

# **Remerciement**

***ALHAMDOU LIL ALLAH*** , d'abord et avant tout, qui nous a permis d'atteindre ce rang élevé et de surmonter toutes les difficultés pour l'atteindre.

*Et nous voudrions remercier, avec tout amour et gratitude, tous ceux qui ont contribué à faire une lettre de notre mémoire :*

*Tout d'abord et toujours nous remercions sincèrement nous en cadreur de ce mémoire Mme Meckken. K. A pour ses efforts, ses conseils continus et ses sages directrices, grâce auxquels, après ALLAH, nous avons pu accomplir ce travail ;*

*Nous remercions les membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail.*

*Un hommage particulier À Mme Habbar Chafika tout d'abord pour tout ce qu'elle nous a apporté durant notre formation.*

*À tous les employés de Hassi R'mel pour nous avoir fourni cette quantité d'informations qui nous ont permis de rédiger ce mémoire ;*

*À tous les enseignants de l'MSI et en particulier les enseignants du département hygiène et sécurité industrielle et à tous les travailleurs de l'institut de maintenance et sécurités industriel.*

*À tous nos collègues, tous nos amis et tous ceux avec qui nous avons eu un moment ou une minute pendant cette période ;*

*Enfin, nous remercions nos parents, nos sœurs et nos frères, pour nous avoir soutenus depuis le début de nos études.*

*Merci à tout le monde ....*

*“Le besoin de sécurité asphyxie l'âme.”*

*De Alexandre Jardin / Le Zubial*

# ***Dédicace***

Nous dédier ce modeste travail :

**À nos chers parents ;**

**À nos chers frères et sœurs ;**

**Et**

**À tous ceux qui sont dans le cœur.**

# Table des matières

<b>Remerciement</b> .....	i
<b>Dédicace</b> .....	iii
<b>Table des matières</b> .....	iv
I.1. Définition de la corrosion : .....	4
I.2. Aspect économique de la corrosion : .....	4
I.3. Processus de la corrosion :.....	5
I.4. Réaction de corrosion : .....	5
I.5. Différentes modes de corrosion :.....	6
I.5.1. Corrosion chimique : .....	6
I.5.2. Corrosion électrochimique :.....	7
I.5.3. Corrosion bactérienne (La corrosion biologique ou biochimique) :.....	7
I.5.4. Corrosion en présence d'une sollicitation mécanique : .....	8
I.6. Des Différentes types de corrosion : .....	8
I.6.1. Corrosion uniforme ou généralisée : .....	8
I.6.2. Corrosion localisée : .....	8
I.6.2.1. Corrosion galvanique :.....	9
I.6.2.2. Corrosion par piqûres : .....	10
I.6.2.3. Corrosion inter-granulaire :.....	11
I.6.2.5. Corrosion caverneuse (par crevasse) :.....	11
I.6.2.6. Fragilisation par l'hydrogène : .....	12
I.6.2.7. Corrosion sélective : .....	12
I.6.2.8. Corrosion érosion /abrasion/cavitation : .....	13
I.7. Facteurs de corrosion : .....	13
I.8.Aspects thermodynamiques de la corrosion : .....	13
I.9.Aspects cinétiques de la corrosion (Méthodes d'estimation de la vitesse de Corrosion des métaux) : .....	14
I.9.1.Méthodes classiques : zaabar .....	15
I.9.1.1.Mesure de perte de masse (gravimétrie) : .....	15
I.9.1.2.Dosages de la concentration de cations en solution :.....	15
I.9.1.3.Exploitation de la réaction de réduction : .....	15
I.9.1.4.Mesure de perte d'épaisseur : .....	16
I.9.2. Méthodes électrochimiques : .....	16
I.9.2.1. Méthodes stationnaires (srisuwan) : .....	16
I.9.2.2. Méthodes transitoires (non-stationnaires) : .....	16

<b>I.10.Méthodes de lutte contre la corrosion :</b>	<b>16</b>
<b>I.10.1.Protection électrochimique :</b>	<b>17</b>
<b>I.10.1.1.Protection cathodique :</b>	<b>17</b>
<b>I.10.1.2. Protection anodique :</b>	<b>18</b>
<b>I.10.2.Protection par revêtements :</b>	<b>18</b>
<b>I.10.2.1.Protection par revêtements non métalliques :</b>	<b>18</b>
<b>I.10.2.2. Protection par revêtements métalliques :</b>	<b>19</b>
<b>I.10.3. Protection par inhibiteurs :</b>	<b>19</b>
<b>I.10.3.1.Inhibiteurs cathodiques :</b>	<b>19</b>
<b>I.10.3.2.Inhibiteurs anodiques :</b>	<b>20</b>
<b>I.10.3.3.Inhibiteurs amines filmants (inhibiteurs organiques) :</b>	<b>20</b>
<b>I.10.3.4.absorbeurs d'oxygène (Réducteurs d'oxygène):</b>	<b>20</b>
<b>II.1.Introduction :</b>	<b>23</b>
<b>II.2. Prévention par une forme adaptée (LA GEOMETRIE) des pièces :</b>	<b>23</b>
<b>II.2.1. Corrosion en zone humide :</b>	<b>23</b>
<b>II.2.2. Corrosion sous contrainte :</b>	<b>23</b>
<b>II.2.4. Corrosion-érosion/cavitation :</b>	<b>24</b>
<b>II.2.5. Corrosion caverneuse :</b>	<b>25</b>
<b>II.3. Prévention par le choix du matériau :</b>	<b>25</b>
<b>II.3.1. Résistance des alliages et domaines d'emploi :</b>	<b>26</b>
<b>II.3.1.1.Les aciers inoxydables:</b>	<b>26</b>
<b>II.3.1.2.Les alliages de nickel:</b>	<b>26</b>
<b>II.3.1.3.Les alliages de cuivre:</b>	<b>26</b>
<b>II.3.1.4.Les alliages d'aluminium:</b>	<b>27</b>
<b>II.3.1.5.Le titane :</b>	<b>27</b>
<b>II.3.1.6.Les alliages de zirconium :</b>	<b>27</b>
<b>III.1.Introduction :</b>	<b>29</b>
<b>III.3.2.La corrosion des installations enterrées :</b>	<b>34</b>
<b>III.5.2.2.Contrôle de la protection cathodique :</b>	<b>40</b>
<b>Conclusion :</b>	<b>42</b>
<b>Références bibliographiques :</b>	<b>44</b>

## Liste de figures

<i>Figure</i>	<i>Page</i>
Figure 1 : La pile de Volta : le zinc à l'anode est consommé en libérant des électrons qui alimentent le circuit électrique.....	7
Figure 2 : Schéma présentant la corrosion dans des conditions anaérobies provoquées par des bactéries du genre <i>Desulfovibrio</i> .....	7
Figure 3 : <i>Corrosion</i> uniforme et corrosion localisée d'un métal.....	8
Figure 4 : Une vieille vis corrodée par le temps.....	9
Figure 5 : <i>Corrosion</i> par piqûres sur la paroi d'une cuve en acier inoxydable austénitique Cr18-Ni10.....	10
Figure 6 : <i>Corrosion</i> feuilletante d'une canalisation en alliage d'aluminium véhiculant de l'eau.....	11
Figure 7 : la corrosion sous contrainte.....	11
Figure 8 : Corrosion caverneuse d'un acier allié sous un joint.....	11
Figure 9 : <i>fragilisation</i> par l'hydrogene de l'acier inoxydable austeno - ferritique z2cnd2205.....	12
Figure 10 : Le diagramme potentiel-pH du fer établi pour cette concentration.....	14
Figure 11 : application de la protection cathodique par anodes galvaniques sur une cuve GPL.....	18
Figure 12 : Prévention par la forme du récipient. (a) : mauvais. (b) : correct. ....	23
Figure 13 : Réduction des contraintes locales dans une tête de vis.....	24
Figure 14 : Protection contre la corrosion galvanique :(a) isolation électrique, (b) : pièce sacrificielle.....	24
Figure 15 : Diminution des risques de corrosion-érosion et de corrosion-cavitation.....	24
Figure 16 : érosion - corrosion due à des turbulences produites par les cordons de soudure.....	24
Figure 17 : Soudure continue bord à bord préférée aux assemblages rivetés ou boulonnés.....	25
Figure 18 : Représentation la Situation géographique du champ gazier de Hassi-R'mel.....	29
Figure 19 : L'ensemble des installations gazières implantées sur le champ de Hassi-R'mel.....	31
Figure 20 : Percement de manchette de transport.....	34
Figure 21 : Percement du cordon soudure du té de gare.....	34
Figure 22 : Percement d'une Percement d'une conduite enterrée (vue externe).....	34
Figure 23 : Percement d'une Percement d'une conduite enterrée (vue interne).....	34
Figure 24 : Le contrôle visuel des conduites corrodées.....	35
Figure 25 : Le contrôle visuel par la méthode endoscopie.....	35
Figure 26 : la mesure d'épaisseur par l'appareil ultrason.....	36
Figure 27 : les produits de Contrôle par ressuage.....	36

<b>Figure 28 : Présentation de l'inhibiteur CHOMPION CK981DZ et CHIMEC 1038.....</b>	<b>37</b>
<b>Figure 29 : Point d'injection de l'inhibiteur de corrosion au niveau du puits.....</b>	<b>38</b>
<b>Figure 30 : Pompe doseuse responsable à injecter l'inhibiteur de corrosion.....</b>	<b>38</b>
<b>Figure 31 : Poste du Soutirage.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure 32 : Equipements de protection cathodique à courant imposé.....</b>	<b>40</b>
<b>Figure 33 : Mesure du potentiel d'une conduite enterrée à l'aide d'un multimètre.....</b>	<b>40</b>

### Liste des tableaux

---

Tableaux	page
<b>Tableau 1 : La tenue de corrosion uniforme par selon le Taux de corrosion.....</b>	<b>8</b>
<b>Tableau 2 : les facteurs de corrosion.....</b>	<b>13</b>
<b>Tableau 3 : La résistance intrinsèque à la corrosion de quelques métaux purs dans les différents milieux.....</b>	<b>26</b>
<b>Tableau 4 : Différents secteurs de HR .....</b>	<b>32</b>

### Liste des abréviations

---

#### *Abréviation/Signification*

<i>ISO</i> /International Organization for Standardization
<i>NACE</i> /National Association of Corrosion Engineers
<i>PNB</i> /Produit National Brut
<i>US</i> /United States
<i>GPL</i> /Gaz de Pétrole Liquéfié
<i>SIE</i> /Spectroscopie d'Impédance Electrochimique
<i>f-e-m</i> /Force Electromotrice
<i>PH</i> /Potentiel d'Hydrogène
<i>OSI</i> /On Stream Inspection
<i>SDM</i> /Shut Down Maintenance
<i>BSDM</i> /Break Shut Maintenance
<i>HR</i> /Hassi R'mel

# **Introduction générale**



## **Introduction générale :**

Le métal est la base de l'industrie, il n'y a donc aucune industrie qui puisse se passer du métal. Les matériels considérés comme les membres qui un usine, ils sont majoritairement composés de minéraux, et afin d'assurer la sécurité de l'usine, la continuité de son fonctionnement et sa productivité, nous devons assurer la sécurité de ses membres, les matériels. Mais il existe un phénomène qui menace l'intégrité de ces matériels et contribue à leur détérioration, c'est la corrosion.

