



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET METALLURGIE – AMAR
LASKRI-ANNABA

Département Sciences & Génie de Matériaux (SGM)

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme d'INGENIEUR d'ETAT

Thème

*Etude des causes de la corrosion des bacs de stockage de
pétrole*

Présenté par :

Mr. KHERBICHE Douadi

Mr. KEMER Younes

Encadré par :

Pr. TOUHAMI Mohamed Zine

Année universitaire : 2019/2020

Introduction générale :

La corrosion des métaux regroupe de multiples phénomènes liés au milieu dans lequel elle se déroule. Ces phénomènes dépendent d'un grand nombre de facteurs qui interviennent non pas individuellement, mais en relation plus ou moins complexe les uns avec les autres (la nature et la structure du matériau, l'environnement et ses caractéristiques chimiques, la température...etc.).

Les moyens de lutte contre la corrosion sont multiples et doivent être appropriés à chaque cas. La prévention passive demeure la meilleure solution pour éviter la corrosion des installations métalliques.

La manière la plus commune d'empêcher un métal de se corroder ou de retarder sa corrosion, est d'appliquer un revêtement imperméable sur sa surface. Si la couche du revêtement fournit une barrière protectrice parfaite au métal dans un environnement corrosif, alors ni l'oxygène, ni l'eau ne pourront atteindre sa surface et la corrosion sera finalement empêchée. Le rôle du revêtement est donc de limiter le flux de ces produits (oxygène, eau) en créant une barrière physique.

Malheureusement, la plupart des revêtements, tels que les peintures, ne sont pas de parfaites barrières contre la corrosion et ne protègent donc pas les métaux par suite de l'existence des défauts ou de diffusion de l'oxygène et de l'eau à travers eux. Pour toutes ces raisons, il est nécessaire de recourir à d'autres méthodes de protection des métaux, telles que, les inhibiteurs de corrosion, la protection anodique et la protection cathodique. [1]

Chapitre 1 : Etude bibliographique

I. Notions de corrosion des métaux :

1. Introduction :

Comme tous les matériaux de construction, l'acier tend à se dégrader superficiellement lorsqu'il est soumis à des milieux corrosifs comme le sol, l'air et le milieu marin. La corrosion est la détérioration des matériaux par interaction physico-chimique avec leur environnement, entraînant des modifications de propriétés du métal souvent accompagnées d'une dégradation fonctionnelle de ce dernier (altération de ses propriétés mécaniques, électriques, etc.). Les mécanismes mis en jeu sont divers et conduisent à des formes différentes de corrosion. [1]

2. Définition de la corrosion :

La corrosion est une réaction chimique ou électrochimique entre un matériau, généralement un métal, et son environnement qui entraîne une dégradation du matériau et de ses propriétés. La corrosion désigne 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, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs. La corrosion représente donc tout processus de dégradation des matériaux métalliques, ou de leurs propriétés, par suite d'une réaction avec le milieu environnement [2]

3. Les différentes formes de la corrosion :



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 (ternissement).

Figure 1 Corrosion générale (rouille) d'une pièce en acier



2. CORROSION LOCALISÉE :

Ce phénomène survient au contraire lorsque le matériau est mis en présence d'un environnement présentant vis à vis de lui un comportement sélectif.

Cette sélectivité peut avoir des origines multiples tant au niveau du matériau (alliage hétéro phase, présence d'inclusions, protection de surface localement défectueuse, matériau bimétallique...) qu'au niveau de l'environnement (variation locale de composition, de pH ou de température) [3]

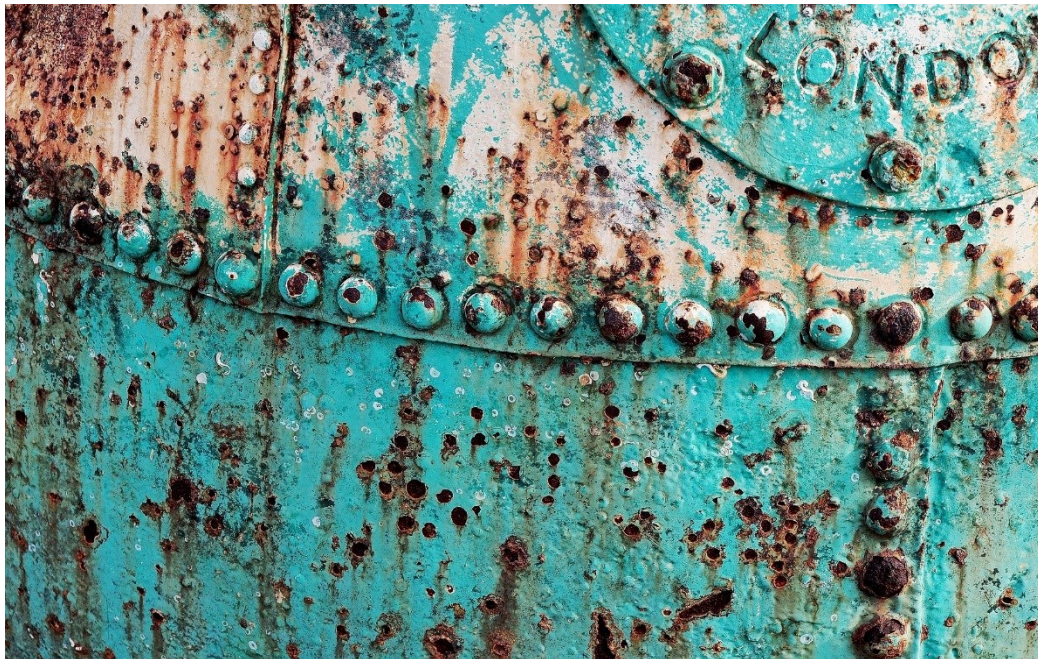


Figure 2 Corrosion localisée d'un acier

Cette forme de corrosion s'effectue dans quelque point de surface d'un matériau, les chercheurs ont subdivisé ce type de corrosion en dix catégories :

Corrosion par piqûre :

Cette forme de corrosion est particulièrement insidieuse. L'attaque se limite à des piqûres, très localisées et pouvant progresser très rapidement en profondeur, alors que le reste de la surface reste indemne. L'installation peut être perforée en quelques jours sans qu'une perte de poids appréciable de la structure apparaisse. [3]

Les solutions les plus agressives contiennent des chlorures, bromures, hypochlorites. Les iodures et les fluorures sont beaucoup moins actifs. La présence de sulfures et d' H_2S exacerbe les problèmes de corrosion par piqûres en abaissant systématiquement les critères de résistance. La présence d'un cation oxydant (Fe^{+3} , Cu^{+2} , Hg^{+2} , ...) permet la formation des

piqûres même en absence d'oxygène. L'espèce thiosulfate joue d'ailleurs un rôle apparenté car sa réduction électrochimique conduit à une "sulfuration" des surfaces métalliques exposées. [3]



Figure 3 Corrosion par piqûres sur la paroi d'une cuve en acier inoxydable austénitique Cr18-Ni10

