sa capacité à permettre le passage du courant électrique sans subir de transformation chimique.

Électrolyte

Un électrolyte est un dispositif qui contient des atomes ionisés. Il peut s'agir d'atomes ionisés ou d'ions complexes composés de plusieurs atomes différents. Les atomes qui ont perdu un ou plusieurs électrons sont appelés ions positifs ou cations. Il en va de même pour les atomes métalliques :

H^+ , Na^+ , K^+ sont des cations univalents.

Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cu^{+2} (ion ferreux), sont des cations divalents.

Al^{3+} , Fe^{3+} (ion ferrique), sont des cations trivalents.

Les ions négatifs ou anions proviennent d'atomes qui ont gagné un ou plusieurs électrons. C'est en général le cas des métalloïdes :

Br^- , Cl^- (l'ion chlore), sont univalents ;

S^{2-} , sont divalents ;

Les ions complexes pourvus d'une charge positive ou négative ion oxhydre OH^- , HCO_3^- - ion sulfate SO_4^{2-} ion peroxosulfate $S_2O_8^{2-}$ ion ferrique FeO^{++} , $Fe(OH)_2^+$, NH_4^+

S'il n'y a pas de cas d'électrolytes fondus, ces particules ionisées de l'électrolyte sont en plus ou moins grande quantité dissoutes dans un solvant.

Le solvant ionisant est un solvant très dissociant. Ce solvant n'est pas inerte car la Par action électrostatique, la molécule d'eau peut se combiner avec des particules du soluté afin de créer des ions hydratés (ions solvates) (17).

Dans le cas de l'électrolyte, la conduction sous l'influence d'un champ électrique est causée par le mouvement des ions. Dans le sens du champ, les cations (ions $+$) se déplacent vers la cathode. L'anode est attirée par les anions (ions $-$). Lorsque la concentration en espèces ionisées est élevée, la conductibilité électrique de l'électrolyte sera améliorée.

Le conducteur électrolytique se distingue par sa capacité à se décomposer lorsque le courant électrique traverse. Les électrodes qui apportent le courant dans l'électrolyte sont le siège de réactions d'oxydoréduction ou de phénomènes d'électrolyse.

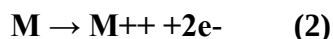
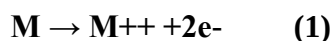
Dans le cas de l'électrolyte, la conduction sous l'influence d'un champ électrique est causée par le mouvement des ions. Dans le sens du champ, les cations (ions $+$) se déplacent vers la cathode. L'anode est attirée par les anions (ions $-$). De plus, lorsque la concentration en espèces ionisées est élevée, la conductibilité électrique de l'électrolyte sera améliorée. Le conducteur électrolytique se distingue par sa capacité à se décomposer lorsque le courant électrique traverse. Les électrodes qui apportent le courant dans l'électrolyte sont le siège de réactions d'oxydoréduction ou de phénomènes d'électrolyse (7).

Processus électrochimiques de la corrosion

➤ Equilibre d'un métal dans une solution

Couche double à interface métal-solution :

Un métal plongé dans un électrolyte ionisant inerte. Les ions présents dans le réseau métallique ont tendance à se dissoudre et à renvoyer une charge négative au métal par ses électrons. Quand la charge des électrons est opposée à celle des ions doux, un équilibre réversible se crée alors entre le métal, ses ions et ses électrons. Les réactions (1 et 2) se produisent en même temps.



Ce phénomène se traduit par la création à l'interface métal/solution d'une double couche électrochimique responsable de l'existence d'un potentiel du métal dans l'électrolyte.

➤ **Potentiel du métal dans la solution**

Si le métal est immergé dans une solution normale d'un de ses ions, ce potentiel peut être calculé par les lois de la thermodynamique. Ce potentiel est défini pour un métal spécifique et permet de classer les métaux en fonction de leur valeur, capacité à se purifier. L'échelle de Nernst (Figure A.2) permet ainsi le classement des métaux du point de vue de leur noblesse.

Un métal noble s'ionise peu, parce qu'il existe des forces de cohésion importantes entre les atomes, plus son potentiel est élevé, plus le métal considéré est noble, à l'inverse d'un métal classé vil, de potentiel plus faible. L'or, le platine, dont les potentiels normaux d'oxydoréduction sont les plus élevés, sont très nobles, donc peu ionisables et peu corrodables. Le cuivre est plus noble que le fer, son potentiel étant plus élevé que celui du fer (9) (19) (8).

