

Chapitre I : Généralités sur la corrosion

Introduction :

De nombreux ouvrages métalliques, tels les canalisations de gaz, d'eau, les pipelines et les bacs de stockage de brut sont détériorés par la corrosion que l'on peut définir comme étant la destruction d'un métal par réaction chimique ou électrochimique.

I-1- Définition:

La corrosion est une oxydation, sans flamme, d'un métal. Pour avoir une corrosion il faut mettre en présence du métal réducteur, un oxydant, c'est à dire un composé plus avide d'électrons. Il se forme un oxyde qui constitue un produit de corrosion.

La corrosion est définie comme étant l'interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui même.

Une autre définition, considère que ce phénomène n'est autre que le retour des métaux et alliage à leurs états naturels de minerais. En tous cas quelle que soit la définition adoptée, la corrosion est une dégradation. Selon le milieu, la corrosion est dite sèche quand elle apparaît dans les environnements gazeux et humide, lorsqu'elle a lieu dans les électrolytes liquides. [1,2], le résultat de ce phénomène est illustré dans les figures suivantes :



Figure I-1 : conduite affectée par la corrosion à l'extérieur.



Figure I-2 : conduite affectée par la corrosion à l'intérieur.

I-2- Différents processus de la corrosion :

Les causes de la corrosion sont multiples et complexes et elles résultent d'interactions chimiques et /ou physiques entre le matériau et son environnement. La corrosion jusqu'à ce jour n'est pas complètement éclairée et cela est expliqué par les essais de laboratoire qui ne permettent pas de prévoir avec certitude le comportement d'un métal ou d'un alliage donné lorsqu'il est exposé à la corrosion et de même il n'y a pas de métal purement résistant, d'une manière générale un métal résiste à la corrosion dans des conditions bien déterminées.[3]

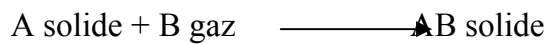
En général on peut résumer les différents processus de la corrosion comme ci-dessous :

- Corrosion chimique (sèche).
- Corrosion électrochimique (humide).
- Corrosion biochimique. (Bactérienne).
- Corrosion accompagnée d'érosion (mécanique).

A- corrosion sèche :

A température ambiante, la plupart des métaux présentent une couche très mince d'oxyde, résultat de la réaction du métal à l'oxygène atmosphérique. Il se peut très bien que les métaux soumis à un réchauffement, présentent une couche plus épaisse ou que la couche se détache. Par exemple, l'acier laminé à chaud présente une couche d'oxyde complexe instable

physiquement mais qui garde une valeur protectrice, pourvu que l'acier reste à l'air et aussi longtemps que la couche reste une couche continue. Le zinc, dans l'air, présente un film d'oxyde de zinc assurant assez une bonne protection qui augmente très lentement d'épaisseur. L'aluminium présente une couche très mince d'oxyde, assurant une forte protection. La corrosion sèche peut sembler improbable. Il vaut cependant la peine de se rappeler qu'une certaine corrosion se produit même à taux d'humidité nul. Il faut l'enlever avant l'application de toute forme de couche de protection. [4]

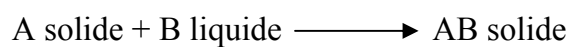


B- corrosion humide (électrochimique):

La corrosion humide se produit en milieu humide, c'est-à-dire lorsque l'humidité relative excède 60 %. Ces environnements sont neutres, acides ou alcalins.

Il peut se produire une destruction uniforme du métal, c'est-à-dire une oxydation généralisée ou une destruction localisée, c'est-à-dire un « pitting » (corrosion sous tension). Cette destruction se concentre sur des zones adjacentes à un métal plus noble ou en des points où l'apport d'oxygène est limité.

La corrosion humide est électrochimique. Un métal immergé dans un liquide conducteur présente des zones de résistance électrique différentes du reste de la surface. Un courant électrique « positif » passe de l'**anode** négative (-) à la **cathode** positive (+), ce qui ramène la dissolution ou « corrosion » de l'**anode**. En d'autres termes, le processus de corrosion humide ressemble, en gros, à une batterie d'automobile. [4]



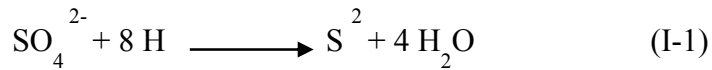
C- Corrosion biochimique :

C'est l'attaque bactérienne des métaux en particulier dans les canalisations enterrées.

Le mécanisme de ce mode de corrosion peut être de plusieurs types.

1 - Chimique par production de substances corrosives telles que CO_2 , H_2S , H_2SO_4 , NH_3 ou d'un acide organique, le cas le plus répandu est celui rencontré dans les canalisations enterrées et déterminé par la formation d'acide sulfurique qui attaque le métal.

2 - Certaines bactéries peuvent réduire les sulfates par l'intermédiaire d'hydrogène.



L'hydrogène provient par exemple des régions cathodiques, il y a donc dépolarisation des cathodes et formation accélérée de Fe^{2+} aux anodes.



3 - Dans certains cas, on peut observer sur les canalisations des dépôts adhérents résultant de l'attaque, non pas du métal lui-même, mais celle de certains constituants du milieu ambiant par des bactéries. Il en résulte la formation de piqûres sur le métal, à l'endroit où s'est produit le dépôt, suivant un processus de corrosion par différence de concentration en oxygène.[4]

D- Corrosion avec érosion, avec frottement et par cavitation :

Dans ce cas les produits de corrosion forment un dépôt adhérent et continu à la surface de métal. Ils ralentissent en général la vitesse de la corrosion. Cette couche peut être éliminée en certains points par abrasion du métal due au mouvement du liquide lui-même ou bien à celui des particules solides qu'il contient, il y a accélération de la corrosion. Il en est de même lorsque deux pièces se déplacent l'une par rapport à l'autre (frottement).



Figure I-3 : Corrosion-érosion d'un tube en cuivre véhiculant de l'eau.[5]

La corrosion par cavitation est due à la présence de bulles de vapeurs qui se forment dans une canalisation, ou au voisinage d'une pièce tournante lorsque par suite de l'augmentation locale de la vitesse du liquide où la pression statique devient inférieure à la tension de vapeur du liquide, il en résulte un violent martèlement de la surface métallique et une destruction locale du film de corrosion protecteur, la corrosion petite donc se développer à nouveau. [4]



Figure I-4 : Corrosion par cavitation d'une aube de pompe en alliage de nickel Hastelloy C276 en milieu acide chlorhydrique. [5]

I-3 -Les principales formes de corrosion :

I-3-1 - Corrosion généralisée ou uniforme :

La corrosion uniforme ou généralisée se manifeste avec la même vitesse en tous les points du métal entraînant une diminution régulière de l'épaisseur de celui-ci ou simplement un changement de coloration.