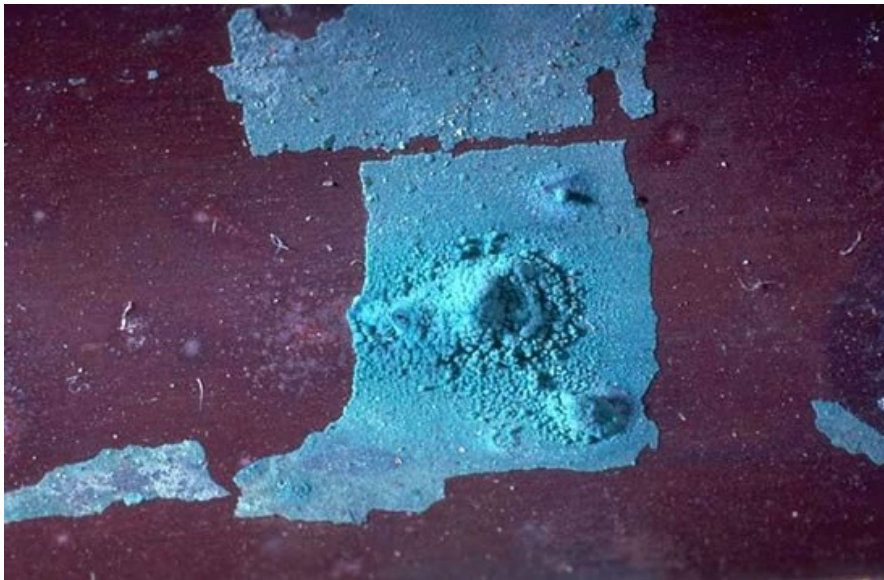


Figure 4 Corrosion par piqûres de type1 du cuivre dans de l'eau froide

La corrosion galvanique :

C'est une des formes les plus courantes de corrosion en milieu aqueux. Est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux matériaux dans laquelle une des électrodes (l'anode) se consomme au bénéfice de l'autre (la cathode) qui reste intacte.

Cette sélectivité des réactions est due à une hétérogénéité provenant soit du matériau, soit du milieu ou des conditions physicochimiques à l'interface [3].



Figure 6 Corrosion galvanique d'une pièce

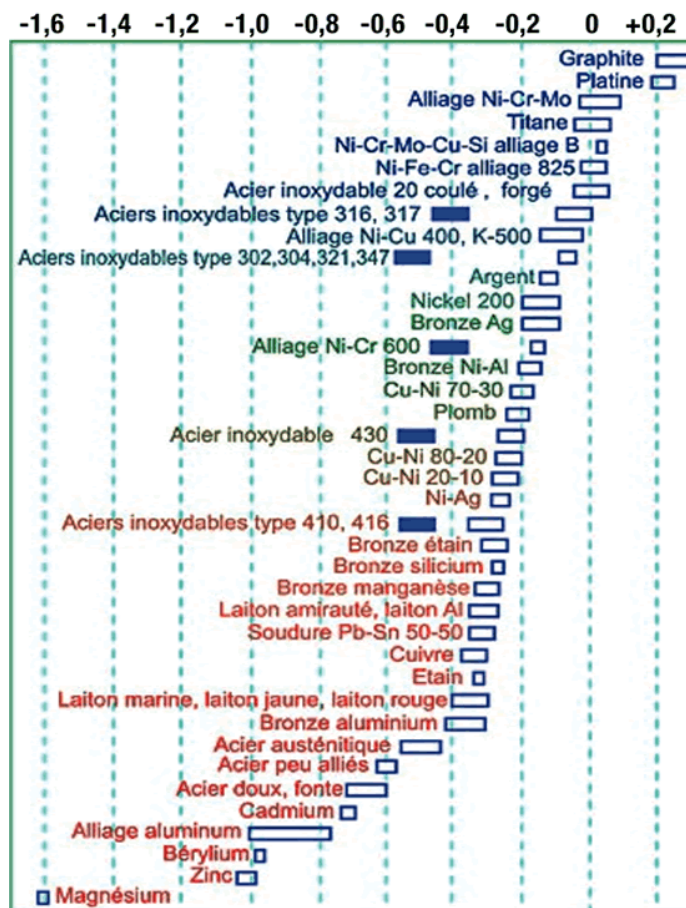
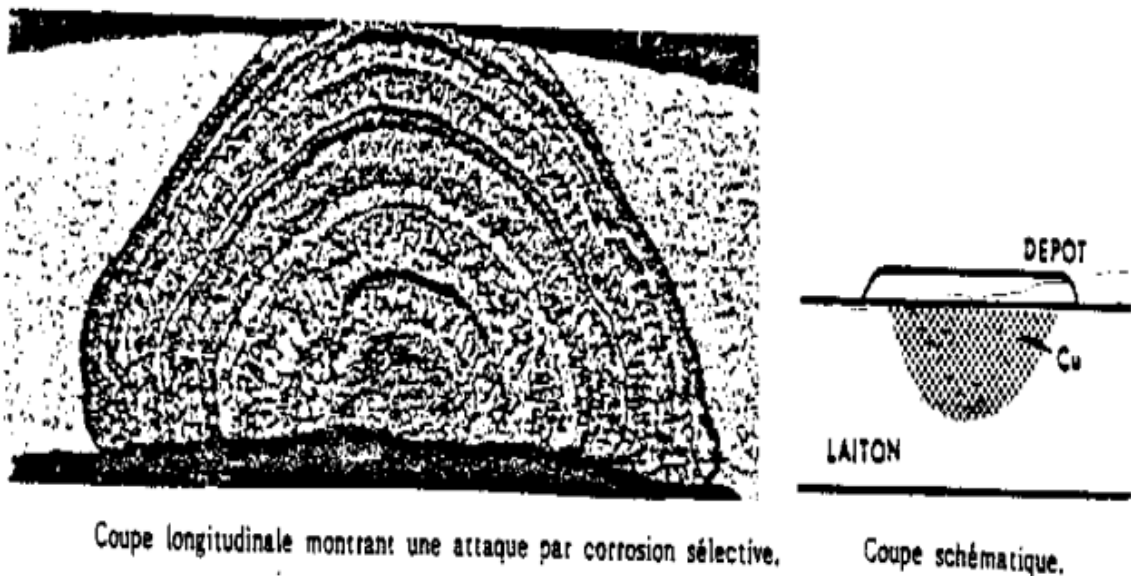


Figure 5 Série galvanique du graphite et de divers métaux et alliages dans l'eau de mer [3]

Corrosion 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. [3]

Cette forme de corrosion est due à l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse. [5]



Coupe longitudinale montrant une attaque par corrosion sélective.

Coupe schématique.

Figure 7 Coupe longitudinale montrant une attaque par corrosion sélective [6]

Corrosion intergranulaire

Dans certaines conditions, les joints de grains sont le siège d'une corrosion localisée très importante alors que le reste du matériau n'est pas attaqué. L'alliage se désagrège et perd toutes ses propriétés mécaniques. Ce type de corrosion peut être dû soit à la présence d'impuretés dans le joint, soit à l'enrichissement (ou l'appauvrissement) local en l'un des constituants.

Par exemple, de petites quantités de fer dans l'aluminium (métal dans lequel la solubilité du fer est faible), vont ségréger au niveau des joints de grains et peuvent provoquer la corrosion intergranulaire (La corrosion feuilletante des alliages d'aluminium laminés se développe dans la plupart des cas de façon intergranulaire). Mais l'exemple le plus important est lié à la déchromisation aux joints de grains des aciers inoxydables. [3]



Figure 8 Corrosion feuilletante d'une canalisation en alliage d'aluminium véhiculant de l'eau

Corrosion Caverneuse :

Cette forme d'attaque est généralement associée à la présence de petits volumes de solution stagnante dans des interstices, sous des dépôts et des joints, ou dans des cavernes ou crevasses, par exemple sous les écrous et têtes de rivets. Le sable, la poussière, le tartre, les produits de corrosion sont autant de corps solides susceptibles de créer des zones dans lesquelles le liquide n'est que difficilement renouvelé. C'est aussi le cas des joints en matériau souple, poreux ou fibreux (bois, plastique, caoutchouc, ciment, amiante, tissus, ...).