	Reduction Half-Reaction	E° (V)	
 Stronger oxidizing agent	$F_2(g) + 2 e^- \longrightarrow 2 F^-(aq)$	2.87	 Weaker reducing agent
	$H_2O_2(aq) + 2 H^+(aq) + 2 e^- \longrightarrow 2 H_2O(l)$	1.78	
	$MnO_4^-(aq) + 8 H^+(aq) + 5 e^- \longrightarrow Mn^{2+}(aq) + 4 H_2O(l)$	1.51	
	$Cl_2(g) + 2 e^- \longrightarrow 2 Cl^-(aq)$	1.36	
	$Cr_2O_7^{2-}(aq) + 14 H^+(aq) + 6 e^- \longrightarrow 2 Cr^{3+}(aq) + 7 H_2O(l)$	1.33	
	$O_2(g) + 4 H^+(aq) + 4 e^- \longrightarrow 2 H_2O(l)$	1.23	
	$Br_2(l) + 2 e^- \longrightarrow 2 Br^-(aq)$	1.09	
	$Ag^+(aq) + e^- \longrightarrow Ag(s)$	0.80	
	$Fe^{3+}(aq) + e^- \longrightarrow Fe^{2+}(aq)$	0.77	
	$O_2(g) + 2 H^+(aq) + 2 e^- \longrightarrow H_2O_2(aq)$	0.70	
	$I_2(s) + 2 e^- \longrightarrow 2 I^-(aq)$	0.54	
	$O_2(g) + 2 H_2O(l) + 4 e^- \longrightarrow 4 OH^-(aq)$	0.40	
	$Cu^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Cu(s)$	0.34	
	$Sn^{4+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Sn^{2+}(aq)$	0.15	
	$2 H^+(aq) + 2 e^- \longrightarrow H_2(g)$	0	
 Weaker oxidizing	$Pb^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Pb(s)$	-0.13	 Stronger reducing
	$Ni^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Ni(s)$	-0.26	
	$Cd^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Cd(s)$	-0.40	
	$Fe^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Fe(s)$	-0.45	
	$Zn^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Zn(s)$	-0.76	
	$2 H_2O(l) + 2 e^- \longrightarrow H_2(g) + 2 OH^-(aq)$	-0.83	
	$Al^{3+}(aq) + 3 e^- \longrightarrow Al(s)$	-1.66	
	$Mg^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Mg(s)$	-2.37	
	$Na^+(aq) + e^- \longrightarrow Na(s)$	-2.71	

Figure A.1 Échelle de NERNST

Equilibre d'un métal dans une solution

➤ Destruction de l'équilibre par réaction du milieu

Tout système chimique présent dans l'électrolyte qui peut fixer les électrons du métal au contact de l'électrode métallique (comme les oxydants de la solution) entraînera une oxydation du métal. Les oxydants de la solution sont réduits (gain d'électrons).

Le métal, qui est dit réducteur, est lui oxydé (perte d'électrons), c'est le cas, par exemple de :

- L'ion hydrogène en milieu acide : $2 H^+ + 2 e^- \longrightarrow H_2$
- L'oxygène en milieu acide : $O_2 + 4 H^+ + 4 e^- \longrightarrow 2 H_2O$
- L'oxygène en milieu basique : $O_2 + 2 H_2O + 4 e^- \longrightarrow 4 OH^-$
- Ion métallique contenu
- La solution qui peut être réduite : $M^{m+} + \text{électron} \longrightarrow M^{n+}$ avec $m > n$

Corrosion métallique du fer dans une eau neutre aérée.

➤ **Rupture de l'équilibre d'un métal dans une solution par couplage électrique (ou galvanique)**

Métaux en équilibre dans la solution

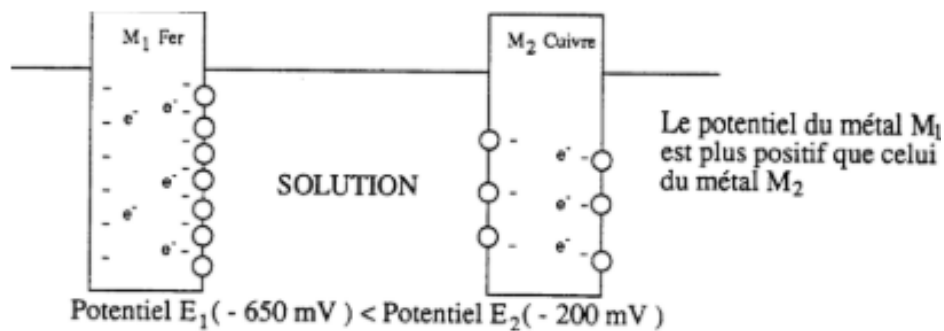


Figure A.2 Métaux en équilibre dans la solution (7)