La corrosion en général est une perte et dégradation des métaux, de fiabilité et de sécurité, voire de coût ; elle peut engendrer des dommages et des catastrophes graves environnementales, de sécurité et à la santé. La corrosion est un problème mondial, qui vient naturellement, quand ses conditions se présentent.

Dans notre travail ça, nous commençons d'abord au premier chapitre de titre "Etat de l'art sur la corrosion", de présenter et expliquer le phénomène de corrosion des métaux et des matériels de façon large et générale, la définition, les modes de corrosion, les types, les facteurs et les méthodes de lutte, de protection et de prévention utilisés.

Au deuxième chapitre nous précisons la parole sur les méthodes de prévention habituellement utilisées, la prévention par le choix judicieux des matériaux et par une forme adaptée des pièces.

Enfin, au dernier chapitre nous prenons le cas des installations de SONATRACH Hassi R'mel comme un exemple de notre projet. Nous utilisons les informations qui nous les rangées de plusieurs sources à l'intérieur et l'extérieur de l'usine pour réaliser cet objectif.



# **Chapitre I :**

# **Etat de l'art sur la**

# **corrosion**

### **I.1. Définition de la corrosion :**

La corrosion, dans le dictionnaire français Larousse « bas latin *corrosio, -onis*, action de ronger », Il s'agit d'une « dégradation d'un matériau sous l'action du milieu ambiant et par un processus autre que mécanique ».

Dans le standard ISO 8044:2015 (Corrosion des métaux et alliages — Termes principaux et définitions) la corrosion a définie comme « interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et pouvant conduire à une dégradation significative de la fonction du métal, du milieu environnant ou du système technique dont ils font partie ».

Donc La corrosion c'est une destruction, détérioration ou dégradation non voulue des métaux et ses propriétés par le milieu ambiant de façon d'une réaction chimique ou électrochimique d'oxydo-réduction irréversible inter faciale qui implique :

- Une consommation des matériaux
- Une dissolution dans les produits de corrosion solides, des composantes de l'environnement corrosif.
- Une dissolution dans l'environnement corrosif des produits de corrosion solubles

### **I.2. Aspect économique de la corrosion :**

D'Après NACE (National Association of Corrosion Engineers), le coût mondial de la corrosion est estimé à 2,5 billions de dollars américains, ce qui équivaut à 3,4% du produit intérieur brut mondial (2013) environ 5% du PNB dans les pays industrialisés ; cette année (2020) selon la dernière étude de la NACE le coût annuel de la corrosion au niveau mondial est de 2.5Trillions US \$.

En utilisant les pratiques de contrôle de la corrosion disponibles, on estime que des économies de 15 à 35% de l'érosion côtière pourraient être réalisées.

La corrosion entraîne des pertes économiques très importantes et difficiles à évaluer, On distingue :

- les pertes directes : facilement évaluables ; dépenses dues à la détérioration du matériel et à son remplacement.
- les pertes indirectes : plus difficilement évaluables ; comme :

- pertes d'exploitation conséquentes aux arrêts d'installations pour réparation ;
- pertes de production ;
- accidents et augmentation des coefficients de sécurité ;
- lutte contre la corrosion (revêtements, traitements de surfaces, protection cathodique, ..) ;
- surdimensionnement des pièces qui entraîne des surcoûts de fabrication des structures ;
- coût dû à l'utilisation de matériaux plus nobles ;
- contamination du produit par les produits de corrosion soluble ;
- influence dans le choix d'un matériau : résulte d'un compromis entre plusieurs facteurs :
  - ❖ compromis entre la résistance à la corrosion et d'autres propriétés comme la résistance mécanique, la facilité de mise en œuvre, le soudage,
  - ❖ compromis entre la durée de vie de l'équipement et la durée de vie estimée du matériau.

C'est ce qui a mis l'importance de faire une étude de corrosion ; pour situer des mesures qu'elles réduisent la corrosion coûtent plus que l'équipement protégé.

### **I.3. Processus de la corrosion :**

Suivant la nature du milieu environnant et de la température la distinction peut être faite entre deux processus :

- La corrosion en milieu humide ou corrosion aqueuse : le milieu est constitué par un liquide ou par des vapeurs humides (généralement électrolytiques) et la température est modérée ;
- La corrosion en milieu sèche : généralement aux hautes températures (plus de 200°C) ; il est constitué par des vapeurs et/ou des gaz au-dessus de leur point de rosée.

NOTE : la corrosion dite corrosion bactérienne est un cas particulière ; elle survient de l'intervention de quelques organismes vivants de différentes espèces.

### **I.4. Réaction de corrosion :**

Tous les cas de corrosion peuvent être expliqués à partir de concepts électrochimique même si au premier abord ils apparaissent comme ayant un caractère chimique ; la réaction qu'elle décrit ce concept est une réaction d'oxydoréduction irréversible entre le métal et un agent oxydant contenu dans l'environnement :



Se compose de deux réactions partielles :

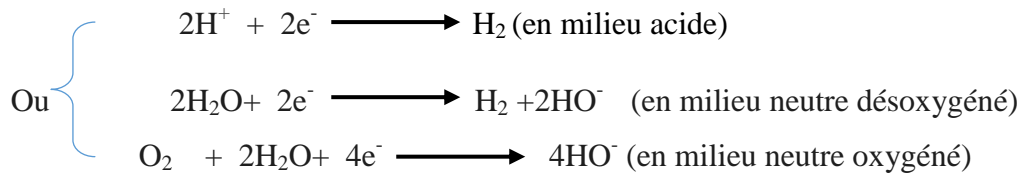
➤ Réaction partielle d'oxydation (anodique) :



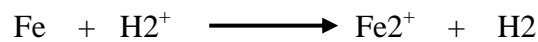
Ex :



➤ Réaction partielle de réduction (cathodique) :



Donc la réaction globale est :



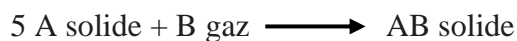
Remarque :

- ✓ un milieu oxygéné est un milieu aérobie, un milieu désoxygéné est un milieu anaérobie. On note O<sub>2</sub>(d), le dioxygène dissous.
- ✓ Quand l'oxydant est le dioxygène de l'air, la corrosion du métal se fait sans dégagement d'hydrogène.

## **I.5. Différentes modes de corrosion :**

### **I.5.1. Corrosion chimique :**

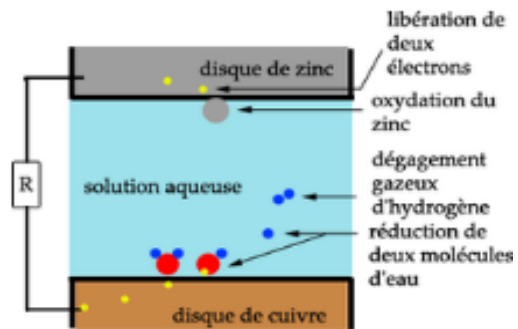
La corrosion chimique est le résultat d'une réaction hétérogène entre une phase solide, le métal, et une phase gazeuse ou liquide. « Le processus d'oxydoréduction de la corrosion chimique se déroule dans le domaine atomique avec le milieu ambiant sans présence d'électrolyte ; l'échange d'électrons entre les différents partenaires de réactions s'effectue directement ». Ce mode nécessite généralement des températures élevées ; la réaction qui se produit est de la forme :



On peut considérer comme corrosion chimique l'attaque d'un métal par un autre métal liquide (Hg), par un seul fondu ou par une solution aqueuse (Al dans CCl<sub>4</sub>) l'exemple de la corrosion sèche en atmosphère oxydante à haute température.

### I.5.2. Corrosion électrochimique :

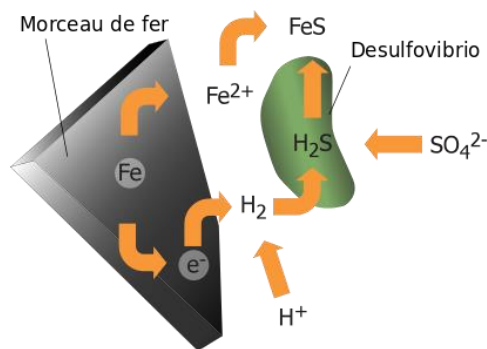
Se manifeste lorsque le réactif est un liquide ou lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal, soit dans le réactif ( la formation de piles), et un courant électrique circule entre anodes et cathodes, les zones constituant les anodes étant corrodées ;la réaction qui se produit est de la forme :



**Figure 1 : La pile de Volta : le zinc à l'anode est consommé en libérant des électrons qui alimentent le circuit électrique.**

### I.5.3. Corrosion bactérienne (La corrosion biologique ou biochimique) :

La corrosion bactérienne est causée par des microbes bactériens en combinaison avec quatre autres conditions environnementales à savoir les métaux en question, les nutriments, l'eau et l'oxygène (dans certains cas). Elles attaquent directe ou indirecte des métaux, elles peuvent être soit à l'origine d'une corrosion primaire, soit être des facteurs aggravants pour une corrosion préexistante. Cette corrosion survient en particulier dans les canalisations enterrées ; ces bactéries peuvent produire des composés ( $CO_2$ , l'anhydride sulfureux, des acides organiques...) qui attaquent le métal.



**Figure 2 : Schéma présentant la corrosion dans des conditions anaérobies provoquées par des bactéries du genre Desulfovibrio.**

### I.5.4. Corrosion en présence d'une sollicitation mécanique :

Des phénomènes de corrosion ont parfois lieu en présence d'une sollicitation mécanique externe ou interne telle que : les frottements, l'érosion, l'abrasion, les vibrations, etc. « Il se traduit par une modification locale des propriétés mécaniques du matériau induisant une fissuration à caractère fragile ». Ce type de corrosion est très dangereux car il peut aboutir à des ruptures catastrophiques.

## I.6. Des Différentes types de corrosion :

### I.6.1. Corrosion uniforme ou généralisée :

Une réaction chimique ou électrochimique se manifeste avec la même vitesse en tous les points du métal entraînant une diminution régulière de l'épaisseur ou de poids de celui-ci ou simplement un changement de coloration (ternissement). Les surfaces anodiques et cathodiques se déplacent en contact avec l'agent agressif.

La vitesse de corrosion est généralement facile à prévoir avec une précision suffisante pour déterminer la durée de vie probable d'un appareil :

$$\text{Taux de corrosion en } \left(\frac{\text{mm}}{\text{an}}\right) = \frac{\text{Masse perdue (mg)} \times 87,6}{\text{Surface (mm}^2\text{)} \times \text{densité(g/cm}^3\text{)} \times \text{temps (heures)}}$$

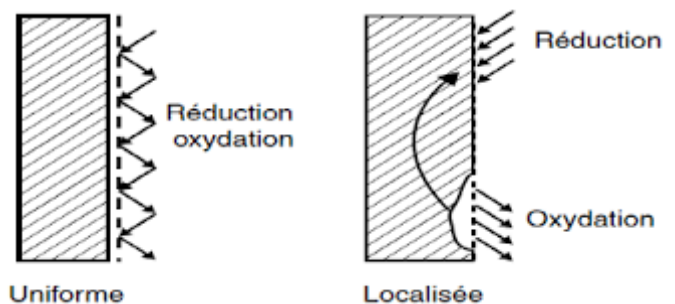
La tenue de corrosion uniforme se classifié selon le Taux de corrosion à :

Taux de corrosion (mm/an)	Tenue de corrosion
< 0,05	Excellente
0,05 à 0,130	Bonne
0,130 à 1,25	Satisfaisante
> 1,25	Non satisfaisante

**Tableau 1 : La tenue de corrosion uniforme par selon le Taux de corrosion**

### I.6.2. Corrosion localisée :

Une attaque qui se déroule dans un point plus définie, spécifiquement anodique d'une surface d'un matériau ; elle découle toujours de la corrosion uniforme par couplage galvanique entre les zones hétérogènes peuvent être préexistantes dans le métal ou dans le milieu corrosif.