La corrosion caverneuse se rencontre surtout sur les métaux et alliages dont la tenue dépend de la stabilité du film passif, car ces films sont instables en présence de concentrations élevées en Cl^- et H^+ .

Le mécanisme de base à l'origine de la corrosion caverneuse des alliages passivables en milieux chlorurés aérés est une acidification progressive du milieu dans la caverne avec l'apparition de conditions locales du milieu très agressives qui détruisent la passivité. [3]

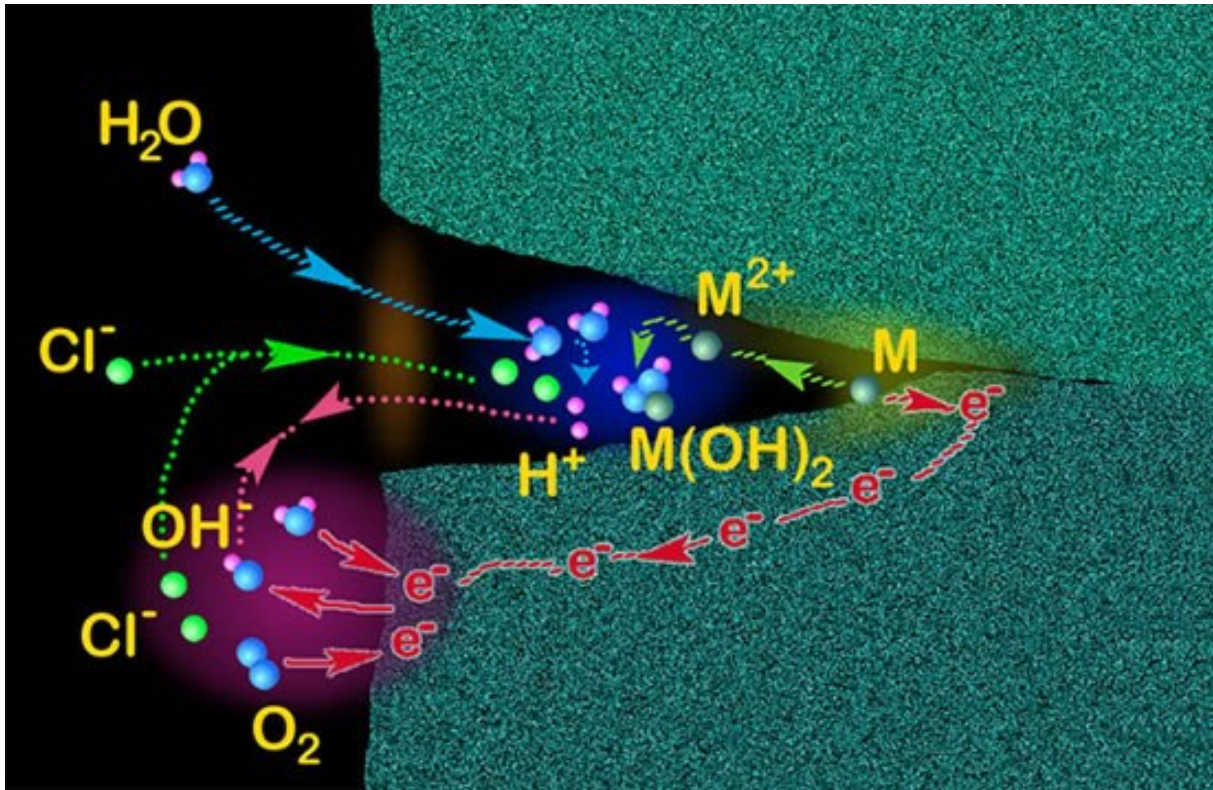


Figure 9 Mécanisme de la corrosion Caverneuse [3]



Figure 10 Corrosion caverneuse d'un acier allié sous un joint [3]

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. On a apparition de sillons, vallées, surfaces ondulées, trous..., ayant un aspect directionnel caractérisé (queue de comète, sabot d'un cheval...). La plupart des métaux et alliages y sont sensibles, en particulier les métaux mous (cuivre, plomb...) ou ceux dont la résistance à la corrosion dépend de l'existence d'un film superficiel (aluminium, aciers inoxydables).

Les phénomènes de turbulence peuvent détruire les films protecteurs et entraîner des vitesses de corrosion très élevées sur des matériaux, par ailleurs, très résistants en conditions statiques. Les moyens pour réduire cette corrosion sont de choisir un matériau plus résistant, d'adapter le dessin de l'installation ou encore d'agir sur le milieu (teneur en oxygène, température, inhibiteurs, etc.). [3]



Figure 11 Corrosion-érosion d'un tube en cuivre véhiculant de l'eau [3]



Figure 12 Corrosion cavitation d'une aube de pompe en alliage de nickel Hastelloy C276 en milieu acide chlorhydrique [3]

Corrosion frottement (tribocorrosion)

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). [3]

En présence d'un mouvement de frottement continu en milieu corrosif, on utilise de préférence le vocable de tribocorrosion.

Les moyens de réduire cette corrosion sont :

- Une lubrification par des huiles ou graisses : le frottement est réduit, l'oxygène est exclu de l'interface.
- Une augmentation de la dureté de deux alliages en contact. Certains couples ont de meilleures aptitudes au frottement que d'autres ; les traitements de durcissement superficiel sont parfois favorables.
- Un emploi de joints permettant d'absorber les vibrations et d'exclure l'oxygène et/ou l'humidité.
- Une diminution des charges de frottement dans certains cas. Dans d'autres, au contraire, augmentation de ces charges afin d'atténuer les vibrations.
- Une modification de l'amplitude du mouvement relatif entre les deux surfaces en contact. [3]