Rupture de l'équilibre par couplage galvanique

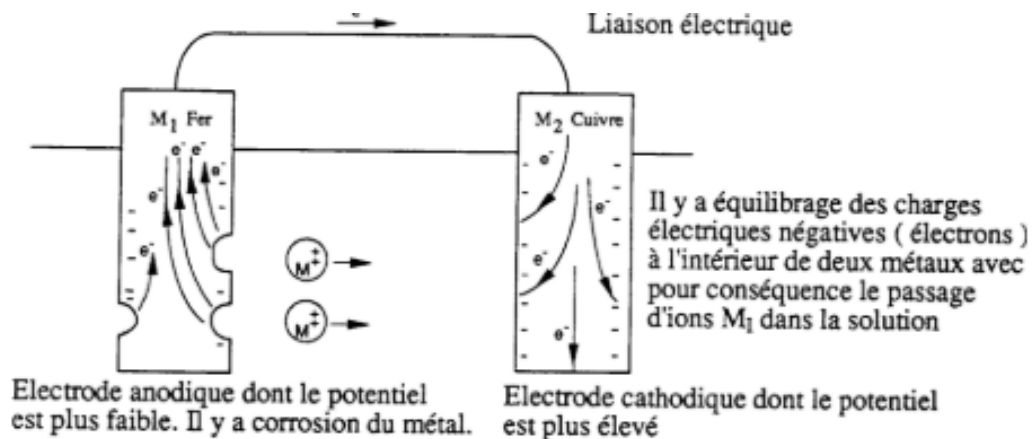


Figure A.3 Rupture de l'équilibre par couplage galvanique (9)

➤ **Rupture de l'équilibre par couplage galvanique**

Tout système chimique présent dans l'électrolyte qui peut fixer les électrons du métal au contact de l'électrode métallique (comme les oxydants de la solution) entraînera une oxydation du métal.

Lorsque l'équilibre est rompu à l'anode M1, de la matière métallique (M^{++}) est introduite en solution. Il existe une corrosion. L'anode est la partie de l'électrode sur laquelle une réaction d'oxydation se produit. L'anode est susceptible de se dissoudre. La cathode M2, l'afflux des électrons permet à l'équilibre de se renforcer, des réactions cathodiques se développent à l'interface métal/solution. La cathode est la partie de l'électrode sur laquelle une réaction de réduction se produit (11).

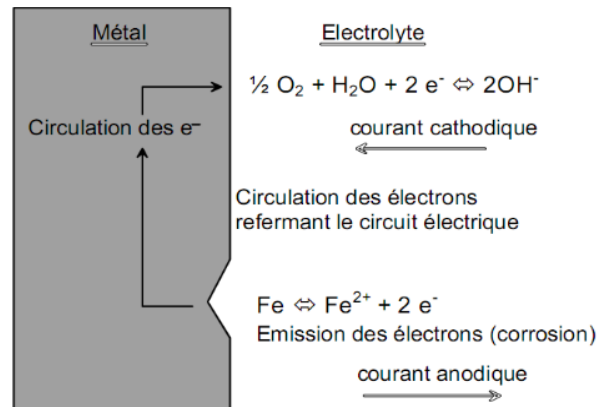


Figure A.4 Couplage galvanique (9)

Dégradation quantitative (loi de FARADAY)

Les réactions d'oxydoréduction suivent les lois quantitatives de l'électrolyse. La masse de métal déposé sur une cathode, ou la masse de métal consommé à l'anode est proportionnelle à la quantité de courant traversant les électrodes et à la masse atomique M du métal, et inversement proportionnelle à sa valence n (Loi de Faraday) (2)

$$m = \frac{1}{96500} * \frac{Mg}{n} * I * t$$

Annexe B

Rappel des différents types de corrosion

La corrosion biochimique

Les conduites métalliques peuvent être corrodées par certaines bactéries, notamment les canalisations enterrées. Le développement des bactéries se produit sous les dépôts, sous les produits de corrosion et dans des zones de conduite peu aérées. On peut en déduire les trois mécanismes de la corrosion biochimique à partir de cela :- La corrosion chimique se produit lorsque des substances corrosives comme le CO_2 , H_2S , H_2SO_4 , NH_3 ou un acide organique se produisent, ce qui crée un acide sulfurique qui attaque le métal des canalisations enterrées. Les bactéries sulfato-réductrices réduisent les sulfates en utilisant de l'hydrogène provenant des régions cathodiques, ce qui entraîne une formation accélérée de Fe^{2+} aux anodes.- Création de marques sur le métal où se trouvent les dépôts causés par l'attaque des bactéries, en raison de la corrosion provoquée par le processus. La différence de concentration en oxygène (6).