Figure I-5 : Corrosion d'une porte en acier inoxydable ferritique dans une atmosphère soufrée.[5]
[7]

I-3- 2 Corrosion localisée :

I-3- 2-1 Corrosion par pique :

Dans certaines conditions d'environnement, les métaux et alliages protégés par un film passif peuvent subir une attaque par pique, lorsqu'il se produit une rupture localisée du film. Ces piques se localisent en certains points de la surface métallique, elles développent de façon insidieuse et s'auto propagent : au fond de la cavité créée, l'hydrolyse des ions métalliques dissous entraîne une augmentation du degré d'acidité, ce qui entretient le phénomène de corrosion.[5]

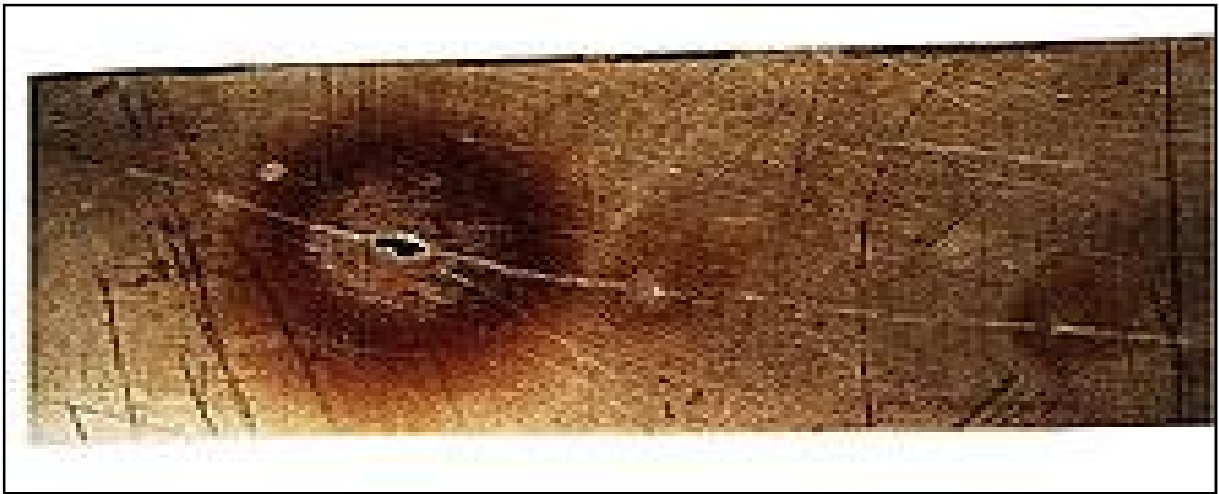


Figure I-6 : Corrosion par piquures sur la paroi d'une cuve en acier inoxydable austénitique Cr18-Ni10.[5]

I-3-2 -2 Corrosion inter granulaire :

C'est une attaque sélective aux joints de grains, par suite d'hétérogénéités locales : Appauvrissement de l'un des constituants ou au contraire, enrichissement par suite de Précipitation lors d'un traitement thermique par exemple. Il a alors création de piles locales avec dissolution des zones anodiques.



Figure I- 7 : Corrosion feuillettant d'une canalisation en alliage d'aluminium véhiculant de l'eau.

I-3- 2-3 Corrosion par crevasse :

Appelée aussi corrosion cavernueuse, elle est due a une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux zones d'une structure métallique. Il y a alors une attaque des parties métalliques les moins accessibles à l'oxygène.



Figure I-8 : Corrosion cavernueuse d'un acier allié sous un joint.

I-3- 2-4 Corrosion galvanique :

Il s'agit de l'attaque préférentielle de la phase la moins noble d'un alliage comportant deux Phases ou de la corrosion pouvant exister entre au moins deux matériaux métalliques Placés dans le même environnement. Il y a formation d'une pile. En cas de couplage, plus les métaux en présence sont éloignés sur l'échelle galvanique, plus la pile formée dispose d'énergie pour provoquer les transformations. Les phénomènes de corrosion sont amplifiés à la fois dans la cinétique de dégradation et dans la génération d'ions dans le milieu biologique. La partie la moins noble est l'anode et la plus noble est la cathode. Le rapport de surface

anode/cathode joue un rôle très important. Il faut retenir que, plus l'anode n'est de petite taille, plus la vitesse de dissolution n'est élevée. Ce fait a une grande importance en particulier lors du choix des alliages utilisés pour les réalisations des installations industrielles.

La corrosion galvanique peut être causée par de nombreux facteurs, dont voici quelques uns :

- Présence des impuretés dans le métal.
- Orientation des grains dans le métal.
- Différences de dimension des grains.
- Traitement thermique. Traitement mécanique.



Figure I-9 : Corrosion galvanique au niveau d'une zone de brasage entre la brasure Cu-P et le tube en cuivre. .[5]

I-3- 2-5 Corrosion et dissolution sélective :

Comme son nom l'indique, ce mode de corrosion se traduit 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. C'est l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse.



Figure I-10 : Coupe métallographique montrant une corrosion sélective d'un laiton.[5]

I-3- 2-6 Corrosion par frottement :

La corrosion-frottement concerne les dommages provoqués par la corrosion au niveau du contact de deux surfaces métalliques en mouvement relatif l'une par rapport à l'autre.

Elle se produit essentiellement lorsque l'interface est soumise à des vibrations (mouvement relatif répété de deux surfaces en contact) et à des charges de compression.

Ce mouvement relatif peut être très faible ("petits débattements" de l'ordre de quelques micromètres). En présence d'un mouvement de frottement continu en milieu corrosif, on utilise de préférence le vocable de tribo-corrosion.

C'est la détérioration qui se produit à l'interface entre des surfaces en contact, suite à la Conjugaison de la corrosion et d'un faible glissement réciproque des deux surfaces.