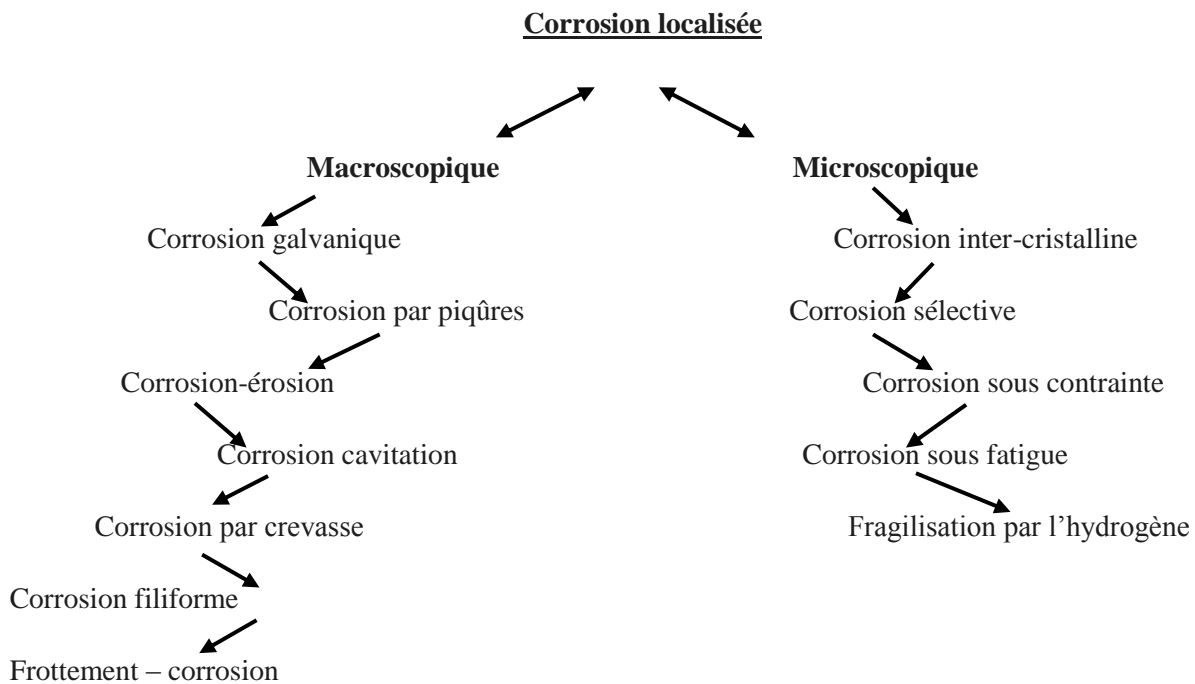


**Figure 3 : Corrosion uniforme et corrosion localisée d'un métal**



Il suffit alors d'une petite anode et d'une grande cathode pour générer des vitesses de pénétration locales très importantes.

Ce type de corrosion est défini en plusieurs types, ceci quelque types plus courantes : Corrosion galvanique, Corrosion par piqûres, Corrosion sous fatigue, Corrosion-érosion, Corrosion inter-cristalline, Corrosion sélective, Corrosion sous contrainte, Corrosion cavitation, Corrosion cavernueuse, Fragilisation par l'hydrogène, Corrosion filiforme, Frottement – corrosion.



### **I.6.2.1. Corrosion galvanique :**

La corrosion galvanique se produit quand deux métaux d'efférents à potentielle sont en contact dans un milieu humide. Le moins noble, se corrodera, et l'autre sera protégé de la corrosion. Le moins noble sera jouie le rôle d'anode, il va se dissoudre (métal actif) tandis que l'autre sera le siège d'une réaction d'oxydoréduction du milieu gazeux (métal noble).Ce phénomène s'appelle aussi effet de piles métalliques. Une condition indispensable pour j'apparition du phénomène de corrosion galvanique est la présence d'un électrolyte et ce, même si le contact n'est pas direct entre deux métaux.



**Figure 4 : Une vieille vis corrodée par le temps**

## Classement des potentiels relatifs

(mV) de dissolution des métaux dans l'eau de mer à 25°C

	Platine
	Or
	Graphite
↑ Croissance D'Ecorr	Hastelloy
	Acier inoxydable
	Titane
	Argent
↑ Matériaux protégé (Cathodique ou plus noble)	Inconel base 600
	Nickel
	Alliages de cuivre
	Etain
↓ Matériaux corrodée (Anodique ou moins noble)	Bronze
	Laiton
	Cuivre
	Plomb
	Fer
	Acier bas carbone
	Alliages d'aluminium
	Cadmium
	Aluminium, série 1000
	Alliages d'aluminium, séries 5000, 3000, 6000
	Acier galvanisée
	Zinc
	Magnésium et alliages de magnésium

« La vitesse de corrosion est fonction de la surface des deux électrodes formées. Plus la surface de la cathode est grande par rapport à l'anode plus la corrosion est rapide ; c'est pourquoi il est dangereux de réaliser des assemblages avec des matériaux moins nobles que la structure ». Si de tels assemblages doivent être faits, les éléments doivent être isolés électriquement.

### I.6.2.2. Corrosion par piqûres :

C'est une attaque ponctuelle locale sous l'effet d'anions agressifs tels que Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, et I<sup>-</sup> en présence d'un oxydant, qui peut aboutir à la perforation du métal, Cette corrosion progresse rapidement et le nombre et la forme de piqûres de corrosion varient selon les conditions expérimentales.



**Figure 5 : Corrosion par piqûres sur la paroi d'une cuve en acier inoxydable austénitique Cr18-Ni10**

### **I.6.2.3. Corrosion inter-granulaire :**

La corrosion inter-granulaire se rencontre dans le cas d'alliages qui sont à l'état de solution solide à haute température et dans le cas d'un système biphasé à basse température avec précipitation d'une seconde phase, elle attaque soit les joints de grains, soit les zones adjacentes aux joints de grains.



**Figure 6 : Corrosion feuilletante d'une canalisation en alliage d'aluminium véhiculant de l'eau**

### **I.6.2.4. Corrosion sous contrainte :**

Résultant de la combinaison d'une contrainte mécanique d'extension et d'un milieu électrolytique. Le métal est soumis à une dégradation rapide sans manifestation extérieure visible sans formation de produit de corrosion, ni de variation de poids notable.



**Figure 7 : la corrosion sous contrainte**

### **I.6.2.5. Corrosion caverneuse (par crevasse) :**

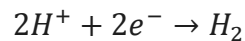
Se rencontre dans les parties où il y a confinement du milieu, est généralement associée à la présence de petits volumes de solution stagnante dans des interstices (joints non étanches, dans des interstices, dans les recoins etc...). Le confinement du milieu peut être dû, soit à l'absence d'oxygène, soit à une acidification du milieu par hydrolyse des sels.



**Figure 8 : Corrosion caverneuse d'un acier allié sous un joint**

### I.6.2.6. Fragilisation par l'hydrogène :

L'hydrogène peut pénétrer dans le métal quand il est produit à l'interface métal/film d'oxyde lors d'une réduction liée à la corrosion électrochimique ou pendant l'électrodéposition, la protection cathodique, pendant le nettoyage électrochimique des pièces ou encore peut pénétrer de l'atmosphère environnante. L'hydrogène présente dans un réseau métallique peut entraîner d'importantes détériorations du métal et de ses propriétés mécaniques, Il provoque une fissuration du matériau par sa diffusion dans le réseau de l'alliage. Cela se produit lorsque la réaction d'évolution de l'hydrogène :



Les dégâts que l'atome d'hydrogène peut les provoquer :

- précipitation sous forme d'hydrures ;
- «l'attaque hydrogène» action chimique à haute température : décarburation des aciers ;
- recombinaison sous forme d'hydrogène moléculaire : On peut atteindre des pressions considérables qui conduisent à des cloques, des boursouflures, des cohésions en "marches d'escalier" ou même des éclatements ;
- les flocons : précipitation d'hydrogène à la solidification ;
- fragilisation : les atomes d'hydrogène entraînent une diminution importante de la capacité de déformation plastique du métal qui devient fragile ;
- la fissuration des soudures ;
- etc.



**Figure 9 : fragilisation par l'hydrogène de l'acier inoxydable austéno - ferritique z2cnd22 05**

### I.6.2.7. Corrosion sélective :

Se résulte par la dissolution sélective de l'un des éléments de l'alliage si celui-ci est homogène, ou de l'une des phases si l'alliage est polyphasé. La corrosion feuilletant est une forme de corrosion sélective qui se propage suivant une multitude de plans parallèles à la direction du

laminage ou du filage. La dézincification (dissolution sélective du zinc) dans un laiton (ex. 70Cu - 30Zn) est l'exemple le plus connu.

#### **I.6.2.8. Corrosion érosion /abrasion/cavitation :**

Cette corrosion est produite par le mouvement relatif d'un fluide corrosif et d'une surface métallique. L'aspect mécanique du mouvement est important et les phénomènes de frottement et d'usure peuvent intervenir.

#### **I.7. Facteurs de corrosion :**

Plusieurs facteurs conduisent à la du métal, ils peuvent être classés en quatre groupes principaux :

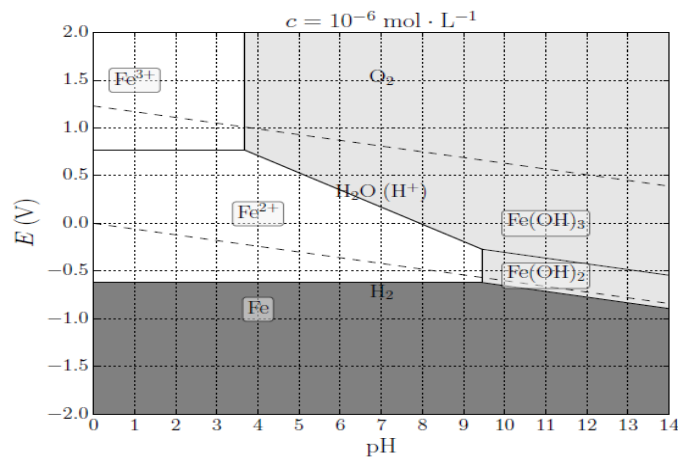
<b>Facteurs métallurgiques</b>	<b>Facteurs définissant les conditions d'emploi</b>	<b>Facteurs dépendant du temps</b>	<b>Facteurs relatifs au milieu et définissant le mode d'attaque</b>
-Composition d'alliage, hétérogénéités cristallines. -Procédé d'élaboration -Impuretés dans l'alliage, inclusions. -Traitements thermiques, traitements mécaniques. -Additions protectrices.	-Etat de surface, défauts de fabrication. -Forme des pièces -Sollicitations mécaniques. -Procédés d'assemblage (couples galvaniques, soudures, etc.). -Emploi d'inhibiteur -Croûte d'oxydes superficiels. -électrolyse	-Vieillessement -Tension mécaniques -Modification des revêtement protecteurs. -Apparition d'un dépôt	-Concentration de réactif -Teneur en Oxygène, en impuretés, en gaz -Les Facteurs climatiques (Température, Pression, Humidité, Pluviosité, La Rosée...) -Présence de bactéries -pH du milieu, acidité du milieu, salinité, résistivité. -dissous (CO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> H <sub>2</sub> S... ).