La corrosion interne

Les canalisations peuvent subir des effets de corrosion internes de nature électrochimique, ce qui requiert la présence ou la création d'un milieu aqueux capable de favoriser des réactions électrochimiques sur les parois de la canalisation. La formation d'un milieu aqueux en paroi peut déterminer si une corrosion est possible ou non, étant donné que si une corrosion existante est déjà présente, elle peut être évolutive.

Mais lorsqu'il y a des composés corrosifs dans le gaz, comme du sulfure d'hydrogène, le risque principal est la corrosion interne des parois des tubes (7).

La corrosion externe

En contact direct avec l'air, un métal ou un alliage est soumis à une corrosion dont le degré est défini par l'humidité de l'air. Différents types de corrosion sont identifiés (rural, urbain, industriel, marin) en fonction du taux de corrosivité qui varie en fonction du milieu. Parmi les contaminants atmosphériques on a : les oxydes de soufre, le sulfure d'hydrogène, les composés de l'azote, les particules salines, les chlorures, et d'autres particules comme le charbon et la silice.

Il est à noter que le taux de corrosion est proportionnel au taux de pollution atmosphérique, et que la corrosion est plus importante durant l'hiver malgré les basses températures (20).

La corrosion biochimique

Les conduites métalliques peuvent être corrodées par certaines bactéries, notamment les canalisations enterrées. Le développement des bactéries se produit sous les dépôts, sous les produits de corrosion et dans des zones de conduite peu aérées. Les bactéries sulfato-réductrices réduisent les sulfates en utilisant de l'hydrogène provenant des régions cathodiques, ce qui entraîne une formation accélérée de Fe^{2+} aux anodes. Il s'ensuit la création de marques sur le métal où se trouvent les dépôts causés par l'attaque des bactéries, en raison de la corrosion provoquée par le processus (6).



Figure B.1 La corrosion biochimique

La corrosion chimique (sèche)

La corrosion chimique, parfois appelée corrosion sèche, est un processus d'altération des métaux causé par des réactions chimiques avec des gaz ou des substances organiques, sans la présence de conductivité ionique (3). Elle se produit généralement en présence de gaz corrosifs tels que l'hydrogène, le sulfure d'hydrogène, le monoxyde de carbone ou des substances organiques. Contrairement à la corrosion électrochimique qui se produit dans des environnements conducteurs d'électricité, la corrosion chimique affecte la surface du matériau corrosif en contact direct avec l'agent corrosif. Cette forme de corrosion peut également toucher

des matériaux non métalliques tels que le béton, les plastiques, le bois et la céramique, en fonction de l'environnement et des interactions chimiques impliquées (4; 5).