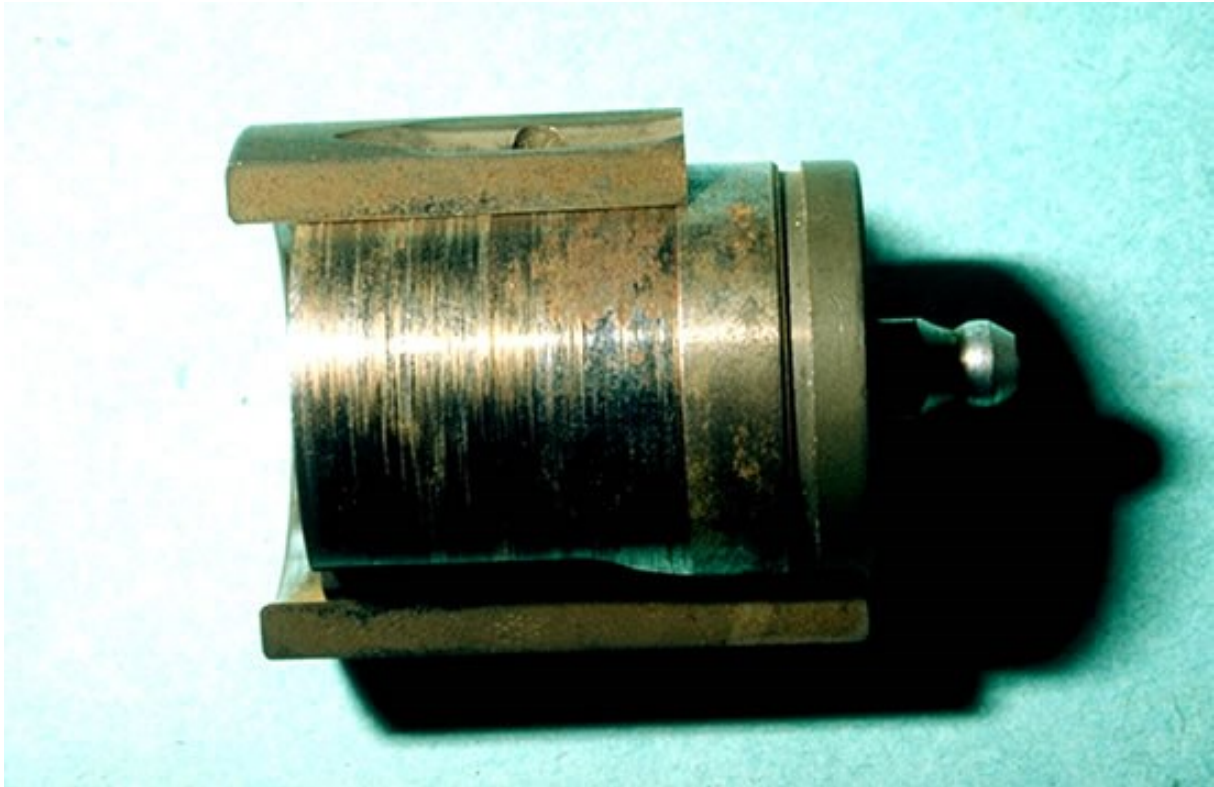


Figure 13 Corrosion frottement d'une pièce en acier [3]

Corrosion sous contrainte mécanique (C.S.C.) :

Ce type de corrosion se définit comme un processus de développement de fissures, pouvant aller jusqu'à la rupture complète de la pièce sous l'action combinée d'une tension mécanique et d'un milieu corrosif. Ce sont les contraintes de tension, d'où le nom donné parfois à ce mode de corrosion, qui sont dangereuses, les contraintes de compression exerçant au contraire une action protectrice.

La corrosion sous contrainte mécanique (CSC) se produit la plupart du temps dans des milieux peu ou non agressifs à l'égard du métal ou de l'alliage en l'absence de toute contrainte (par exemple eau et vapeur à haute température pour les aciers inoxydables austénitiques). Les pertes en poids sont généralement très faibles et sans commune mesure avec l'ampleur des dégâts. Cette forme de corrosion est de grande importance du point de vue pratique : elle constitue un risque permanent dans de nombreuses installations industrielles, tant sur le plan des incidences économiques que sur les aspects sécuritaires (personnel, fiabilité des équipements, respect de l'environnement).

Les moyens pour réduire cette corrosion sont l'élimination des contraintes résiduelles par traitements thermiques de détente, l'épuration du milieu, l'action sur le matériau ou l'état de surface ou l'application des moyens de protection extérieurs : protection cathodique, inhibiteurs ou revêtements. [3]



Figure 14 Stress corrosion cracking in a welded alloy steel structure (stresses induced by welding) [3].

Corrosion-fatigue :

La corrosion-fatigue se distingue de la CSC par le fait que les contraintes appliquées ne sont plus statiques, mais cycliques (efforts périodiques alternés). La teneur en oxygène du milieu, sa température, son acidité, sa composition ont une grande influence sur la sensibilité d'un matériau à ce mode de corrosion.

Quoiqu'il n'y ait pas de relation directe entre la sensibilité à ce type de corrosion et les caractéristiques mécaniques du matériau, les alliages à haute résistance mécanique sont souvent les plus sensibles.

La corrosion-fatigue peut être éliminée ou réduite en diminuant les contraintes, soit par un recuit de détente, soit en modifiant la conception de l'appareil, soit enfin par des traitements mécaniques comme le grenailage (ou microbillage) qui introduisent des contraintes superficielles de compression. [3]

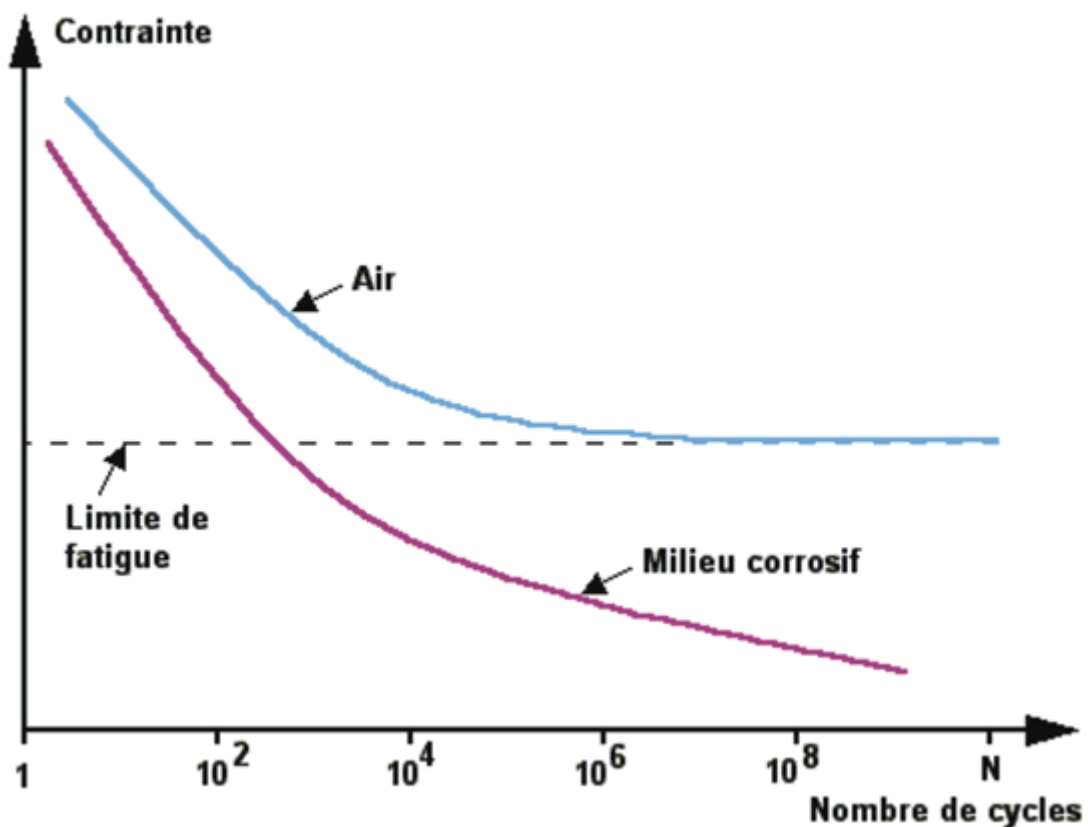


Figure 15 Contrainte appliquée en fonction du nombre de cycles [3]

Fragilisation par l'hydrogène :

La présence d'hydrogène dans un réseau métallique peut entraîner d'importantes détériorations du métal avec chute catastrophique de ses propriétés mécaniques. Ces atomes d'hydrogène ont pour origine : l'atmosphère environnante, les procédés d'électrolyse et la corrosion électrochimique. [3]

Une fois qu'il a pénétré dans le réseau, l'atome d'hydrogène peut provoquer plusieurs types de dégâts :