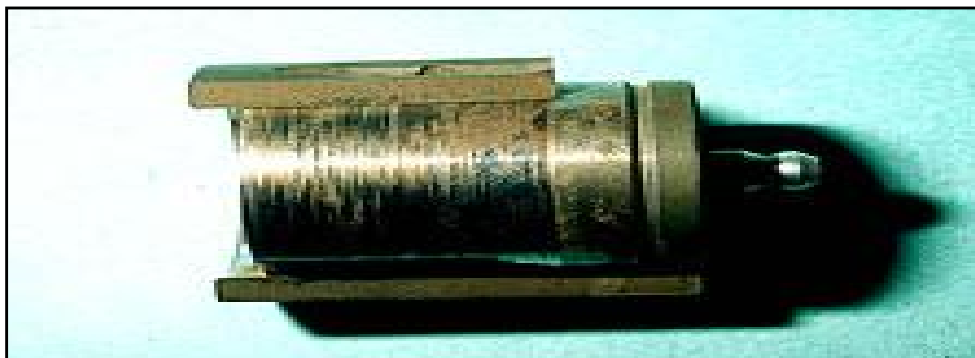


Figure I-11 : Corrosion frottement d'une pièce en acier.[5]

I-3- 2-7 Corrosion sous contrainte et fatigue-corrosion :

C'est une fissuration du métal qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique (Force de traction) et d'une réaction électrochimique. La corrosion sous l'effet de la fatigue est due à l'application répétée des contraintes.

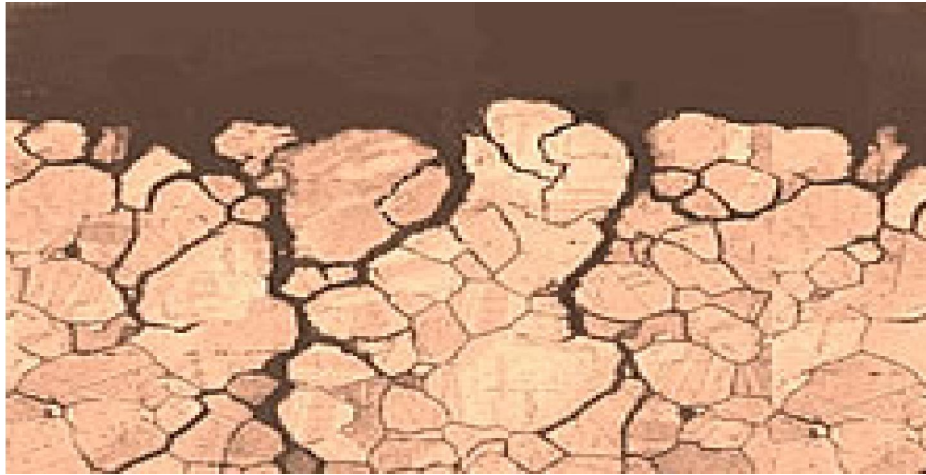


Figure I-12 : Corrosion sous contraintes d'un alliage cuivreux.[5]

La figure ci-dessous représente une courbe de la contrainte appliquée en fonction du nombre de cycle.

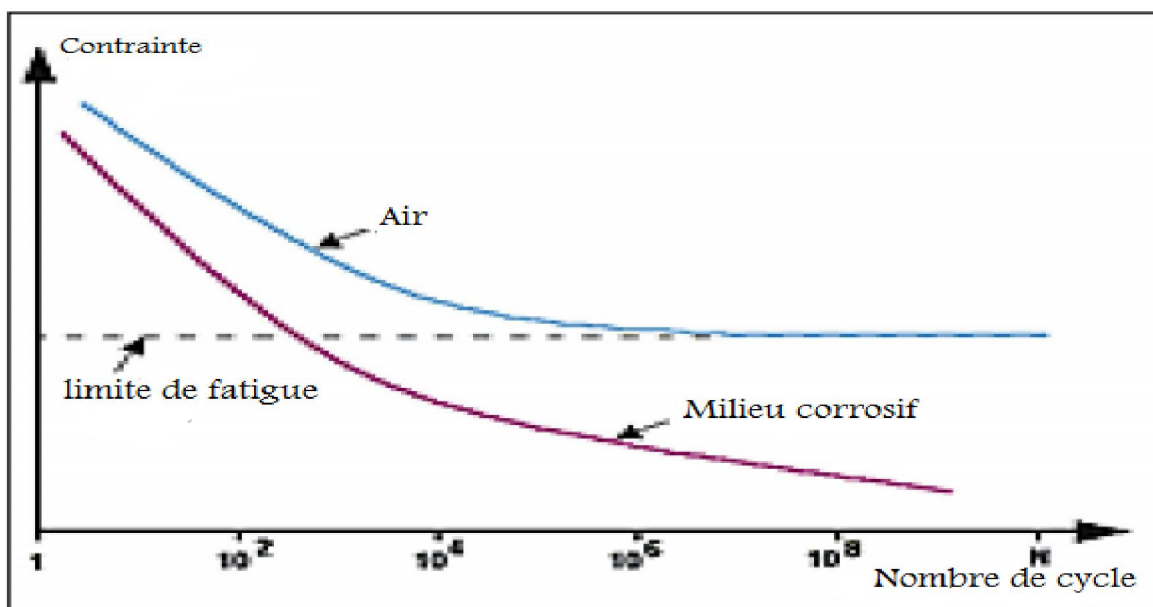


Figure I-13 : Contrainte appliquée en fonction du nombre de cycle.[5]

On peut classer ces formes de corrosion dans le tableau suivant :

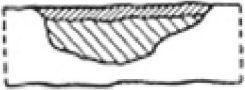



<i>Types</i>	<i>Caractéristiques</i>	<i>Exemples</i>
 1. uniforme	Attaque de toute la surface du métal. C'est la forme la plus courante	dissolution active dans l'acide; oxydation et passivité anodiques; polissage chimique et électrochimique; corrosion atmosphérique.
 2. localisée	Certains secteurs de la surface du métal se corrodent à des taux plus élevés que d'autres dus à l'hétérogénéité de surface dans le métal, l'environnement ou dans la géométrie de la structure.	Corrosion par crevasse; corrosion bimétallique ; corrosion inter granulaire.
 3. Corrosion par piqûres	Attaque fortement localisée aux secteurs spécifiques ayant pour résultat des petits puits qui pénètrent dans le métal et peuvent mener à la perforation	Corrosion par Piqûre des métaux passifs tels que les aciers inoxydables, alliages d'aluminium, etc., en présence des ions spécifiques, par exemple ions Cl^-
 4. dissolution sélective	Un composant d'un alliage (habituellement les plus actifs) est sélectivement enlevé d'un alliage	Désincification des laitons (Cu-Zn).
5. Corrosion sous contrainte	Attaque ou rupture localisée due à l'effet d'un facteur mécanique et d'une corrosion. Action conjointe de la corrosion et d'un facteur mécanique	Corrosion- Érosion, corrosion sous tension, corrosion par fatigue

Tableau I-1 : Les formes de la corrosion.

I-4- Les principaux facteurs de la corrosion :

Les phénomènes de corrosion dépendent de plusieurs facteurs qui peuvent être classés en quatre groupes principaux tels que les :

- facteurs définissant les modes d'attaque.
- facteurs métallurgiques.
- facteurs définissant les conditions d'emploi.
- facteurs dépendant du temps.