**Tableau 2 : les facteurs de corrosion**

#### **I.8.Aspects thermodynamiques de la corrosion :**

On exprime la possibilité thermodynamique de corrosion d'un métal donné en fonction du pH car il est oxydé par l'eau si son potentiel d'équilibre (de Nernst) est inférieur à celui de l'eau ( $E_{M^+}^{eq} < E_{H^+/H_2}^{eq}$ ) ; tant que le potentiel de l'eau dépend du pH et celui du métal aussi en cas de formation d'hydroxyde métallique.

Pour les concentrations des espèces métalliques provenant des phénomènes de corrosion sont en général faibles. On trace un diagramme potentiel-pH pour une concentration de trace de  $1\mu\text{mol/L}$ .



**Figure 10 : Le diagramme potentiel-pH du fer établi pour cette**

On fait ainsi apparaître trois zones :

- une zone d'immunité : où le métal est thermodynamiquement stable ;
- la zone de corrosion : où l'élément métallique sous forme soluble ;
- la zone de passivation : où l'élément métallique considéré existe à l'état d'oxydes ou de composés insolubles.

« L'oxyde recouvre ainsi le métal d'une couche très fine, souvent invisible à l'œil nu, qui fait écran entre le métal et la solution mais cela n'implique pas que cette couche d'oxyde empêche toute oxydation ultérieure du métal ».

### **I.9.Aspects cinétiques de la corrosion (Méthodes d'estimation de la vitesse de Corrosion des métaux) :**

La thermodynamique ne précise pas la nature des phénomènes qui se passent pour l'instant, elle ne fournit que la première règle pour évaluer la résistance à la corrosion et donne une indication simple de la possibilité ou impossibilité des réactions ou transformations pour des conditions données. Pour cela, il faudra une analyse des paramètres cinétiques liée aux phénomènes divers de corrosion.

### **I.9.1.Méthodes classiques : zaabar**

On exprime la vitesse de corrosion ( $V_{corr}$ ) en termes de perte de masse, de réduction d'épaisseur ou de densité de courant. Elle peut être définie à partir des analyses suivantes :

#### **I.9.1.1.Mesure de perte de masse (gravimétrie) :**

Dans le cas d'une perte de masse  $\Delta m$  au cours d'une durée  $\Delta t$ , on exprime la vitesse de corrosion  $V_{corr}$  par la relation :

$$V_{corr} = \frac{\Delta m}{S \cdot \Delta t}$$

Avec :

$V_{corr}$  : Vitesse de corrosion (mm/an).

$\frac{\Delta m}{\Delta t}$  : Perte de masse par unité de temps g/an.

S : Surface de l'échantillon en contact avec le liquide (cm<sup>2</sup>).

#### **I.9.1.2.Dosages de la concentration de cations en solution :**

$$V_{corr} = \frac{\Delta c}{V \cdot \Delta t}$$

Avec :

$\frac{\Delta c}{\Delta t}$  : Variation de la concentration métallique dans la solution par unité de temps (g/l/an).

V : volume de solution (L).

#### **I.9.1.3.Exploitation de la réaction de réduction :**

À condition qu'il n'y ait qu'un seul moteur de corrosion. La mesure du dégagement d'hydrogène permet de quantifier l'endommagement.

$$V_{corr} = \frac{\Delta V_{H_2}}{V_{mol} \cdot S \cdot \Delta t}$$

Avec :

$\frac{\Delta V_{H_2}}{\Delta t}$  : Volume d'hydrogène dégagé par unités de temps (L/an).

$V_{mol}$  : Volume molaire (22.4 l/mol, dans les conditions normales de températures et de pression).

#### **I.9.1.4. Mesure de perte d'épaisseur :**

Effectuée par mesure directe, elle nécessite d'avoir accès à la surface se corrodant. Des mesures ultrasonores facilitent l'obtention de l'information, qui reste cependant ponctuelle, tant du point de vue géométrique que temporel.

#### **I.9.2. Méthodes électrochimiques :**

##### **I.9.2.1. Méthodes stationnaires (srisuwan) :**

Permettent d'étudier un système se trouvant dans un état de pseudo-équilibre

- Courbes de polarisation : Les courbes courant-tension stationnaires permettent d'estimer la vitesse de corrosion et d'appréhender la formation de films inhibiteurs.
- Suivi du potentiel en circuit ouvert : Cette mesure permet également de connaître la durée d'immersion minimale nécessaire à l'établissement d'un état stationnaire indispensable pour le tracé des diagrammes d'impédance électrochimique.
- Méthode des droites de Tafel : insuffisantes pour caractériser des mécanismes complexes, mettant en jeu plusieurs étapes réactionnelles et ayant des cinétiques caractéristiques différentes.

##### **I.9.2.2. Méthodes transitoires (non-stationnaires) :**

Sont basées sur la perturbation des grandeurs physiques du système électrochimique, Ces techniques ont été développées afin de pallier un certain nombre de contraintes apparues lorsque l'on veut calculer la vitesse de corrosion d'un métal ou lorsque l'on étudie les mécanismes réactionnels mis en jeu.

- La spectroscopie d'impédance électrochimique : SIE permet de séparer et/ou d'identifier les contributions des différents phénomènes chimiques et électrochimiques élémentaires se déroulant à l'interface métal-solution.

#### **I.10. Méthodes de lutte contre la corrosion :**

On doit prendre en considération le problème de corrosion et la lutte contre la corrosion dans la phase de planification, depuis le début d'un projet, depuis la conception des équipements et jusqu'à sa réalisation et l'exploitation. Le but recherché est d'enrayer la dégradation des équipements pour augmenter leur durée de vie pour un coût minimal. La solution adoptée doit être compatible avec les prescriptions concernant la protection de l'environnement naturel et doit permettre le recyclage ou l'élimination des différents composants à la fin de leur utilisation.



Les différents moyens de lutte contre la corrosion sont :

- Protection électrochimique ;
- Protection par revêtements ;
- Protection par inhibiteurs ;
- Prévention par une forme adaptée des pièces ;
- Prévention par un choix judicieux des matériaux.

### **I.10.1. Protection électrochimique :**

On modifie son potentiel de dissolution de façon à utiliser soit dans la zone d'immunité, soit dans la zone de passivité. Il faut donc porter le métal à un potentiel pour lequel l'intensité de la réaction élémentaire anodique est nulle ou très faible. On peut faire ça par l'un des Deux types de protection électrochimiques :

#### **I.10.1.1. Protection cathodique :**

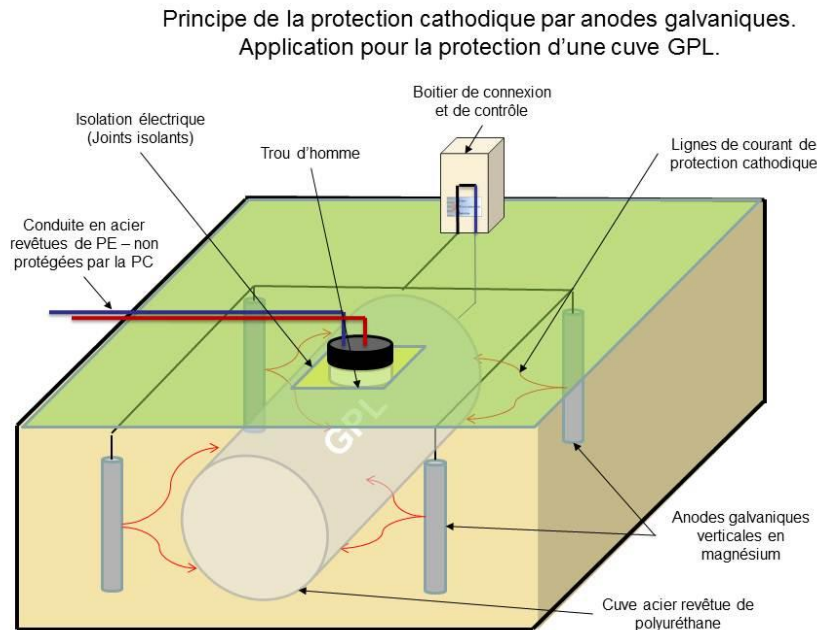
Est une méthode plus économique avec une utilisation pratiquement illimitée. Elle est surtout utilisée pour la protection des canalisations métalliques (tuyauteries) souterraines ou les constructions se trouvant en contact avec l'eau, tels que les câbles, les réservoirs, les conduites, etc. elle a une grande importance dans l'application dans le domaine de transport du pétrole et gaz.

Le principe est d'abaisser la tension métal-milieu à l'emmener dans sa zone d'immunité. Le courant circule du positif (+) vers le négatif (-), par conséquent le métal est protégé si le courant entre dans la structure en provenance de l'électrolyte.

Cette protection est produit soit par :

- L'anode réactive ou sacrificielle : dont le métal est relié électriquement avec un autre métal moins noble que lui, la force électromotrice (f-e-m) nécessaire, est obtenue à partir de la différence entre la tension moyenne du couple de corrosion et la tension propre (plus négative) et l'anode sacrificielle.
- Un courant imposé : en utilisant un générateur –extérieur au système métal/solution- de f-e-m réglable qui débitera un courant continu nécessaire à protection. Cette méthode a l'avantage de pouvoir régler la tension (ou le courant), en fonction des besoins et permet d'optimiser le système et de protéger de grandes surfaces. La longueur de la construction à protéger, dépend de l'état de

l'isolation, de la grandeur de la surface de protection et du potentiel de protection utilisé et elle peut varier de 2 à 20 km.



**Figure 11 : application de la protection cathodique par anodes galvaniques sur une cuve GPL**

### **I.10.1.2. Protection anodique :**

Cette méthode est applicable qu'aux métaux qui peuvent être passivés. Pour que cette méthode puisse être appliquée, Le principe est d'augmenter le potentiel de corrosion de façon qu'il se situe dans la zone passive. Il faut que le courbe intensité-potential présente un palier de passivation entre 500 et 1000 mV/H<sup>2</sup>.

### **I.10.2. Protection par revêtements :**

Les revêtements constituent une barrière physique entre le milieu agressif et le métal à protéger. Nécessitent tous une préparation de la surface du métal de base, de façon à ce que le revêtement soit adhérent. On distingue :

#### **I.10.2.1. Protection par revêtements non métalliques :**

Il s'agit principalement des peintures et matières plastiques. Elles doivent posséder un certain nombre de qualités telles que l'imperméabilité à l'eau et aux gaz, la grande adhérence, la stabilité chimique, l'élasticité élevées et la bonne résistance à l'usure.

Pour les peintures, Il est nécessaire d'appliquer deux ou plusieurs couches. Certaines peintures contiennent des pigments qui agissent comme primaires anticorrosion.

L'avantages d'utilisation des revêtements plastiques (Les thermoplastes, Les caoutchoucs, Les thermodurcissables) par rapport aux peintures est l'épaisseur de la couche (100 à 500  $\mu\text{m}$ ). Mais l'inconvénient des plastiques, réside dans la faible résistance à la température et leur instabilité dans plusieurs solvants organiques.