- Précipitation sous forme d'hydrures : c'est le cas du titane et d'autres métaux très réactifs vis-à-vis de l'hydrogène (Ta, Zr, V, PCI...).
- Recombinaison sous forme d'hydrogène moléculaire : lorsque le métal présente des défauts macroscopiques ou microscopiques, les atomes d'hydrogène peuvent s'y recombinaison. On peut alors atteindre des pressions considérables qui conduisent à des cloques, des boursouflures, des cohésions en "marches d'escalier" ou même des éclatements (hydrogen blistering).
- Fragilisation (hydrogen embrittlement) : par interaction avec les dislocations du réseau, les atomes d'hydrogène entraînent une diminution importante de la capacité de déformation plastique du métal qui devient fragile. [3]

Les moyens pour prévenir la fragilisation sont de réduire la vitesse de corrosion, de modifier les conditions d'électrolyse, de changer l'alliage, de souder convenablement, etc. [3]



Figure 16 Cloquage lié à une surprotection cathodique d'une canalisation pétrolière. [3]

4. Les différents types de la corrosion :

Les phénomènes de corrosion peuvent se développer suivant différents processus : corrosions chimique, électrochimique, biologique et corrosion accompagnée d'érosion. [7]

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. Il est très difficile de donner un exemple de corrosion chimique pure par un liquide puisque celle-ci est le plus souvent accompagnée d'une corrosion électrochimique. Cette dernière se manifeste lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal, soit dans le réactif. L'existence de ces hétérogénéités détermine la formation de piles, et un courant électrique circule entre anodes et cathodes, les zones constituant les anodes étant attaquées.

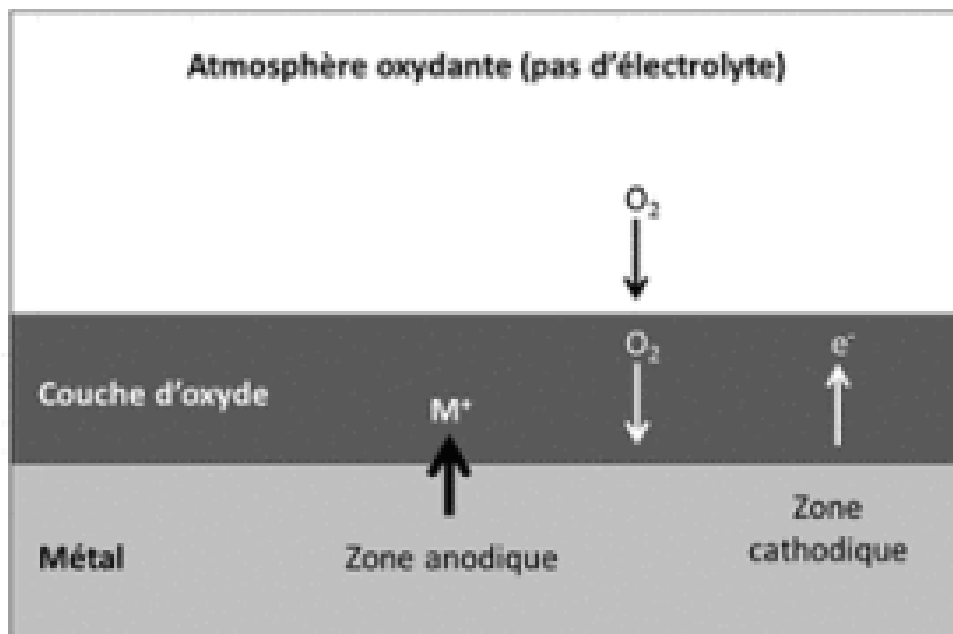


Figure 17 : Mécanisme de la corrosion atmosphérique



Figure 18 Corrosion chimique : effets sur les rivets et les inserts

2- Corrosion biochimique :

La corrosion biochimique correspond à l'attaque directe ou indirecte des métaux par des bactéries. Celles-ci peuvent produire des composés, par exemple le dioxyde de carbone, l'anhydride sulfureux ou des acides organiques qui attaquent le métal. Certaines bactéries comme « *Desulfovibrio desulfuricans* » réduisent les sulfates en soufre, et le sulfure de fer peut se former. L'attaque bactérienne apparaît en particulier dans les canalisations enterrées. [7]



Figure 19 Exemple de bactéries responsable de la corrosion bactérienne et corrosion dentaire.

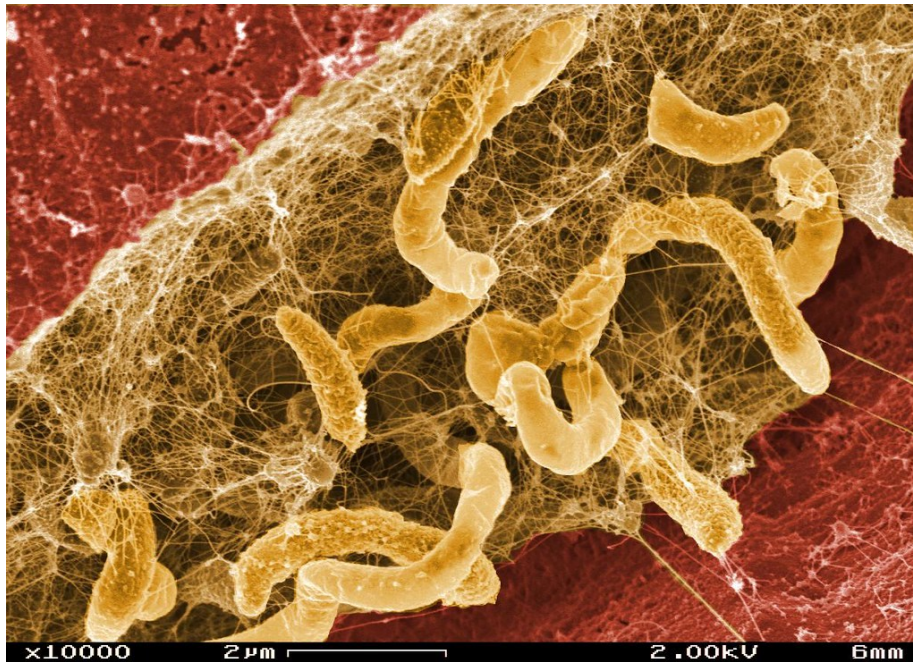


Figure 20 Biofilm of *Desulfovibrio Desulfuricans*

3- Corrosion accompagnée d'érosion :

La présence de produits de corrosion adhérents et continus à la surface des métaux a souvent pour effet de ralentir le processus de corrosion. Si cette couche est éliminée en certains points par le mouvement du milieu environnant ou par les particules solides qu'il contient, il y a accélération de la corrosion, on dit qu'il y a corrosion par érosion. [7]

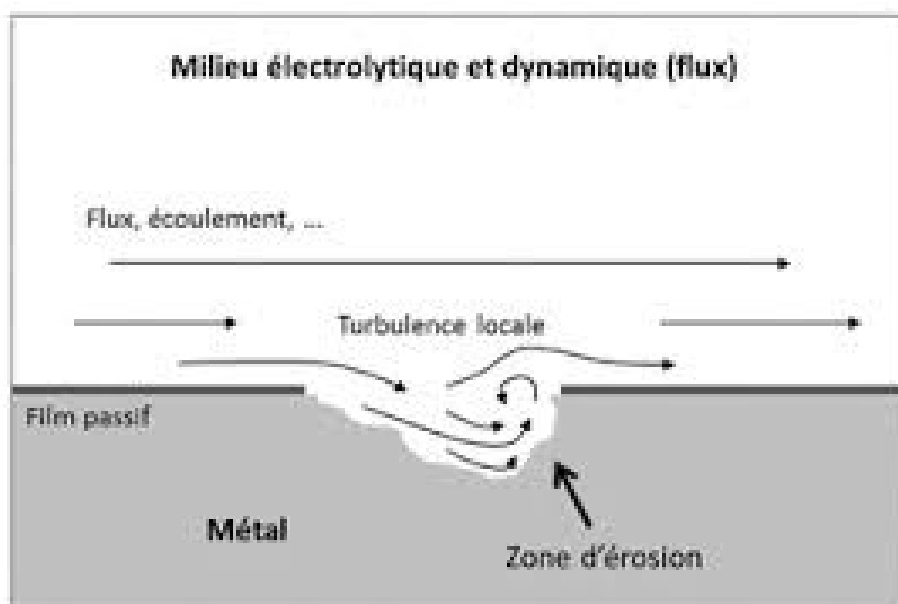


Figure 21 Aspect et mécanisme de la corrosion-érosion

4- Corrosion électrochimique :