Tous ces facteurs sont représentés sur le tableau suivant :

facteurs définissant les modes d'attaque	facteurs métallurgiques	facteurs définissant les conditions d'emploi	facteurs dépendant du temps
<ul style="list-style-type: none"> - concentration du réactif - la teneur en Oxygène - PH du milieu - addition des inhibiteurs - température - pression 	<ul style="list-style-type: none"> - composition de l'alliage -procédés d'élaboration - impuretés - traitement thermiques - traitement mécaniques - additions protectrices 	<ul style="list-style-type: none"> - état de surface - forme de pièces - sollicitation mécaniques - emploi des inhibiteurs -procédés d'assemblage 	<ul style="list-style-type: none"> -vieillessement - tension mécanique - température - modifications des revêtements protecteurs

Tableau I-2 : Les principaux facteurs de la corrosion.[3]

I-4-1 Des exemples des facteurs de la corrosion :

La corrosion peut être causée par plusieurs facteurs parmi lesquels, nous avons :

I-4-1-1 Le PH :

Le PH est un facteur qui agit considérablement sur les métaux, il est très corrosif envers l'acier si, sa valeur est inférieure à 10, donc nous avons intérêt à augmenter le PH de l'eau circulant dans les canalisations (en acier surtout) tout en veillant sur son oxydation, à fin de diminuer la corrosion.

I-4-1-2 Le métal :

Parmi les métaux, l'acier qui est le plus vulnérable à la corrosion par rapport aux autres. Il est conseillé de mettre un enduit spécial à la conduite en acier, à sa partie intérieur

I-4-1-3 L'homme :

L'homme aussi a sa part dans la détérioration des constructions, en effet, il intervient :

- Dans le choix de la qualité des matériaux utilisée et le choix de remblai.
- Le mauvais emplacement.

I-4-1-4-L'hétérogénéité du terrain :

La traversée des terrains de natures différentes par une conduite, peut influencer sur la corrosion de cette dernière. Ceci est dû à des différents électrolytes et la différence de potentiel

du métal par rapport à cet électrolyte va varier. D'où la corrosion de la conduite va se déclencher.

I-4-1-5 L'hétérogénéité du métal :

L'assemblage des métaux des natures différentes peut aussi encourager la corrosion. Etant donné que la différence de potentiel de ces métaux est différente, il peut s'établir, une circulation d'électrons à l'intérieur de métaux surtout au niveau de leur liaison, le courant électrique ainsi établi, sort du métal en direction d'électrolyte et le métal se corrode.

I-5- Diagramme potentiel - pH de Pourbaix :

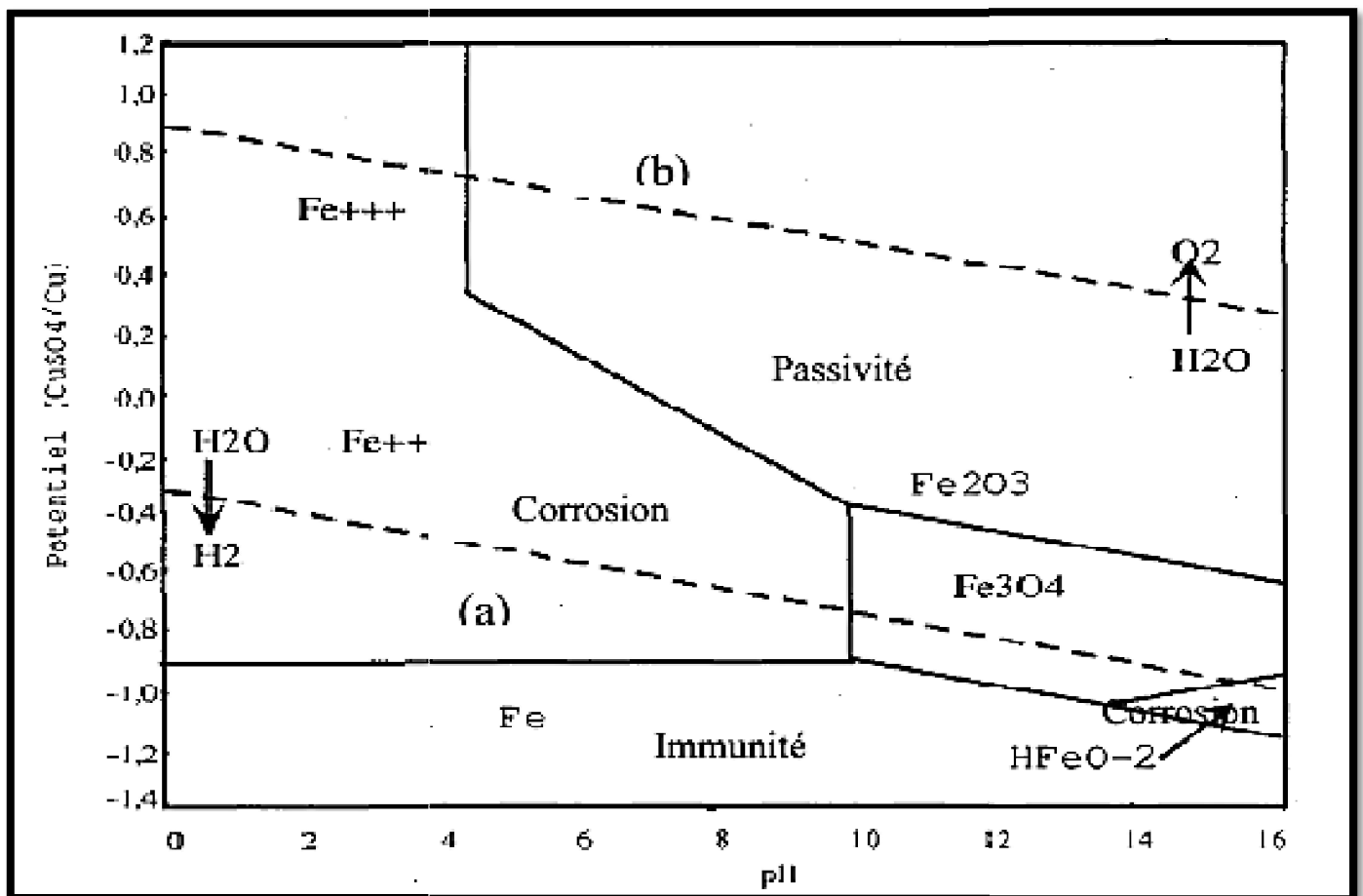


Figure I-14 : Courbe d'équilibre E-pH de Fer-eau à 25°C. [6]

Dans le diagramme précédent on peut distinguer trois domaines :

- **Domaine de corrosion**
- **Domaine de passivité**
- **Domaine d'immunité**

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

I-5-1- Domaine de Corrosion :

Le métal est corrodé, le produit de corrosion possède principalement une forme soluble.