#### **I.10.2.2. Protection par revêtements métalliques :**

Les revêtements métalliques sont utilisés pour protéger l'acier contre la corrosion atmosphérique. On les utilise aussi comme protection contre l'usure.

Il existe deux types de revêtements métalliques :

**I.10.2.2.1.Revêtement anodique :** ceux moins nobles que le substrat anodique, c'est le cas des aciers, le zinc, le cadmium et l'aluminium forment des revêtements moins nobles que l'acier. L'acier est protégé cathodiquement.

**I.10.2.2.2.Revêtement cathodique :** ceux plus nobles que le substrat cathodique, c'est le cas d'un revêtement de plomb, d'étain, de nickel, de cuivre, d'argent, d'or, de rhodium ou de platine, constituent la cathode et l'acier est considéré comme l'anode. Il est nécessaire que le revêtement soit continu et ne contient aucun défaut car La moindre fissure dans le revêtement entraînera l'attaque de l'acier.

#### **I.10.3. Protection par inhibiteurs :**

Un inhibiteur de corrosion est un produit chimique qui, ajouté en petite quantité à l'eau ou tout autre fluide de processus considéré comme un réactif corrosif, permet de réduire la vitesse de corrosion ou d'annuler son agressivité.

Selon le mode d'action des inhibiteurs on peut les classe en : inhibiteurs cathodiques, anodiques, filmants et absorbeurs d'oxygène.

##### **I.10.3.1.Inhibiteurs cathodiques :**

La réduction cathodique de l'oxygène dissout produise d'ions hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ) ; les inhibiteurs cathodiques (ions zinc, polyphosphates, phosphonates...etc.) S'opposent à cette réduction ou des ions  $\text{H}^+$  comme réaction cathodique, c'est pourquoi Ils sont nommés comme ça.

Les inhibiteurs cathodiques sont solubles au pH moyen de l'eau, elle tend à élever le pH du milieu, à pH élevé, ils forment une couche protectrice insoluble et non conducteur de l'électricité sur les surfaces cathodiques qui protège le métal.

En général, Les inhibiteurs cathodiques sont utilisés pour renforcer l'action d'autres types d'inhibiteurs, donc Ils sont rarement utilisés seuls.

### **I.10.3.2. Inhibiteurs anodiques :**

Les inhibiteurs anodiques s'opposent à la dissolution du métal, elles forment un film protecteur d'oxyde ferrique "gamma" ( $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) sur les surfaces anodiques en bloquant la réaction électrochimique de dissolution du métal.

Il y a deux types des inhibiteurs anodiques, « oxydants » et « non oxydants » :

- a) Oxydant : ne nécessitant pas de la concentration en oxygène dissous, à la vitesse de réaction suffisamment rapide, l'inhibition est produite par la formation d'une couche efficace de  $\gamma\text{-FeOOH}$ . Exemple des inhibiteurs anodiques oxydant : chromates, nitrites...
- b) non-oxydant : ayant besoin d'une concentration correcte d'oxygène dissout pour agir, en catalysant l'oxydation de  $\text{Fe}^{2+}$  par l'oxygène, ou en améliorant l'imperméabilité physique de la couche de  $\gamma\text{-FeOOH}$ , ou par les deux. Exemple des inhibiteurs anodiques non-oxydant : phosphates, benzoates, molybdates...

### **I.10.3.3. Inhibiteurs amines filmants (inhibiteurs organiques) :**

Des amines filmantes constituaient une couche "film" mono-moléculaire entre le métal et l'eau à longue chaîne. Ces produits organiques sont souvent composer des agents tensioactifs « filmants » avec une partie hydrophobe qu'il forme une barrière entre l'eau et la surface du métal et une partie hydrophile qu'il se fixera sur la surface du métal. Ce film protecteur protège le métal du contact de l'oxygène et des composants acides mais il dépend un pH compris entre 6 et 7,5 de liquide pour empêcher la dissolution du film dans le liquide.

### **I.10.3.4. absorbeurs d'oxygène (Réducteurs d'oxygène):**

Dans des systèmes à haute température ou hermétiquement fermés (les circuits de chaudières ou de chauffage ...) l'efficacité de lutte contre corrosion dépend la réduction de l'oxygène dissous, donc les inhibiteurs anodiques et cathodiques sont pas adéquates dans ces cas, car ils agissent bien en présence de concentrations d'oxygène dissous. On utilise donc on utilise des produits chimiques réducteurs à l'oxygène appelés « absorbeurs d'oxygène ». Ils réagissent chimiquement avec l'oxygène pour le détruire.

Les réducteurs d'oxygène les plus employés sont :

- sulfites
- hydrogène gazeux élémentaire
- la méthyle-éthylcétoxime pour des températures supérieures à 100°C
- la carbohydrazide pour des températures inférieures à 150°C
- l'hydrazine malgré sa toxicité ou carbohydrazine
- l'acide ascorbique ou l'ascorbate de sodium
- les hydroxylamines
- agents réducteurs organiques (érythorbate, hydroquinone, gallate).

# **Chapitre II :**

## **Les méthodes préventives contre la corrosion**

### **II.1.Introduction :**

On doit prendre en considération la prévention de la corrosion dès la phase de conception d'une installation pour éviter de nombreux problèmes et pour augmenter et de garantir une certaine durée de vie à un objet ou une installation , surtout pour certain industries sensibles telles que l'industrie nucléaire, l'industrie chimique ou l'aéronautique, où les accidents peuvent avoir des conséquences et des crises graves pour les personnes et l'environnement puis un certain cout économique important.

Il y a deux plus grandes méthodes de prévention de la corrosion :

- Prévention par une forme adaptée des pièces.
- Prévention par un choix judicieux des matériaux.

### **II.2. Prévention par une forme adaptée (LA GEOMETRIE) des pièces :**

Une forme adaptée des objets aux conditions d'utilisation est possible de diminuer les risques de corrosion ça qui augmente leur durée de vie.

Il y a quelques solutions géométriques pour quelques types de corrosion, sont couramment pour :

#### **II.2.1. Corrosion en zone humide :**

Car la corrosion atmosphérique ne se produit qu'en présence d'humidité, il faut donc d'éviter les zones de rétention d'eau et d'assurer la vidange complète des récipients soit par un bon drainage soit par leur géométrie qui assure leur vidange complète.



**Figure 12 : Prévention par la forme du récipient. (a) : mauvais. (b) : correct.**

#### **II.2.2. Corrosion sous contrainte :**

Une bonne géométrie d'une pièce peut influente sur la distribution des contraintes dans une pièce et de supprimer ou de réduire les zones de concentration de contraintes et donc d'augmenter la résistivité d'une pièce à la corrosion sous contrainte.

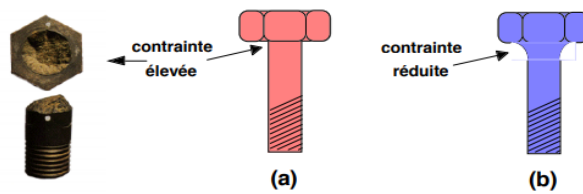


Figure 13 : Réduction des contraintes locales dans une tête

### II.2.3. Corrosion galvanique :

Un contact électrique et électrolytique entre des matériaux différents permet de former d'une pile galvanique, causant une corrosion accélérée du métal moins noble. La solution c'est de utiliser de matériaux adaptés, en supprimant le contact entre les matériaux au moyen d'un isolant ou les noyer dans un polymère isolant ou par l'emploi de pièces sacrificielles peu coûteuses aisément remplaçable car dans certain les installations de taille importante ce n'est pas possible d'isoler électriquement différents métaux.

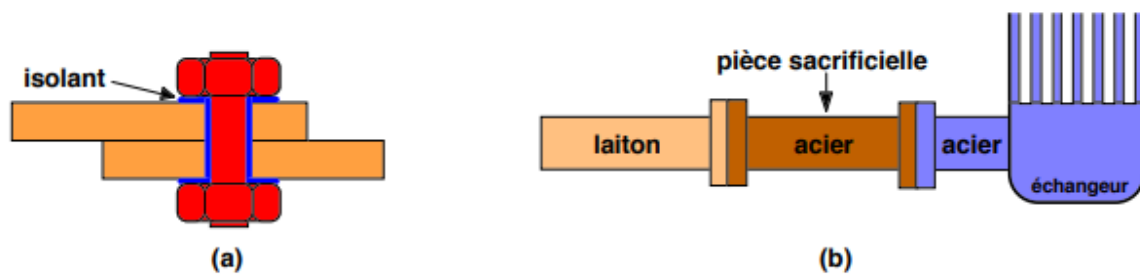


Figure 14 : Protection contre la corrosion galvanique :(a) isolation électrique, (b) : pièce sacrificielle.

### II.2.4. Corrosion-érosion/cavitation :

On peut éviter l'apparition de ces types de corrosion par la conception judicieuse et appropriée des canalisations et des écoulements des fluides à vitesse élevée. Il faut d'éviter les variations brutales et les changements brusques de direction de section créant des zones de turbulence ou les changements de direction. Le rayon du coude d'une conduite doit être supérieure à 3 fois son diamètre, et il faut d'éviter la création d'obstacles à l'écoulement du liquide, ces obstacles peuvent créent des parties vulnérables de l'installation.

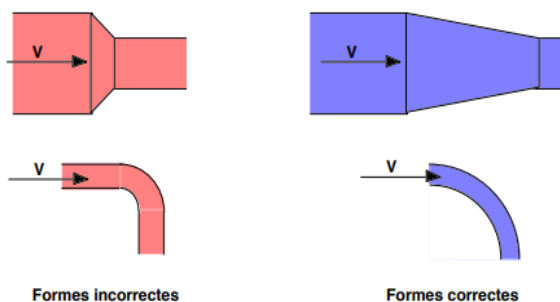


Figure 15 : Diminution des risques de corrosion-érosion et de corrosion-cavitation

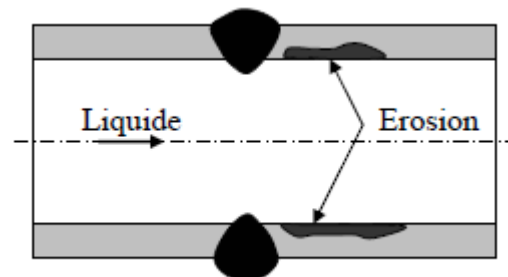


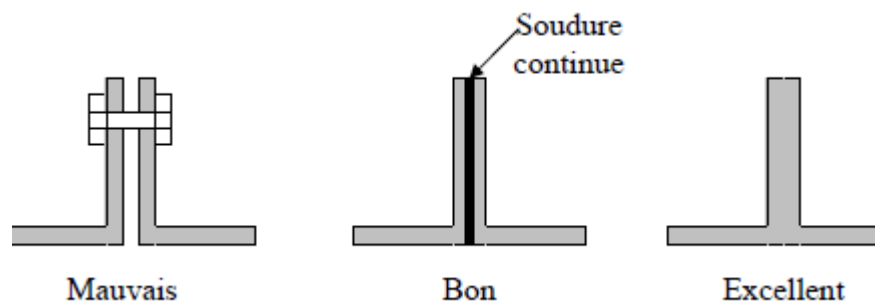
Figure 16 : érosion - corrosion due à des turbulences produites par les cordons de soudure



### II.2.5. Corrosion caverneuse :

Parce que la corrosion caverneuse apparaît dans les endroits inaccessibles et dans les fentes par formation de piles d'aération, il faut donc pour éviter cette corrosion de :

- construire une forme des pièces et des installations qui évite la rétention de solution corrosive et permette des vidanges complètes ;
- préférer l'emploi de pièces soudées continue bord à bord à celui d'assemblages vissés ou rivetés.