C'est une réaction électrochimique entre la surface d'un matériau et un liquide électrolyte. Cette réaction est accompagnée de la formation de piles qui sont le siège de circulation de courant électrique. La dégradation de l'aluminium par l'acide sulfurique dilué appartient à ce type de corrosion. [1]

La corrosion électrochimique fait appelle à la fois à une réaction chimique et un transfert de charges électriques (circulation d'un courant). Cette corrosion nécessite la présence d'un agent réducteur (H_2O , O_2 , H_2 , etc.), sans celui-ci la corrosion du métal ne peut se produire. La corrosion électrochimique d'un matériau correspond à une réaction d'oxydo-réduction, dont :

- La réaction d'oxydation d'un métal est appelée réaction « anodique »
- La réaction de réduction d'un agent oxydant est appelée réaction « cathodique ». [8]

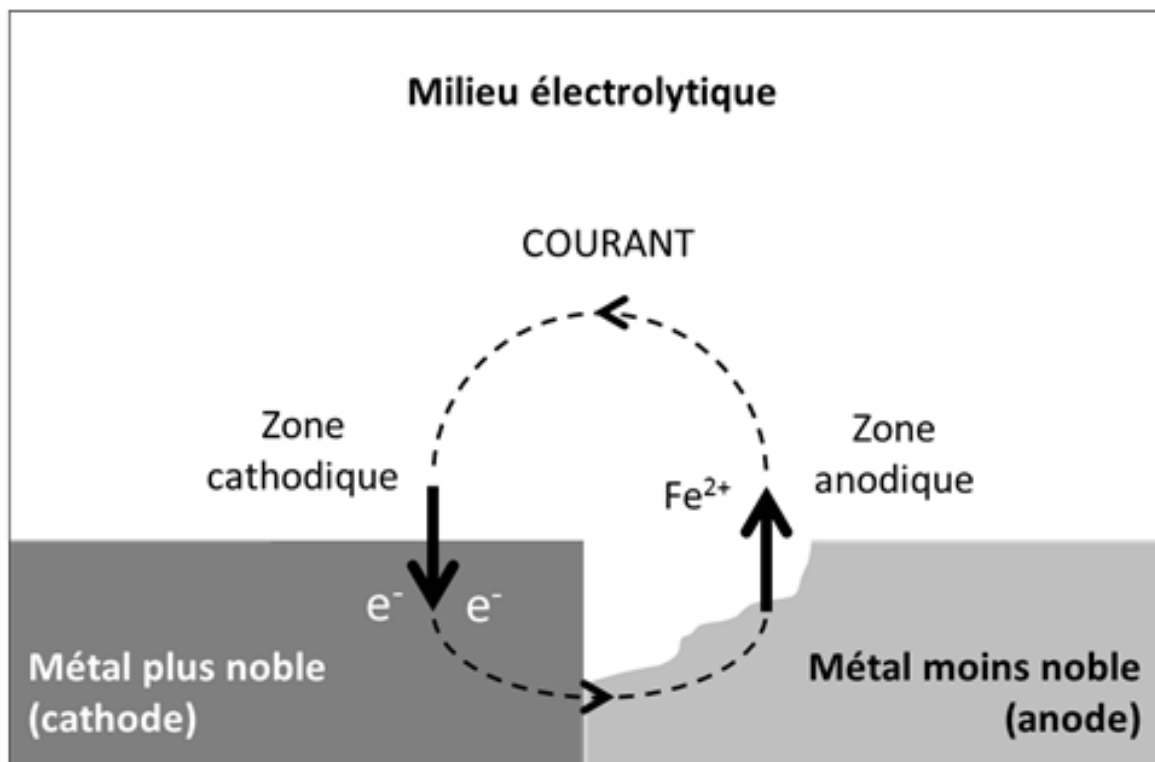


Figure 22 La corrosion des matériaux métalliques en eau de mer corrosion galvanique

5. Facteurs de corrosion :

Les phénomènes de la corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs et ils peuvent être classés en quatre groupes principaux :

Facteur dépendant du temps	Facteurs définissent les conditions	Facteurs métallurgiques	Facteurs de milieu corrosif
- Vieillessement -Tensions mécaniques - Modification des revêtements protecteurs	- Etat de surface - Forme des pièces - Emploi d'inhibiteur - Procédés d'assemblage	- Composition de l'alliage - Procédés d'élaboration - Impuretés - Traitement thermique	- Concentration du réactif - Teneur en oxygène - PH du milieu - Température - Pression

5.1. Effet de l'acidité :

La présence des acides dans le milieu augmente l'agressivité des attaques de ce dernier envers le métal. Dans le pétrole brut et ses dérivés, on peut trouver une grande quantité et variété d'acides, parmi les plus répandus, on a :

- L'acide chlorhydrique se forme par hydrolyse des chlorures à haute température (120-180°C). Il est présent dans les colonnes de distillation et dans les condenseurs. Il est aussi utilisé pour l'acidification des puits.
- L'acide sulfurique, est utilisé en grande quantité dans de nombreuses opérations, telles que l'alkylation et la polymérisation.
- Les acides naphthéniques : Ces composés cycliques saturés n'ont pas d'action directe sur la corrosion en tête de tour mais au niveau du brut, ils favorisent l'hydrolyse du chlorure de sodium à un niveau de température où elle ne se produirait pas. Compte tenu du fait que le NaCl représente 80% de la teneur en sels des bruts, la quantité de HCl ainsi générée n'est pas négligeable.

Parmi les acides qui causent d'énormes problèmes de corrosion dans les systèmes de production, de transport et de stockage des hydrocarbures, les gaz acides tel que : CO₂ et H₂S

5.2. La salinité :

La salinité de l'eau contenue dans les gisements de pétrole est très élevée (plus de 3 à 4 fois celle de l'eau de mer). La concentration de chlorure de sodium constitue, à lui seul, 80 à 85% de la salinité globale et peut parfois atteindre et même dépasser les conditions de saturation. Les chlorures sont des ions agressifs, souvent à l'origine de corrosion localisée, leur présence en solution s'accompagne d'effets complémentaires, d'une part, leur concentration locale induit une acidification du milieu et d'autre part, la salinité a une influence sur la conductivité du milieu aqueux.

Le paramètre important de la corrosion par les chlorures est la teneur en oxygène. En effet, en l'absence totale d'oxygène, la corrosion d'une eau chlorurée peut-être très faible si les conditions de non agressivité carbonique de l'eau sont réunies.

L'influence de la concentration en NaCl sur la corrosion du fer dans l'eau saturée en oxygène à température ambiante, La vitesse de corrosion augmente rapidement avec la concentration pour atteindre un maximum à 3%, puis elle décroît. Cette dernière devenant inférieure à celle mesurée dans l'eau distillée quand la saturation est atteinte (260 g/l) et cela est expliqué, selon Tostmann, par la diminution de la solubilité de l'oxygène.