I-5-2- Domaine de Passivité :

C'est la plage où se trouvent les différentes phases condensées sous forme d'oxydes et d'hydroxydes qui recouvrent la surface du métal et le protègent contre les attaques de corrosion. Le métal a donc été oxydé en surface mais ce film le protège d'une agression en profondeur.

La couche passive recouvrant la surface métallique est généralement très stable, compacte et fortement liée au métal. [7]

I-5-3- Domaine d'Immunité :

Le métal est stable vis-à-vis du réactif (aucune réaction n'est thermodynamiquement possible).

I-6 - Influence de l'état de surface :

L'état de surface des pièces joue un rôle très important sur le comportement du métal vis-à-vis de la corrosion, car la corrosion étant le résultat de l'action que développe à la surface du métal un liquide ou un gaz. Le degré de finition, les trous, les rayures servent souvent d'amorce à la corrosion qui se développe facilement. Il semble aussi que l'orientation de la surface dans le milieu corrodant joue aussi un rôle, ainsi que le rayon de courbure des pièces.[3]

I-7- Pile de corrosion :

Lorsque deux parties d'une surface métallique possédant un potentiel électrique différent, elles peuvent former une cellule électrochimique que l'on appelle aussi pile de corrosion.

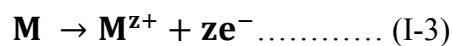
La différence de potentiel résulte d'une hétérogénéité du matériau joint de grains, ou l'environnement. En général on peut définir une cellule électrochimique comme étant un système comprenant deux électrodes, plongées dans un électrolyte.

I-8- Mécanismes de corrosion :

Bien que les formes de corrosion citées ci-dessus soient diverses, les mécanismes de base de la corrosion d'un matériau métallique en milieu aqueux ont la même origine qui est de nature électrochimique.

Ces mécanismes résultent d'un ensemble de réactions qui se produisent à l'interface métal-solution et qui mettent en jeu des électrons et des espèces chimiques. Ces réactions électrochimiques peuvent être décrites de la façon simplifiée suivante:

- Réaction anodique de dissolution du métal (M) :



- Réaction cathodique de réduction d'une espèce de l'électrolyte (O) :



L'espèce susceptible de se réduire devant être présente en quantité suffisamment importante dans le milieu.

I-9- Aspects électrochimiques de la corrosion :

Il est connu que la nature du matériau et les facteurs du milieu sont les facteurs essentiels des phénomènes de corrosion. On distingue ici deux aspects: le premier est thermodynamique qui décide de la possibilité de déroulement des réactions de corrosion, l'autre est cinétique qui s'intéresse aux mécanismes qui conditionnent la vitesse de corrosion.

I-9-1 Aspect thermodynamique :

Soit un métal M pur est homogène plongé dans un électrolyte à l'interface métal solution se forme une couche double.

La première couche compacte d'ions adsorbés :



La deuxième couche c'est une couche diffuse dont laquelle la concentration des ions métalliques est supérieure à celle dans le milieu à laquelle se mêlent des colloïdes chargés électriquement (couche de Gouy-Chapman). Cette couche double inspire un équilibre métal – solution, toute perturbation de cet équilibre par les facteurs du milieu lance le processus de corrosion. Dans le milieu (sols), le métal a tendance à atteindre un équilibre stable, cette stabilité ne peut s'atteindre que si on a un niveau d'énergie minimale. La différence de potentiel entre le métal et le milieu est donnée par la formule de Nerste:

$$E = (E_0 + (RT/nF) \ln (a(M^{+n})/m)).$$

Où : E : Potentiel du métal

E_0 : Potentiel normal du métal à la température T

R : constante des gaz parfaits

a : coefficient d'activité de l'ion métallique

(M^{+n}) concentration de la solution ions en M^{n+} (mol/l)

F : nombre de Faraday **96487** coulomb

n : Charge de l'ion métallique

La réaction sera plus spontanée dans le sens où "a" décroît, puisque les réactions de corrosion sont réversibles, le potentiel varie avec le temps, la variation d'enthalpie (ΔG) varie donc avec le temps.

I-9-2- Aspect cinétique de la corrosion :

La corrosion se traduit souvent par la formation de piles de corrosion, la vitesse de corrosion est liée directement dans de larges mesures à l'intensité du courant de corrosion. La relation entre le courant de corrosion et le potentiel peut être mise en évidence par la courbe de polarisation cathodique et anodique. [8]

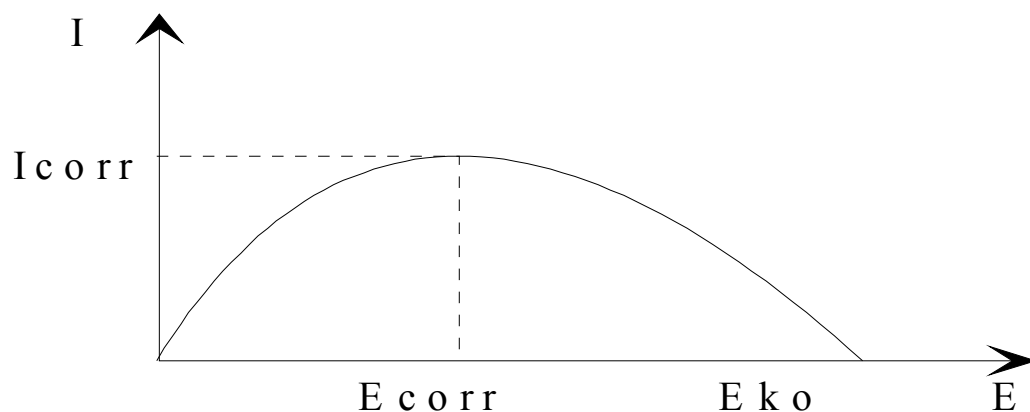


Figure I-15: courbe de polarisation (diagramme d'EVANS).

I_{cor} est le courant le plus important que peut produire la pile de corrosion.

I-10-Phénomène de passivité :

Le phénomène de passivité présente une très grande importance, elle se caractérise par la présence d'un film passif ou couche passive à la surface de l'alliage métallique qui rend sa vitesse de corrosion faible.

Le film passif, fortement solidaire du substrat métallique empêche ou rend insignifiant le contact entre l'alliage et les agents plus ou moins agressifs du milieu environnant.