**Figure 17 : Soudure continue bord à bord préférée aux assemblages rivetés ou boulonnés**

On peut résumer ces cinq conseils à quelques points suivant :

- ✓ combattre la formation de piles galvaniques entre des métaux différents potentiels par l'isolation électrique ou/et l'utilisation des pièces sacrificielles.
- ✓ Assurer la vidange complète et éviter l'accumulation de liquide et de l'eau stagnante pour éviter la corrosion par aération différentielle. et éviter de créer des espaces difficiles d'accès.
- ✓ Eviter la formation des crevasses dans les assemblages pour combattre la corrosion caverneuse, on utilisant de mastic hydrofuge ou de soudure.
- ✓ Eviter, les changements brusques de direction dans les conduites qui peuvent formoler des zones de turbulences et créer la corrosion par érosion.
- ✓ choisir les bonnes qualités des matériaux d'une géométrie donnée une résistivité à la corrosion sous contrainte.

### II.3. Prévention par le choix du matériau :

Il doit tenir en compte la résistance à la corrosion qu'un critère parmi le choix des matériaux avec prendre en considération de l'influence défavorable et des conditions de fonctionnement.

« La résistance à la corrosion est une propriété du système métal milieu et non du métal seul ».

La résistance intrinsèque à la corrosion de quelques métaux purs dans les différents milieux :

Milieu	Fe	Cr	Ni	Cu	Al	Zn	Ti	Ta
Air humide	-	+	+	+	+	m	+	+
Eau froide naturelle aérée	m	+	+	+	-	+	+	+
Eau de mer	-	+	+	m	m	-	+	+
Acide non oxydant	-	m	m	+	-	-	+	+
Acide oxydant	-	+	m	-	-	-	+	+
Acide + Cl -	-	+	m	-	-	-	m	+
Base + O <sub>2</sub>	+	+	+	+	-	-	+	m
Oxydation à haute température	m	+	+	-	-	-	m	-
+ : Bonne résistance, m : Résistance moyenne, - : Mauvaise résistance								

**Tableau 3 : La résistance intrinsèque à la corrosion de quelques métaux purs dans les différents milieux**

### **II.3.1. Résistance des alliages et domaines d'emploi :**

#### **II.3.1.1. Les aciers inoxydables :**

Les aciers inoxydables résistent bien à la corrosion due à la formation en surface d'une couche d'oxyde riche en chrome qu'il est normalement passif et résiste bien à la corrosion et elle apparaît naturellement à l'air. Cette couche de faible épaisseur (environ 10 nm), ces matériaux doivent donc être utilisés dans des conditions où ils conservent leur passivité car des destructions locales conduisent à des phénomènes de corrosion localisée.

Les aciers inoxydables sont utilisés couramment dans les milieux aérés ou dans quelque conditions oxydantes telles que l'acide nitrique, et plusieurs acides organiques, et les solutions aqueuses diverses.

#### **II.3.1.2. Les alliages de nickel :**

Le nickel résiste bien aux milieux caustiques, aux solutions neutres et alcalines, aux acides non oxydants dilués et encore à la corrosion atmosphérique mais Il ne résiste pas bien aux acides et sels oxydants, d'eau de mer, et d'environnements soufrés ou sulfureux.

Bien que le nombreux alliage de nickel ont une résistance à la corrosion élevée mais leur utilisation est limitée en raison de leurs prix très élevés.

#### **II.3.1.3. Les alliages de cuivre :**

Le cuivre résiste bien à la corrosion dans l'air, dans l'eau de mer ou douce froide ou chaude et avec des vitesses d'écoulement ne dépassant pas 1 m/s Il et résiste aussi aux acides non oxydants dilués mais il se corrode en présence d'acides oxydants d'amines, d'ammoniaque ou d'eau à grande vitesse d'écoulement.

#### **II.3.1.4. Les alliages d'aluminium :**

L'aluminium résiste bien à la corrosion atmosphérique et dans les milieux dont le pH est entre 4 et 9, car il est protégé par un film stable et protectrice d'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , mais il faut éviter de l'utiliser dans les acides forts, le mercure, l'eau de mer ou l'eau contenant de fer ou de cuivre et il est Susceptibilité à la corrosion inter-granulaire et sous tension.

#### **II.3.1.5. Le titane :**

Le titane résiste bien à la corrosion dans tous les milieux sauf les bases fortes, les acides organiques, les solutions alcalines chaudes, et, à haute température, dans l'air, l'azote ou l'hydrogène. Il prend sa résistance à la formation des films passifs stables de  $\text{TiO}_2$ . Il est utilisé dans l'industrie de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , des halogènes, pharmaceutiques, ...

#### **II.3.1.6. Les alliages de zirconium :**

Comme l'aluminium et le titane, le zirconium se recouvre aussi d'une couche oxyde protecteur de zircon (ZrO<sub>2</sub>). Il est utilisé dans l'industrie chimique et l'industrie nucléaire soit directement soit sous forme d'alliage. « Le zirconium et ses alliages ne doivent pas être employés en présence de chlorures oxydants, d'acide fluorhydrique et de fluorures, d'eau régale, d'acides organiques, et, à haute température, d'oxygène, d'azote ou d'hydrogène ».

**Chapitre III :**  
**Etude de cas**  
**(prévention et lutte**  
**contre la corrosion**  
**des installations de**  
**production du gaz à**  
**Hassi R'mel)**

## *Chapitre III : Etude de cas (prévention et lutte contre la corrosion des installations de production du gaz à Hassi R'mel)*

### **III.1.Introduction :**

La corrosion est problème existe dans l'industrie de traitement de gaz brut, qu'elle provoque des dommages et dégâts grave pour les installations, l'environnement et en plus pour la sécurité et la santé et la vie des travailleurs - la fuite de gaz un porte de l'explosion-. Donc la corrosion c'est aussi un problème existe dans la centre de production, de traitement et de compression de gaz brut de SONATRACH à Hassi Rmel qui travaillent de le combattre de différentes manières et méthodes.

### **III.2.Présentation du champ gazier de Hassi-R'mel :**

#### **III.2.1.Situation géographique :**

Le champ de Hassi R'mel est considéré parmi les plus importants à l'échelle nationale, voire mondiale. [H8] Il est situé sur la plateforme saharienne, près de la bordure nord orientale du Sahara, à 550 Km au sud d'Alger, entre Laghouat et Ghardaïa. A une altitude d'environ 730 m, le paysage est constitué d'un vaste plateau rocailleux, son climat est caractérisé par une humidité moyenne de 19 % en été et 34 % en hiver, les amplitudes de températures sont importantes, variant de  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  en hiver à  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  en été.



**Figure 18 : Représentation la Situation géographique du champ gazier de Hassi-R'mel**

### III.2.2. Historique du champ de Hassi R'mel :

Le gisement de Hassi R'mel a été découvert en 1951, le premier puits, HR1, a été réalisé en 1952 à quelques kilomètres de Berriene. Entre 1957 et 1960 sept autres puits ont été forés (HR2, HR3, HR4, HR5, HR6, HR7, HR8).

Le gisement de Hassi R'mel est classé le 1<sup>er</sup> en Algérie et 4<sup>ème</sup> au monde, il est d'une superficie de 3500 Km<sup>2</sup> étendu sur 70 Km du nord au sud et de 50 Km de l'est vers l'ouest, avec une énorme réserve de gaz estimée de 3000 milliard de m<sup>3</sup>. Ce gaz se trouve entre 2110 et 2280 m de profondeur.

### III.2.3. Développement du champ de Hassi R'mel :

Le développement du champ de Hassi R'mel est étroitement lié au développement de la technologie utilisée en forage dans le monde. Les importantes réserves recelées par ce gisement, 3000 milliard de m<sup>3</sup>, été un argument persuasif pour le lancement d'une politique d'industrie gazière de grande envergure en Algérie.

Plusieurs phases ont été nécessaires pour accomplir le développement du champ de Hassi R'mel :

- **1961-1969** : mise en exploitation de six (06) unités de traitement de gaz d'une capacité de quatre milliards de mètres cubes par an ;
- **1972-1974** : mise en exploitation de six (06) unités supplémentaires pour atteindre une capacité de quatorze milliards de mètres cubes par an ;
- **1975-1980** : mise en œuvre et réalisation du plan directeur de développement visant les objectifs suivants :
  - augmentation de la capacité de traitement de 14 à 94 milliards m<sup>3</sup>/an;
  - maximisation de la récupération des hydrocarbures liquide, condensât et GPL, par recyclage partiel du gaz ;
- **1985** : réalisation et mise en service d'une unité pour la récupération des gaz torchés et la production de GPL des modules 0 et 1 ;
- **1987-2000** : réalisation et mise en service des centres de traitement du gaz de Djebel Bissa et de Hassi R'mel Sud ;
- **1981-1993** : mise en service de cinq (05) centres de traitement d'huile ;
- **1995-1999** : mise en service des unités d'hydratation de gaz à Sbaa (Adrar) près d'In Salah ;
- **1999** : réalisation et mise en service de l'usine de récupération des gaz associés provenant des centres de traitement d'huile ;

- 2001 : mise en œuvre de projet de BOOSTING 1 ;
- 2005 : mise en service du BOOSTING 1 ;
- 2006 : mise en œuvre de projet de BOOSTING 2 ;
- 2010 : mise en service du BOOSTING 2 ;
- 2017 : mise en œuvre de projet de BOOSTING 3.

### III.2.4. installations de production de gaz du champ Hassi R'mel :

Le plan d'ensemble des installations gazières implantées sur le champ de Hassi R'mel est élaboré de façon à avoir une exploitation rationnelle du gisement et pouvoir récupérer le maximum de liquide.

Les installations mises en œuvre sont représentées sur la figure 19.