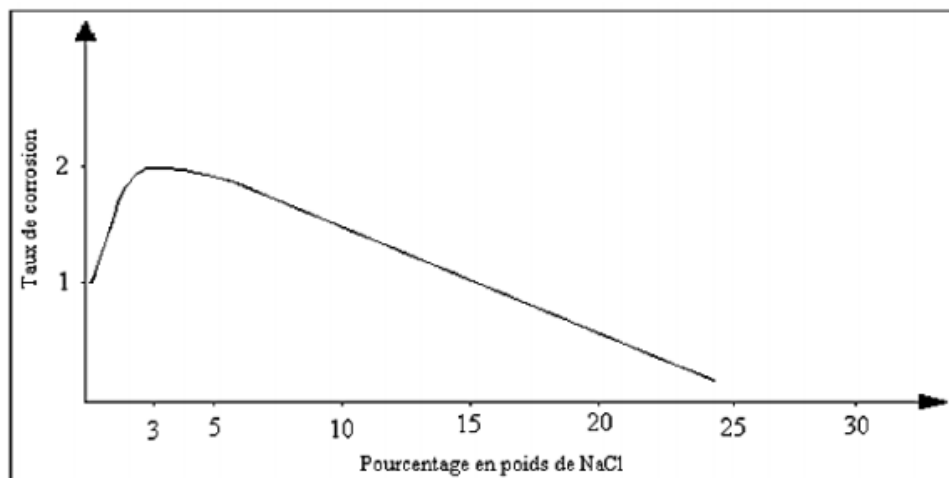


Figure 23 Influence de la concentration en NaCl sur la corrosion de Fer dans des solutions aérées

La présence des sels peut causer d'énormes dégâts aux installations pétrolières. Pour cela on procède dès l'extraction du pétrole à une première opération de dessalage visant à éliminer le maximum de sel mais malheureusement pas la totalité.

5.3. Effet de la température :

Généralement, l'augmentation de la température accélère les phénomènes de corrosion, car elle diminue les domaines de stabilité des métaux et accélère la cinétique de réaction et de transport. L'importance de son influence diffère cependant en fonction du milieu corrosif dans lequel se trouve le matériau.

5.4. Effet du pH :

La susceptibilité du matériau à la corrosion est fonction du pH de l'électrolyte, une forte concentration en protons dans la solution augmente l'agressivité du milieu, ce qui modifie les équilibres des réactions chimiques et électrochimiques.

Les diagrammes d'équilibre potentiel-pH, dits de Pourbaix, montrent que suivant le potentiel et l'acidité ou la basicité du milieu, notamment en solution aqueuse le métal peut se corroder, se passiver ou encore rester stable thermodynamiquement (état d'immunité), en milieu acide le fer se corrode alors qu'il se passive en milieu basique.

La présence des substances chimiques telles que : CO_2 , H_2SO_4 , HCl , H_2S , etc. conduit à une acidification de l'eau contenue dans le brut. Lorsque, le pH est dans le domaine acide (pH = 4), en plus de la réduction d'oxygène (milieu aéré), la formation d'hydrogène devient une réaction cathodique supplémentaire. Le film d'oxyde ferreux est dissous et la vitesse de corrosion augmente.

Alors que, dans la zone de pH intermédiaire, soit 4 à 10, le taux de corrosion est presque constant, un dépôt d'oxyde ferreux poreux, peu dense et soluble, recouvre la surface métallique. Il est continuellement renouvelé par le processus de corrosion. Si le pH est élevé (pH > 10.5), la vitesse de corrosion chute encore. Un film d'oxyde ferreux protecteur se forme à la surface du fer, qui ne se dissout qu'à pH encore plus élevé, en raison de la transformation du fer en espèces type anionique telles que HFeO_2 .

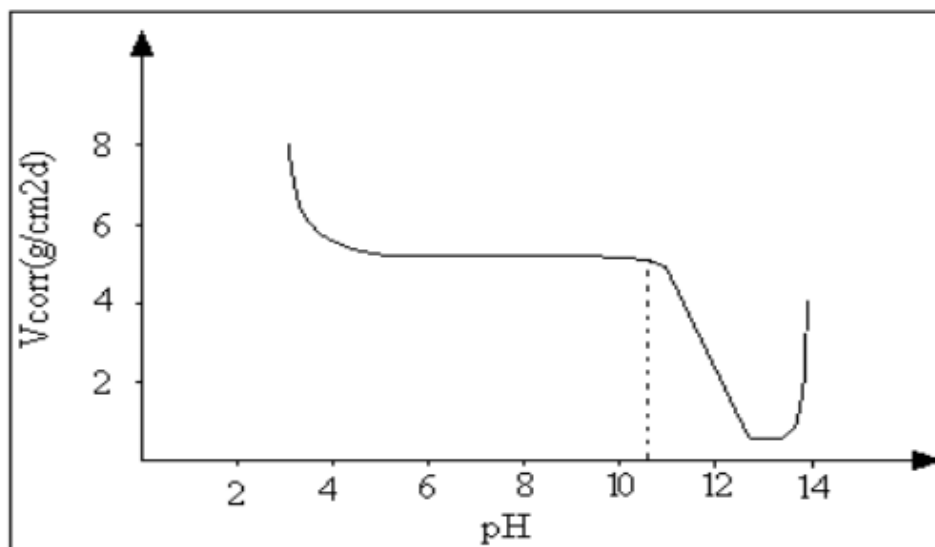


Figure 24 Variation de la vitesse de corrosion de l'acier au milieu aqueux en fonction de pH

6. La protection des métaux contre la corrosion :

La prévention de la corrosion doit commencer déjà dans la phase de planification. En d'autres mots, on doit prendre en considération la corrosion depuis le début d'un projet et jusqu'à sa réalisation. Il s'agit de garantir une certaine durée de vie à un objet. En plus, la solution adoptée doit être compatible avec les prescriptions concernant la protection de l'environnement naturel et doit permettre le recyclage ou l'élimination des différents composants à la fin de leur utilisation.

La lutte contre la corrosion englobe les méthodes suivantes :

- Prévention par une forme adaptée des pièces,
- Prévention par un choix judicieux des matériaux,
- Protection par revêtements,
- Protection par inhibiteurs,
- Protection électrochimique. [5]

1- Prévention par une forme adaptée des pièces :

En donnant une forme adaptée aux objets, on peut diminuer les risques de corrosion car la forme d'un objet peut influencer sa durée de vie de façon déterminante.