I-11-La lutte contre la corrosion :

I-11-1-La prévention par une forme adaptée de la pièce :

I-11-1-1 Elimination des zones humides :

De façon générale la corrosion atmosphérique ne se produit qu'en présence d'humidité, cela dit en prévoyant un drainage plus ou moins parfait, on évite une accumulation d'humidité d'où le risque de corrosion.

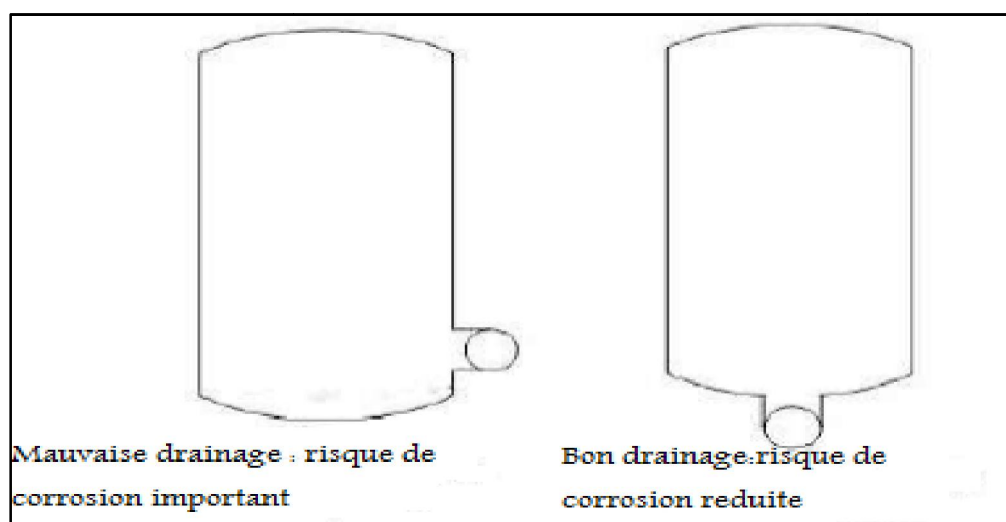


Figure I-16 : Mise en évidence des types de drainage et les risques de corrosion.

I-11-1-2-Réduction de L'effet d'érosion du fluide dans la canalisation :

En général les canalisations utilisées dans le transport des hydrocarbures admettent un revêtement interne, permettant de protéger la conduite contre toute forme de corrosion interne. Sachant que ce revêtement est le seul moyen prévu à cet effet, il est important de le sauvegarder le plus longtemps possible. Or, dans les changements brusques, au niveau des coudes, il se produit une abrasion pouvant emporter ce revêtement, mettant ainsi la surface intérieure de la conduite à nue. Pour éviter ce phénomène il est important d'éviter les coudes à angle droit, au profit d'une forme atténuant l'effet d'abrasion, permettant ainsi de réduire l'effet d'érosion.

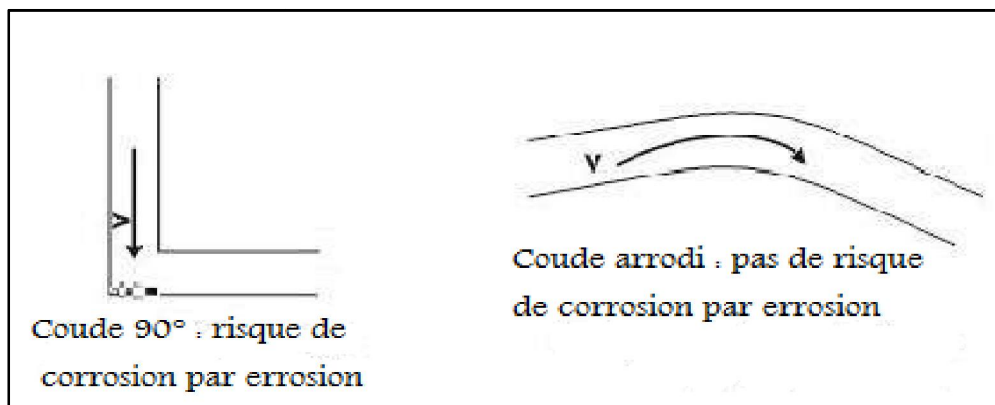


Figure I-17 : Mise en évidence des formes favorisant et évitant la corrosion par érosion.

I-11-1-3-Utilisation des joints isolants :

Dans un couplage galvanique, on distingue une zone anodique (faible potentiel) et une zone cathodique, par conséquent une circulation de courant électrique conduisant à la dégradation d'une des pièces. Pour protéger cette pièce il est nécessaire d'intercaler à la jonction bimétallique (entre les deux pièces) un raccord isolant, organe dont le rôle est de couper le circuit électrique et d'empêcher toute circulation de courant.

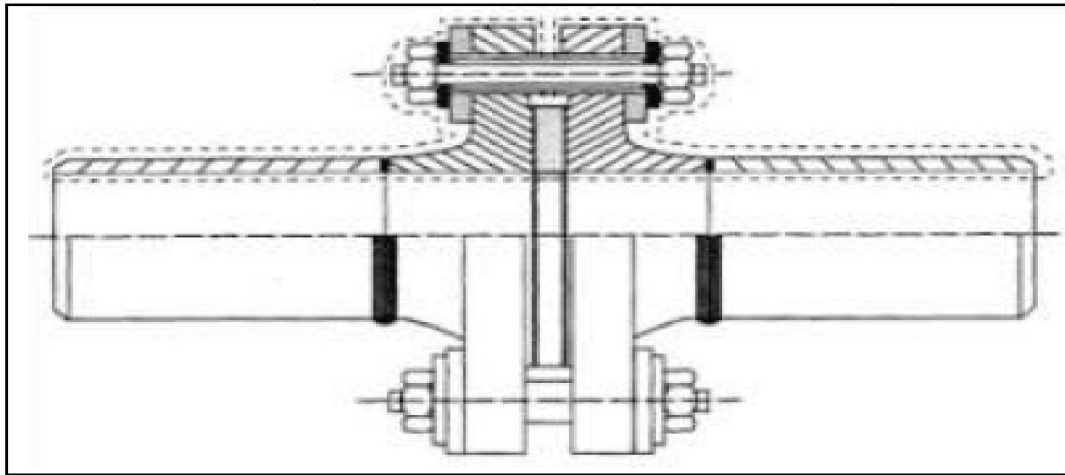


Figure I-18 : Raccord isolant à bride.