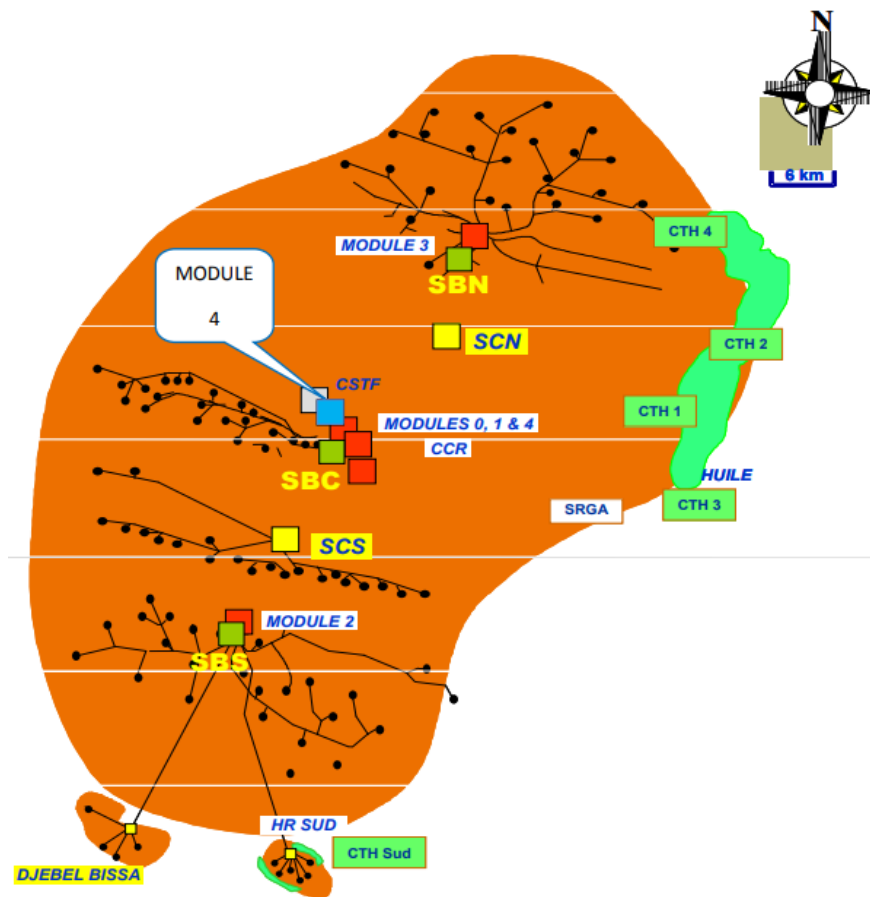


Figure 19 : L'ensemble des installations gazières implantées sur le champ de Hassi-R'mel

Secteur Nord	Secteur Centre	Secteur Sud
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Module 3- [H9]</li> <li>- Station de Compression Nord (SCN)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Module 0</li> <li>- Module 1</li> <li>- Module 4</li> <li>- CSTF</li> <li>- CNDG</li> <li>-SBC (Station BOOSTING Centre)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Module 2</li> <li>- Station de compression Sud (SCS)</li> <li>- SRGA</li> <li>- Djebel Bessa [H10]</li> <li>- HR-sud [H11]</li> </ul>

**Tableau 4 : Différents secteurs de HR**

**III.2.4.1. Station de compression (SCN et SCS) :**

Son but est de réinjecter le gaz au niveau du gisement pour le maintien de pression afin de récupérer le maximum de liquides. Les stations de compression nord et sud ont pour objet de réguler la pression du gaz au niveau des gisements.

**III.2.4.2. Centre national de dispatching de gaz (CNDG) :**

Son rôle est la collecte de toutes les quantités de gaz produites au niveau de Hassi R'mel et le gaz provenant de l'extrême sud via les gazoducs GR1 et GR2. Ces quantités sont ensuite distribuées vers les centres de consommation, comme les centres « GNL » de Skikda et Arzew, ou exportées vers l'Italie via la Tunisie (GR1, GR2) [H12] et vers l'Espagne via le Maroc (GME).

**III.2.4.3. Centre de stockage et de transfert des fluides (CSTF) :**

Le condensât et le GPL produits par tous les modules sont acheminés vers le centre de stockage et de transfert des fluides, où ils sont débarrassés d'éventuelles quantités d'eau résiduelles et comptabilisées avant d'être expédiés vers SP4 puis vers Arzew.

Le CSTF comprend trois bacs de 35 000 m<sup>3</sup> et quatre bacs de 45 000 m<sup>3</sup> chacun pour le stockage du condensât, douze sphères de 7 000 m<sup>3</sup> chacune pour le stockage du GPL. Les vapeurs formées dans les sphères sous l'effet de la température ambiante sont comprimées par des turbocompresseurs, condensées puis remises dans le stockage pour éviter le boil-off et le torchage du GPL.



#### **III.2.4.4. Station de récupération des gaz associés (SRGA) :**

La SRGA récupère les gaz associés provenant des anneaux d'huiles des 6 centres de transfert des huiles (CTH1,...5, sud).

#### **III.2.4.5. Modules de traitement de gaz :**

Un module de traitement de gaz, où module processing plant (MPP), est une usine de traitement de gaz brut en produits finis :

- Gaz de vente (C1, C2).
- GPL (C3, C4).
- Condensât (C5+).

[H13]

### **III.3. la corrosion des installations de production de gaz :**

Le phénomène de corrosion pose des problèmes néfastes à l'intérieur et à l'extérieur des équipements de production de gaz brut à HR, tel que le percement et l'éclatement des conduites, la perte de circulation de l'effluent, etc. En général l'origine de cette corrosion est assez complexe, elle se déclenche par la présence de dioxyde de carbone 0.20 % mol du gaz brut dans les conditions d'exploitation favorables engendrant formation de l'acide carbonique  $H_2CO_3$  et donc l'initiation de la corrosion.

#### **III.3.1. La corrosion des installations de production aériennes :**

La plupart des installations aériennes sont menacés de la corrosion localisée, à des causes nous aura les expliqués, exceptant le tubing de production, la tête du puits, la descente, et la première manchette, les effets de corrosion sur lui sont négligeable car ils sont fabriqués en acier inoxydable. La corrosion localisée est provoquée par l'attaque chimique de  $CO_2$  contenu dans l'eau et elle est augmentée par l'effet mécanique de l'érosion causé par la vitesse d'écoulement du gaz qui peut atteindre 11m/s.

Les équipements affectés avec ce type de corrosion sont les jonctions, les équipements de surface des puits, manifolds des puits producteurs de gaz, les ballonne de stabilisation, les échangeurs, les colonnes de fractionnement, les tuyauteries et les différents collecteurs, aussi se forme en particulier au niveau des codons de soudures et des génératrices inférieures.

La corrosion externe ne formera pas sur ces équipements, grâce à leur revêtement externe par la peinture, ainsi que le climat est toujours sec par une faible pluviométrie de (140 mm/An).



**Figure 21 : Percement du cordon soudure du té de gare**



**Figure 20 : Percement de manchette de transport**

### **III.3.2. La corrosion des installations enterrées :**

L'effet de corrosion sur les conduites enterrées vient de la formation d'une pile électrochimique entre le terrain et la conduite sous l'effet de l'hétérogénéité du sol. Aussi lors le croisement de deux conduites, l'une est protégée et l'autre est non protégée ce qui engendre la formation d'une pile électrochimique par la transformation de la conduite non protégée en anode par rapport à la conduite protégée. Encore de l'attaque agressive des produits chimiques infiltrés dans le sous-sol, qui proviennent de la boue de forage.



**Figure 22 : Percement d'une conduite enterrée (vue externe)**



**Figure 23 : Percement d'une conduite enterrée (vue interne)**

### **III.4. Inspection et détection de la corrosion :**

L'entreprise dispose d'un département spécial appelé service d'inspection / corrosion, composé des ingénieurs et des techniciens sont consacrés à l'inspection et le control des moyens de prévention et de lutte contre la corrosion. Le département a été établi un programme du contrôle non destructive (CND) aide à la détection de la corrosion, et ce dernier contient les méthodes du contrôle suivantes :

- contrôle visuel (VT) ;
- Contrôle ultrason (UT) ;

- Contrôle par ressuage (PT) ;
- contrôle d'étanchéité (LT) ;
- Essais au laboratoire.

### III.4.1. le contrôle non destructif :

Le contrôle non destructif (CND) est un ensemble des méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances. Elle permet d'identifier des défauts intérieurs des installations par l'utilisation des multiples appareils pour multiple mesures. On parle aussi d'essais non destructifs (END) ou d'examens non destructifs.

Les différents contrôles non destructifs appliqués par le service d'inspection sont :

#### III.4.1.1. Le contrôle visuel (VT) :

Le contrôle visuel est une technique essentielle lors du contrôle non destructif. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci : des défauts évidents (comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion ou fissures ouvertes). Un examen visuel doit être effectué dans de bonnes conditions assurant avant tout un éclairage suffisant. Le niveau d'éclairage minimum requis est de l'ordre de 350 Lux. L'accessibilité de la partie à examiner doit permettre d'approcher l'œil à au moins 60 cm, sous une incidence de 30°. Lorsque la partie de la pièce à contrôler n'est pas accessible par un examen direct, on utilise un appareil appelé endoscope. Il s'agit d'un appareillage constitué de miroirs et lentilles. La méthode est appelée contrôle par endoscopie.



**Figure 24 : Le contrôle visuel des conduites corrodées**



**Figure 25 : Le contrôle visuel par la méthode endoscopie**

### III.4.2.2. Contrôle ultrason (UT) :

Un contrôle par l'utilisation de l'appareil ultrason pour mesurer l'épaisseur des matériaux. Ces appareils génère une onde ultrasonore qui se transmettent et réfléchissent à l'intérieur de la pièce à contrôler traversant la tôle par un palpeur dont les fréquences entre 100KHz et 25 MHz. on prendre ces mesures sur chacune des faces après on la comparer avec un seuil appelé l'épaisseur de calcul minimale. si l'épaisseur mesurée est inférieure ou égale à l'épaisseur de calcul minimal cela veut dire que l'équipement est corrodé et doit le changer par un autre.



Figure 26 : la mesure d'épaisseur par l'appareil ultrason

### III.4.2.3. Contrôle par ressuage (PT) :

On pose pendant quelque temps sur la surface à examiner un liquide coloré, il a une propriété de pénétrer dans les ouvertures et fissures petite dimension, puis on essuie et on sèche la pièce. Après on utilise un révélateur sec ou en suspension dans un liquide volatil qui absorbe le liquide retenu dans les cavités. On se retrouve un défaut sur l'endroit où le révélateur est mouillé. Certains liquides utilisés sont colorés en rouge, on peut les visualiser à la lumière du jour. D'autres sont fluorescents et dépendent l'emploi d'une lampe à rayons ultraviolets.



Figure 27 : les produits de Contrôle par ressuage

#### III.4.2.4. contrôle d'étanchéité (LT) :

Utilisée pour détecter les fuites au niveau des tubes des échangeurs de chaleur. On fait un isolement de l'équipement par un système brides pleines, puis on nettoyer intérieur des tubes par lavage et soufflage à l'air. Après on gonfle du côté calandre de l'échangeur sous une pression de 6 à 8 Kg/cm<sup>2</sup> en faine on identifie des fuites par eau savonneuse.

#### III.4.2.5. Essais au laboratoire :

Un contrôle hebdomadaire à les paramètres signifient à la corrosion tel que : le pH et la teneur en fer de l'échantillon, permettent d'optimiser les débits d'injection d'inhibiteurs et d'apprécier l'évolution de la corrosion.

### III.5.Méthodes de protection contre la corrosion des installations de production de gaz:

Pour lutter contre la corrosion, il ne suffit pas de choisir un matériau qui résiste bien à un certain milieu, il faut également penser à toutes les interactions électrochimique et mécaniques qui pourraient influencer le comportement du système métal/milieu. Ainsi, en plus des mesures de préventions permettant d'éviter de nombreux problèmes de corrosion (le choix judicieux des matériaux, la forme des pièces qu'on veut obtenir,...etc.), il existe des méthodes de protection qui demandent en général des connaissances plus spécifiques et amènent des frais supplémentaires.

A Hassi R'mel il y a deux méthodes pour maitriser la corrosion :

- L'utilisation des inhibiteurs pour les installations de surface aériennes.
- La protection cathodique pour les conduites enterrées.

#### III.5.1. La protection par l'injection des inhibiteurs de corrosion :

La stratégie retenue pour le champ de HR consiste à injecter deux types d'inhibiteurs à base d'amine, qui sont :

- 1) **Le CHIMEC 1038** : est un inhibiteur filmant/neutralisant, qui offre une fonction neutralisante de l'acidité carbonique par l'élévation de pH du milieu, et une fonction filmant permettant d'isoler l'eau agressive du métal, et cet inhibiteur est actuellement utilisé dans la région.
- 2) **Le CHOMPION CK981DZ** : est un inhibiteur filmant, qui offre seulement une fonction filmant, et il est encore de le généraliser dans toute la région.