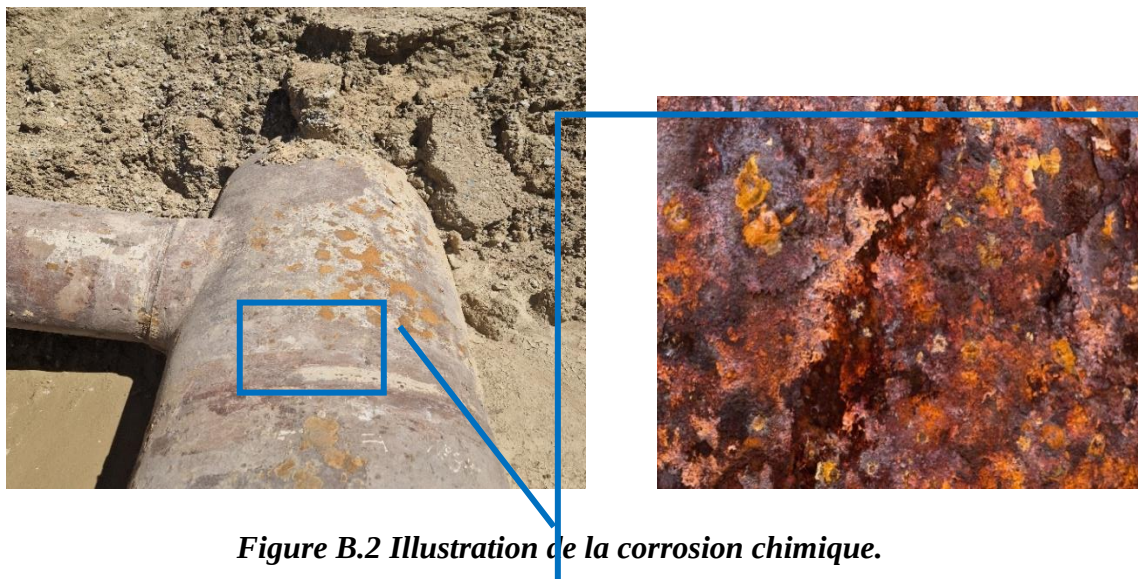
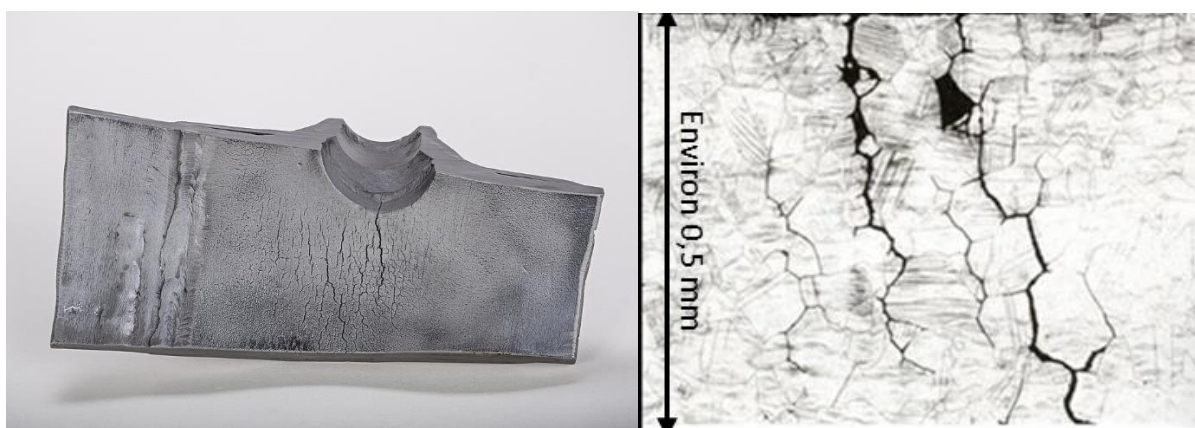


Figure B.2 Illustration de la corrosion chimique.

La corrosion sous contrainte

La corrosion sous contrainte (CSC) est un phénomène complexe qui se produit lorsqu'un matériau est soumis à une contrainte mécanique et à un environnement corrosif. Elle est caractérisée par l'apparition de fissures dont la propagation est perpendiculaire à la contrainte. Ce phénomène peut avoir des conséquences graves, où la CSC peut entraîner des fissures dans les tuyauteries, compromettant ainsi la sécurité des installations. La CSC est un problème sérieux qui nécessite une compréhension approfondie des mécanismes impliqués et des mesures de prévention adéquates pour assurer la fiabilité des structures métalliques soumises à des contraintes mécaniques et à des environnements corrosifs (20).



*Figure B.3 La corrosion sous contrainte***Corrosion par érosion-cavitation**

La corrosion par érosion-cavitation est un phénomène complexe qui se produit lorsqu'un fluide s'écoule à grande vitesse sur une surface métallique, entraînant la formation de bulles de gaz qui implosent et endommagent progressivement le matériau. Ce phénomène affecte de nombreux équipements industriels tels que les pompes, les turbines, les vannes, les tuyères, etc. soumis à des écoulements à haute vitesse. L'implosion répétée des bulles de cavitation crée des ondes de pression qui provoquent des dommages localisés sur la surface métallique, pouvant aller jusqu'à la perforation complète dans des cas extrêmes. Plusieurs facteurs aggravent l'érosion par cavitation, comme la présence de particules solides dans le fluide, les vibrations mécaniques, et les conditions thermiques sévères (21).

*Figure B.4 Corrosion par érosion-cavitation***La corrosion par courants vagabonds**

La corrosion par courants vagabonds est un phénomène complexe qui se produit lorsqu'un courant électrique vagabond traverse un matériau métallique, entraînant une réaction électrochimique qui peut causer des dommages à la structure. Les courants vagabonds peuvent provenir de diverses sources, notamment des réseaux électriques, des systèmes de traction, des équipements industriels (9).