I-11-1-4-Utilisation des pièces échangeables :

Dans ce procédé, il n'est pas question d'isolation électrique, mais on utilise une pièce échangeable que l'on sacrifie au profit de l'équipement qui devrait se corroder.

Par exemple dans l'industrie chimique on a parfois des réacteurs en acier soudés à des conduites en cuivre, ainsi pour éviter la destruction du réacteur on utilise une pièce échangeable en acier qu'on intercale entre la conduite en cuivre et le réacteur. Ainsi, c'est la pièce de rechange qui joue le rôle d'anode donc qui se corrode.

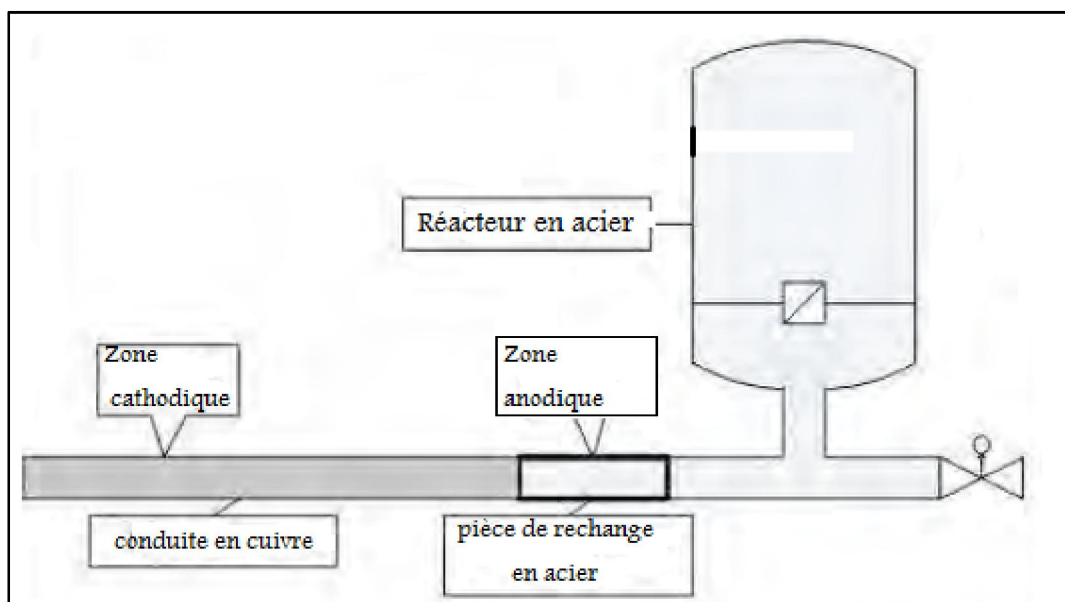


Figure I-19 : Schéma de montage de l'utilisation d'une pièce de rechange.

I-11-2-Protection par revêtements :

I-11-2-1- Protection par revêtements métalliques :

Parmi les différentes méthodes utilisées pour lutter contre la corrosion, la protection par revêtements métalliques. Selon leur comportement à la corrosion par rapport au substrat, on distingue deux types de revêtements métalliques :

- Ceux plus nobles que le substrat.
- Ceux moins nobles que le substrat.

Le chrome, le nickel ou le cuivre forment des revêtements plus nobles qu'un substrat en acier, contrairement au zinc, au cadmium ou l'aluminium. Dans les deux cas, la couche forme une barrière entre le métal de base et le milieu corrosif. Par contre, la différence se remarque à partir des pores ou des défauts dans la couche de corrosion. Un revêtement plus noble corrode localement le substrat qui joue le rôle d'anode (**figure.22a**). Les revêtements plus nobles que le substrat ne doivent donc contenir aucun défaut. En revanche, lorsque le dépôt est moins noble que le substrat (**figure .22b**), le phénomène s'inverse. Le dépôt joue le rôle de l'anode et se détériore, alors que le substrat "cathode", reste protégé. En plus, il faut noter que la durée de vie du revêtement est proportionnelle à son épaisseur. [4]

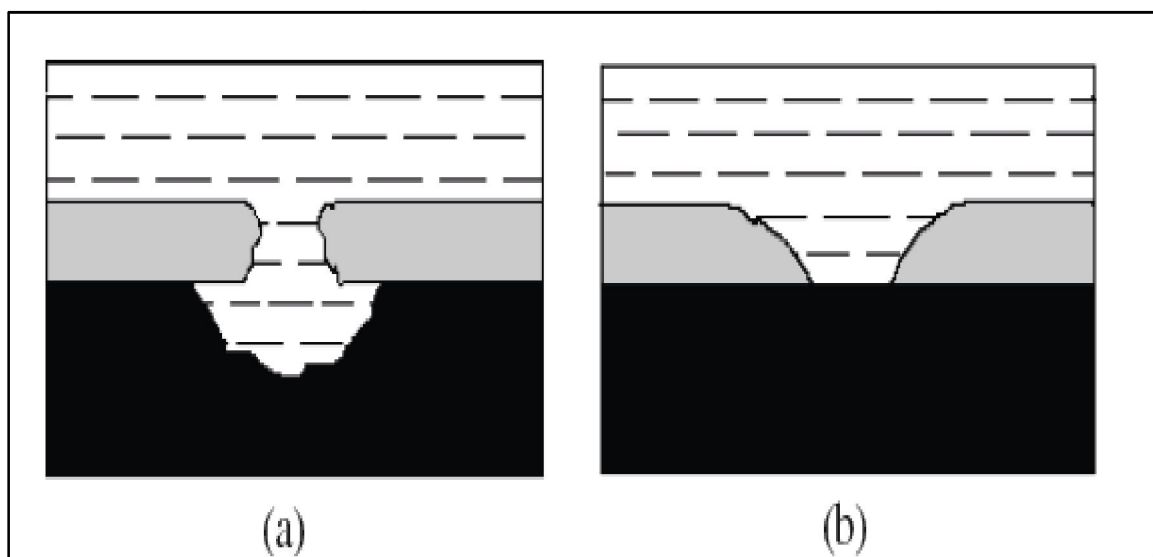


Figure I-20 : Corrosion en présence de revêtements métalliques plus nobles (a), et moins nobles (b) que le substrat.

Différentes techniques servent à fabriquer des revêtements métalliques :

- L'électrodéposition (galvanoplastie),
- Immersion dans un métal liquide (galvanisation),
- La déposition chimique,
- La déposition par projection au pistolet,
- La déposition par phase gazeuse (PVD, CVD).

I-11-2-2-Revêtements inorganiques non métalliques :

Les revêtements inorganiques non métalliques sont de deux types :

a) Les couches de conversion

Ces couches sont obtenues par une réaction du métal avec un milieu choisi ; elles contiennent donc toujours des ions provenant du substrat.