**Figure 28 : Présentation de l'inhibiteur CHOMPION CK981DZ et CHIMEC 1038**

### III.5.1.1. Procédure du traitement :

Le traitement par inhibiteur de corrosion s'effectue par une injection continue au niveau du puits et station BOOSTING à l'aide des pompes doseuse alimentée par des panneaux solaires et calibrée pour donner la concentration optimale de l'inhibiteur en deux étapes :

- La première consiste à réaliser un traitement choc nécessaire à la formation du film de l'inhibiteur (peut atteindre jusqu'à 24 heures),
- La deuxième étape consiste à entretenir le film, la concentration de l'inhibiteur est réduite à une faible dose.



**Figure 29 : Point d'injection de l'inhibiteur de corrosion au niveau du puits**



**Figure 30 : Pompe doseuse responsable à injecter l'inhibiteur de corrosion**

### III.5.2. La protection cathodique :

La protection cathodique appliquée est la protection par courant imposé (ou du soutirage), elle utilise une source d'énergie électrique en courant continu qui débite dans un circuit comprenant un déversoir (ou masse anodique), dont le pôle positif de la source est relié au déversoir alors que le pôle négatif est relié à la structure à protéger, et le courant venant du déversoir traverse l'électrolyte, puis entre dans la structure créant ainsi un abaissement de potentiel recherché correspondant à l'immunité du métal, cette technique permet de conserver dans son intégrité la surface extérieure des conduites en aciers enterrées, en s'opposant au processus électrochimique du métal par le milieu ambiant, c'est à dire la corrosion. Le paramètre essentiel déterminant pour la protection cathodique est le seuil de protection cathodique en dessous duquel la corrosion est industriellement maîtrisée.

### III.5.2.1. Equipements de protection cathodique à courant imposé :

a) **Poste du Soutirage de courant** : La protection par soutirage du courant consiste à polariser négativement la canalisation à protéger grâce à un générateur du courant habituellement appelé "Postes du soutirage", il est constitué d'un redresseur de courant relié d'une part à la canalisation à protégé et d'autre part à une prise de terre qu'on appelle le déversoir.



**Figure 31 : Poste du Soutirage**

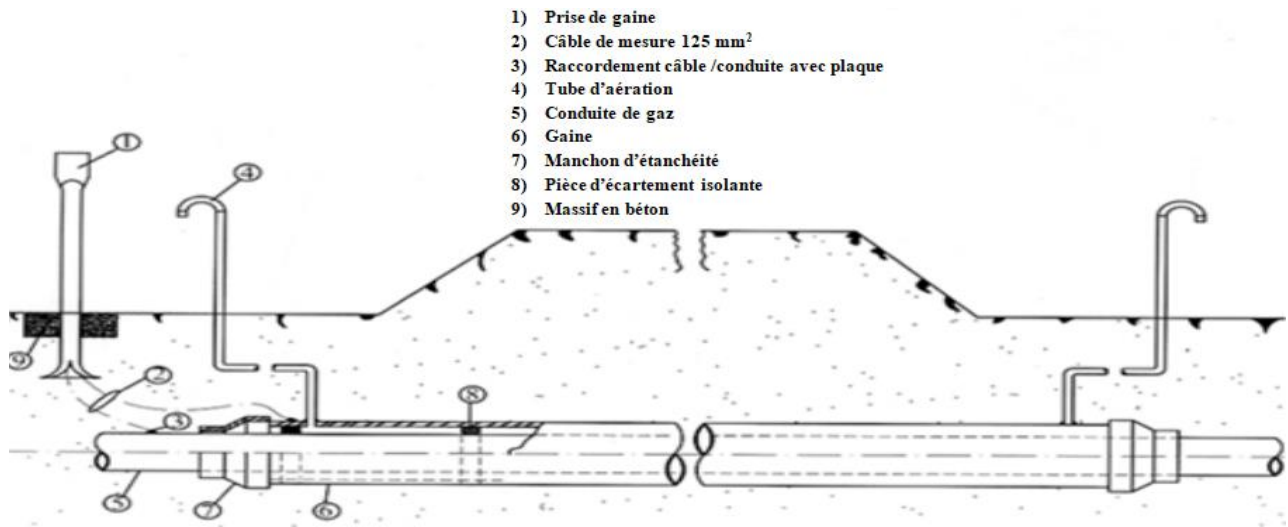
b- **Déversoir** : C'est une masse métallique (anode) sur laquelle se portera la polarisation positive, se corrodera car elle constitue l'anode du système. Le déversoir sera enfoui dans un puits appelé puits anodique avec une profondeur à atteindre la zone humide après des études effectués par les géologues.

c- **Prises de potentiel** : Elles sont destinées à contrôler le potentiel du métal de la canalisation par rapport au sol, et elles seront constituées d'un câble branché sur une plaque qui est soudée sur la canalisation puis soigneusement.

d- **Gaines de protection** : Sont des conduites de grand diamètre constituent une protection de la canalisation et seront placées à chaque traversée de route. La conduite est alors centrée dans la gaine à l'aide de colliers adaptés et les extrémités obturées afin d'éviter la pénétration des eaux ou de tout autre élément pouvant court circuler la gaine et la conduite.

e- **Les joints isolants** : Les joints isolants permettent l'isolement électrique entre deux traçons de canalisation l'un est enterré et l'autre est aérien. Ils doivent être étanches et parfaitement isolés électriquement.

f- **Tube d'aération** : Ce tube a pour but d'aérer l'espace annulaire entre la conduite et la gaine qui la couvre, afin d'éviter la présence de l'humidité, qui est par la suite peut d'éclanche la corrosion électrochimique dans l'espace annulaire.



**Figure 32 : Equipements de protection cathodique à courant imposé**

### III.5.2.2. Contrôle de la protection cathodique :

Se fait par un spécialiste certifié est indispensable pour prévenir contre les risques de défaillance et préserver sur son efficacité. On fait les mesures sur des points de mesures aménagés reliés par des prises de potentiels répartis sur chaque 2 km de longueur protégée ainsi qu'un coffret de chantier sera installé au niveau de chaque manifold.

Le contrôle basé sur les points suivants :

- La mesure par un multimètre du potentiel du métal de la structure par rapport au sol sur toute la surface, et le comparant avec le seuil de protection -0.850V. ça que signifie ce que la structure et bien protégé ou le contraire.
- Le fonctionnement correct et permanent des dispositifs produisant les potentiels attendus,
- Le contrôle et le suivi du débit de courant.



**Figure 33 : Mesure du potentiel d'une conduite enterrée à l'aide d'un multimètre**



# **Conclusion général**

## **Conclusion :**

Ce travail de mémoire avait pour objectif à connaître et mentionné les méthodes de prévention dans le domaine de lutte contre la corrosion du matériel industriel. En matière de protection contre la corrosion, il est possible d'agir sur le matériau lui-même comme la protection par un choix judicieux des matériaux et la protection par une forme adaptée des pièces, sur la surface du matériau comme la Protection par revêtements (Protection par revêtements non métalliques, Protection par revêtements métalliques) et tout type de traitement de surface, ou sur l'environnement avec lequel le matériau est en contact comme la protection par l'injection des inhibiteurs de corrosion (Inhibiteurs cathodiques, Inhibiteurs anodiques, inhibiteurs organiques, absorbeurs d'oxygène) et la Protection électrochimique (Protection cathodique, Protection anodique).

Notre travail consiste aussi à l'étude de corrosion des équipements de production du gaz à Hassi R'mel, où la corrosion se manifeste à l'intérieur des installations aériennes par l'attaque chimique de  $H_2CO_3$ , et à l'extérieur des ouvrages enterrés sous l'effet de l'agressivité du sol, ce qui provoque des percements des installations conduisant à des fuites des effluents et par la suite des perturbations dans la production du gaz au niveau du champ de Hassi R'mel.

La société SONATACH DP-Hassi R'mel est mis en place tout un département à la direction technique spécialisé à la corrosion et l'inspection des équipements (département inspection corrosion) et le control des méthodes de protection qui appliqué à cette équipements.

La détection du problème de corrosion au niveau du champ de HR se fait par l'application des techniques d'inspection spécifiques représentées essentiellement dans le contrôle non destructif par le contrôle visuel (VT), le Contrôle ultrason (UT), le Contrôle par ressuage (PT) le contrôle d'étanchéité (LT) et les Essais au laboratoire., et par conséquence ça nous permet de décider la méthode de protection la plus efficace, qui ce soit la protection cathodique des conduites enterrées, soit l'injection des inhibiteur de corrosion pour les installations aériennes (Le CHIMEC 1038, *CHOMPION CK981DZ*).

# **Références bibliographiques**

### **Références bibliographiques :**

- [1,2] Larousse. (s. d.). Corrosion. Dans *Le Dictionnaire Larousse en ligne*. Consulté le 13 octobre 2020 sur <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/corrosion/19463#locution>
- [3] Organisation internationale de normalisation. (2015). Corrosion des métaux et alliages — Termes principaux et définitions (ISO Standard No. 8044 :2015(Fr)). <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8044:ed-4:v1:fr>
- [4] Aragon, (2005). Corrosion et protections. Université de Sud de Toulon-Var- L'Institut des Sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var : (1 Éd. Rév.), Consulté à l'adresse <https://www.univ-chlef.dz/ft/wp-content/uploads/2020/04/Cours-de-Corrosion-2020-1.pdf>
- [5] La corrosion humide. (S. d.). Consulté à l'adresse <http://www.ipest.rnu.tn/html/Journee/corrosion.pdf>
- [6] Bensaada, S. éd (2019). COURS DE CORROSION. Université de Biskra : (1 Éd. Rév.), Consulté à l'adresse [https://www.researchgate.net/publication/337089317\\_COURS\\_DE\\_CORROSION](https://www.researchgate.net/publication/337089317_COURS_DE_CORROSION)
- [7] la corrosion sous contrainte. (S. d.). Consulté à l'adresse <http://thesis.univ-biskra.dz/3476/3/Chapitre20contrain.pdf>
- [8] Jean Bernard. Dans le site Process's en ligne. Consulté le 16/10/2020 à l'adresse <http://processs.free.fr/Pages/VersionWeb.php?page=9111>
- [9] La corrosion humide. (s. d.). Consulté à l'adresse <http://www.ipest.rnu.tn/html/Journee/corrosion.pdf>
- [10] Bensaada, S. éd (2019). COURS DE CORROSION. Université de Biskra : (1 Éd. Rév.), Consulté à l'adresse [https://www.researchgate.net/publication/337089317\\_COURS\\_DE\\_CORROSION](https://www.researchgate.net/publication/337089317_COURS_DE_CORROSION)
- [11] HÉLIE, M Commissariat à l'Énergie Atomique .Matériaux métalliques phénomènes de corrosion. Université d'Evry - Val d'Essonne-Département Sciences des Matériaux : (1 Édition), Consulté à l'adresse <https://www.cefracor.org/fr/file/44/download?token=KSUuMJeZ>
- [12] HOCINE D., Rapport de la protection cathodique : Contrôle du revêtement, Sonatrach HASSI R'mel (Algérie), 2007.
- [13] Bouzid D., Rapport d'inspection des pipings, Sonatrach HASSI R'mel (Algérie), 2015.