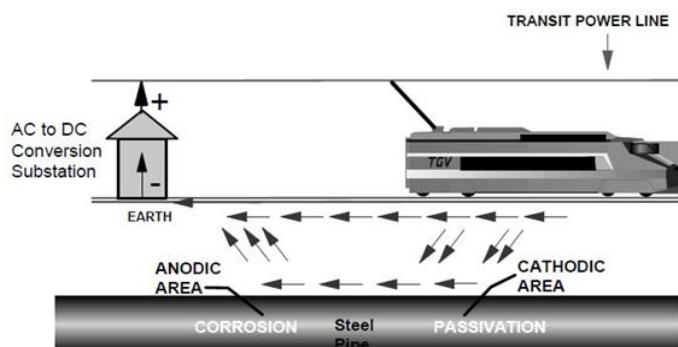


Figure B.5 La corrosion par courants vagabonds

La corrosion par courants vagabonds est un problème sérieux qui peut affecter de nombreux types de structures métalliques, notamment les canalisations, les câbles, les équipements de protection cathodique. Les dégâts causés par cette forme de corrosion peuvent être importants et peuvent même entraîner des accidents graves si les mesures de prévention et de protection appropriées ne sont pas mises en place. Les facteurs qui influencent la corrosion par courants vagabonds incluent la présence d'humidité, la nature du matériau, la direction du courant, etc.. La prévention de cette forme de corrosion nécessite une bonne compréhension des mécanismes impliqués et l'application de mesures de protection appropriées, telles que l'isolation électrique, la mise à la terre, la protection cathodique.

Références bibliographiques

1. **Zendaoui.** *partie 1 corrosion et protection des canalisations: Gas Refining.* 2009.
2. **H.Uhlig.** . *Corrosion et protection, H.Uhlig, édition Dunod Paris, 1970.* Paris : édition Dunod Paris, 1970.
3. **BIANCHETTI, RONALD L.** *PEABODY'S CONTROL OF PIPELINE CORROSION.* 2001.
4. **BENSABRA, Dr. Hakim.** *Cours de Corrosion et Protection des Matériaux.* 2015.
5. **Thamazgha, AMOUCI.** *DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME DE PROTECTION cathodique .* boumerdes . 2019.
6. **Samiha, Boudierba.** *Dimensionnement de poste de protection cathodique PPC21.* 2016.
7. **Latifa, HAMADI.** *Étude comparative de la corrosion localisée d'un acier ordinaire et.* 2013/2014.
8. **Bensaada.** [biskra.dz/enseignant/bensaada/corrosion.pdf](https://www.univbiskra.dz/enseignant/bensaada/corrosion.pdf). <https://www.univbiskra.dz/enseignant/bensaada/corrosion.pdf>. [En ligne]
9. **Harris, J.O.** *J.O. Harris. Corrosion 16, 1960. 1960.*
10. **Barlo, T.J. W.E. Berry.** *Materials Performance 23, 9, 1984. 1984.*
14. **A, SOOM.** *Etude mécanique de l'usure : modélisation par Eléments Discrets.* 2004.
18. **Landolt, Diter.** *Corrosion et chimie de surface des métaux, Diter Landolt, édition presses polytechniques.* 2003.
19. **Zendaoui, Mme H.** *partie 2 corrosion et protection des canalisations: Gas Refining .* 2009.
20. **Khechkhouch. Khechkhouch Abdeslam .** *Rapport de Stage HSE* 2013.
23. *Séminaire sur la protection cathodique édition I.A.P formation industrie, Avril 2007.*
- 15 <https://www.universalis.fr/encyclopedie/physico-chimie-des-hautes-temperatures/4-stabilite-et-reactivite-des-solides/>)

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/physico-chimie-des-hautes-temperatures/4-stabilite-et-reactivite-des-solides/>)

[4] *<https://www.inrs.fr/dms/inrs/CataloguePapier/ED/TI-ED-4261/ed4261.pdf>*. [En ligne]

11.*<http://maelenn.aufray.free.fr/cours/fascicule-cours-adhesion-site-web.pdf>*.

***<http://maelenn.aufray.free.fr/cours/fascicule-cours-adhesion-site-web.pdf>*. [En ligne]**

12.*<https://www.linseis.com/fr/votre-industrie/applications/stabilite-a-la-chaueur-et-a-loxydation/>*. [En ligne]