On différencie les couches de conversion selon leur procédé de fabrication, à savoir :

- L'anodisation.
- La phosphatation.
- La sulfuration.
- La chromisation.

b) Les couches étrangères au substrat :

Parmi les revêtements inorganiques non métalliques étrangères au substrat, il y a :

- Ceux plus nobles que le substrat.
- Les émaux.
- Les ciments.
- Les céramiques réfractaires.

I-11-2-3- Protection par revêtements organiques :

Les revêtements organiques forment une barrière plus ou moins imperméable entre le substrat métallique et le milieu, et on les classe en trois familles [9]:

- Revêtements en bitume.
- Revêtements polymériques.

- Peintures et vernis.

I-11-3-Protection par les inhibiteurs de corrosion :

Les inhibiteurs de corrosion sont des substances qui ajoutées en très faible quantité dans le milieu corrosif, diminuent la vitesse de corrosion en modifiant la nature de l'interface :

Substrat métallique/électrolyte.

On peut classer les inhibiteurs de différentes façons :

- Par domaine d'application.
- Par réaction partielle.
- Par mécanisme réactionnel.

I-11-4-Protection contre la corrosion par courant vagabond :

En général il est rarement possible d'intervenir sur les zones d'entrées des courants vagabonds dans une structure. C'est donc au niveau de la sortie de ce courant que l'on agit. Le montage consiste à imposer le passage du courant dans un circuit préférentiel contrôlé et non plus à travers le terrain. Pour cela on établit une liaison polarisée entre la conduite et le chemin de fer (rail). Un système de régulation est ajouté au montage afin de limiter le courant.

Ce dispositif s'appelle « drainage de courant ». Une installation de drainage doit également comporter un élément permettant le passage du courant dans un seul sens, notamment de la structure métallique vers le rail.

On distingue deux types de drainage :

- Drainage à diode au silicium : c'est le plus utilisé actuellement, suite à sa simplicité.

La structure métallique est reliée à la liaison de retour par l'intermédiaire d'une diode ; le courant ne peut passer que dans le sens structure-liaison de retour.

- Drainage à contacteur : un boîtier électronique mesure la différence de potentiel entre le rail et la structure métallique ; lorsque le potentiel du rail est négatif, le contacteur ferme la liaison et le courant peut circuler de la structure vers le rail. Lorsqu'il y a inversion du courant, le boîtier électronique commande le contacteur à l'ouverture et le rail est alors isolé de la structure.

I-11-5-Protection cathodique :

La protection cathodique doit fonctionner pendant la durée de vie de l'ouvrage et maintenir la totalité de la surface exposée à l'électrolyte au delà d'un seuil d'immunité dépendant de la nature du métal. Par ailleurs le niveau de potentiel doit demeurer en deçà d'une limite pour éviter une dégradation des propriétés mécaniques (fragilisation par l'hydrogène d'un acier à haute résistance) ou du revêtement (décollement/alkalinisation). L'analyse préalable des paramètres de l'électrolyte et de l'ouvrage est essentielle pour sa conception.

La sélection entre systèmes par anodes galvaniques et courant imposé s'opère à partir de critères technico-économiques:

- Techniques: besoins en courant, durée de vie, nature et conductivité de l'électrolyte, types et configuration de l'ouvrage, présence d'énergie basse tension et d'influence continue externe.
- Économiques: investissement (équipements et travaux), coût d'exploitation (énergie, surveillance, entretien, renouvellement).

L'absence d'énergie électrique basse tension (ouvrages en mer, dans une zone peu habitée ou désertique) conduit naturellement à envisager un système de protection cathodique par

Anodes galvaniques. Ces dernières, en alliage plus électronégatif que le métal de l'ouvrage, sont connectées à celui-ci pour constituer une pile naturelle de faible tension dont la capacité en courant dépend de l'alliage et de leur poids. Cependant il ne suffit pas que la masse anodique installée corresponde à la capacité voulue, il faut également que l'intensité débitée, liée aux dimensions et à la résistivité, réponde aux besoins en courant de l'ouvrage.

L'utilisation économique d'un tel système se limite généralement à une faible surface, à un électrolyte très conducteur (eau de mer) ou à une protection provisoire de quelques mois.

Dans les autres cas, un système par courant imposé est plus adapté bien qu'il nécessite une source d'énergie, alimentation électrique (réseau basse tension disponible dans la majorité des cas) ou autonome (panneaux solaires + batteries, groupes diesel, thermo-générateurs à gaz).

L'ouvrage est alors connecté au pôle négatif du circuit continu du redresseur, une masse anodique étant reliée au pôle positif.

La comparaison financière entre les deux systèmes, souvent limitée au seul investissement initial, révèle d'une part un coût faible par rapport à celui de l'ouvrage et d'autre part des écarts significatifs [9].

I-11-6-Protection anodique :

Certains métaux tels que le fer et les aciers inoxydables peuvent aussi être protégé efficacement en les plaçant en anodes et en augmentant leur potentiel dans le domaine passif de la courbe de polarisation anodique. [10].

La protection anodique a trouvé une application dans la protection des réservoirs contenant en particulier de l'acide sulfurique, mais la méthode est applicable à d'autres acides, par exemple l'acide phosphorique et aux alcalises et certaines solutions salines.

Puisque la passivité du fer et des aciers inoxydables est détruite par les ions halogènes, la protection de ces métaux n'est pas adaptable à l'acide chlorhydrique ou aux solutions chlorées et si Cl devait contaminer l'électrolyte, le danger de formation des piqûres deviendrait important même si d'un autre côté ces métaux pouvaient être rendus passifs.

La méthode est applicable seulement aux métaux et alliages qui deviennent rapidement passifs quand ils sont polarisés anodiquement sous de faibles densités de courant.

Il est typique de constater que la vitesse de corrosion sous protection anodique, bien que faible, n'ai jamais réduite à zéro, tandis que pour l'acier protégé cathodiquement la vitesse peut être nulle.

On a signalé pour la protection anodique que le pouvoir couvrant dépasse de très loin celui que l'on obtient en protection cathodique. La cause a été attribuée à la résistance élevée du film passif, mais ceci est probablement incorrect car des mesures ont montré que de telles résistances sont faibles [11].

Conclusion :

A partir de ce chapitre ,on peut conclure que la corrosion est un sujet très délicat vis-à-vis de la multiplicité de mode d'apparition régis par des différents facteurs liés à la nature du matériau et l'environnement . Donc l'intérêt s'est dirigé vers la recherche des matériaux destinés à être employé dans des milieux corrosifs.