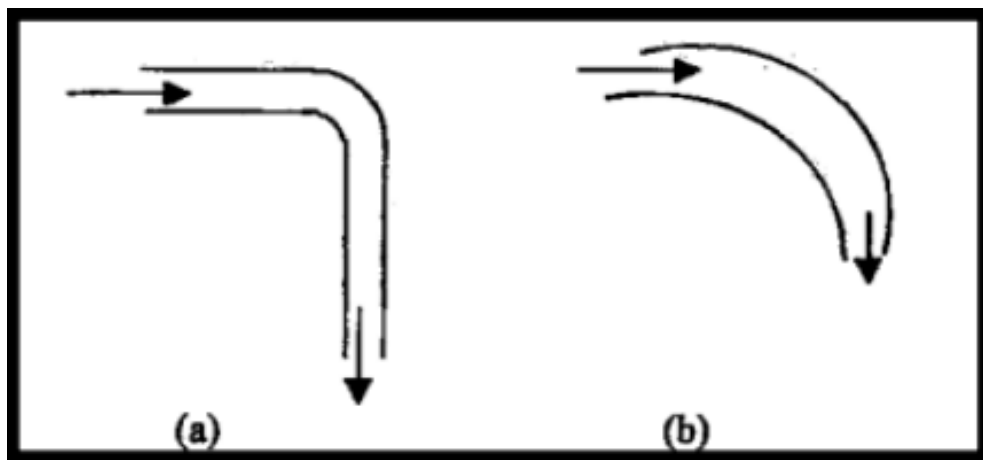


Figure 25 Une forme adaptée pour diminuer la corrosion

2- Prévention par le choix du matériau :

Le choix du matériau doit principalement tenir en compte de l'influence défavorable et des conditions de fonctionnement. Il n'existe pas de métaux ou alliages qui ont une résistance absolue à la corrosion, mais on connaît uniquement des matériaux résistant à la corrosion dans certains milieux agressifs. Le comportement à la corrosion n'est qu'un critère parmi d'autres dans le choix des matériaux, bien qu'il s'avère souvent déterminant. La résistance à la corrosion est une propriété du système métal-milieu et non du métal seul. [5]

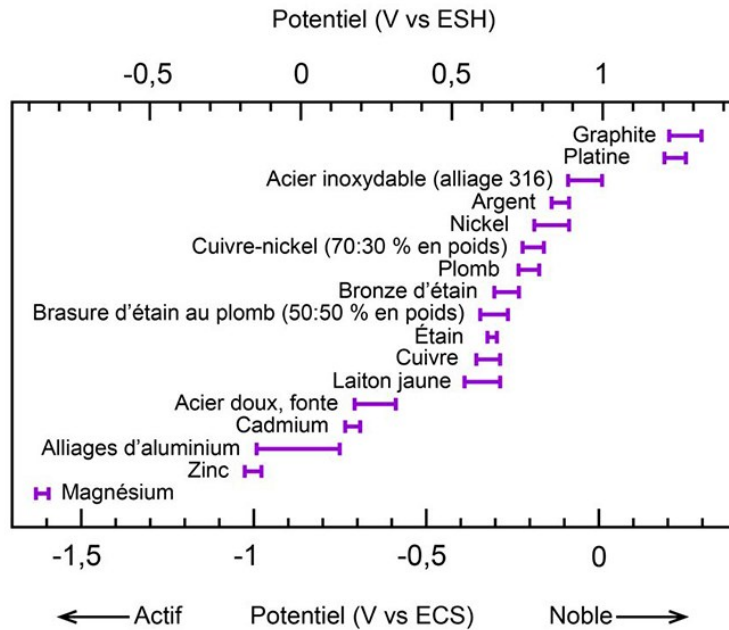


Figure 26 Série galvanique pour certains métaux dans l'eau de mer

3- Protection par revêtements :

Les revêtements constituent une barrière physique entre le milieu agressif et le métal à protéger. Leur efficacité dépend de leur propre comportement vis-à-vis du milieu agressif ainsi que de l'intégrité du revêtement. On distingue :

➤ Protection par revêtements métalliques :

Les revêtements métalliques sont couramment employés pour protéger l'acier contre la corrosion atmosphérique. Selon leur comportement à la corrosion par rapport à substrat, on distingue deux types de revêtements métalliques :

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

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 par exemple. Un revêtement plus noble corrode localement le substrat qui joue le rôle d'anode. Les revêtements plus nobles que le substrat donc ne contenir aucun défaut.

En revanche, lorsque le dépôt est moins noble que le substrat, 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. [5]

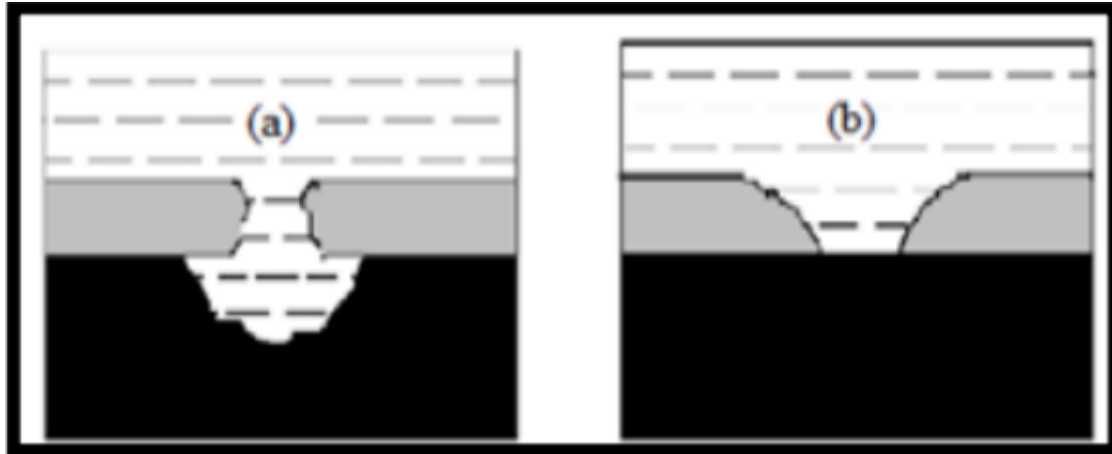


Figure 27 Corrosion en présence de revêtements métalliques plus nobles (a), et moins nobles (b) que le substrat

➤ **Protection par revêtements organiques :**

Ils forment une barrière plus ou moins imperméable entre le substrat métallique et le milieu, et on les classe en trois familles :

- Revêtements en bitumes,
- Revêtements polymériques,
- Peintures et vernis. [5]

4- Protection par inhibiteurs :

Il s'agit de substances qui, ajoutées en très petite quantité dans le milieu corrosif diminuent son agressivité vis-à-vis du métal. Il est possible de distinguer :

➤ **Inhibiteurs d'adsorption :**

Il s'agit d'inhibiteurs filmant qui s'adsorbent à la surface pour donner un film protecteur.

Ces sont des substances organiques du type monoamines ou polyamines.

➤ **Poisons contrôlant le dégagement cathodique :**

Certaines substances tels les ions arsenic, bismuth et antimoine retardent le dégagement d'hydrogène et peuvent dans certains cas être utiles pour inhiber la corrosion.

➤ **Suppresseurs d'oxygène :**

Ils enlèvent l'oxygène dissous contenu dans les solutions (sulfite de sodium, hydrazine)

➤ **Inhibiteurs oxydants :**

Il s'agit des chromates, des nitrites, des sels ferriques, etc. Ces substances élèvent le potentiel de corrosion dans la zone de passivation. Les phosphates nécessitent de l'oxygène dissous pour avoir une action efficace. [5]

5- Protection électrochimique (cathodique)

La protection cathodique consiste à imposer au métal un potentiel suffisamment bas pour que la vitesse de corrosion devienne négligeable. En pratique, cette méthode sert surtout à protéger les structures lourdes en acier, telles que les conduites enterrées.

Pratiquement deux possibilités sont utilisées :

- Protection cathodique par courant imposé, utilisant un générateur extérieur au système métal/solution qui débitera un courant continu, de sens tel que dans la solution il "sortira" d'une pièce anodique appelée déversoir pour pénétrer dans le métal à protéger et le rendre cathodique.
- Protection cathodique par anode sacrificielle ou anode galvanique, dont le métal est relié électriquement avec un autre métal moins noble que lui, c'est -à-dire dont le potentiel dans la solution est plus négatif. Ce métal moins noble va se dissoudre par oxydation en émettant dans le sol un courant qui viendra protéger la structure. [5]

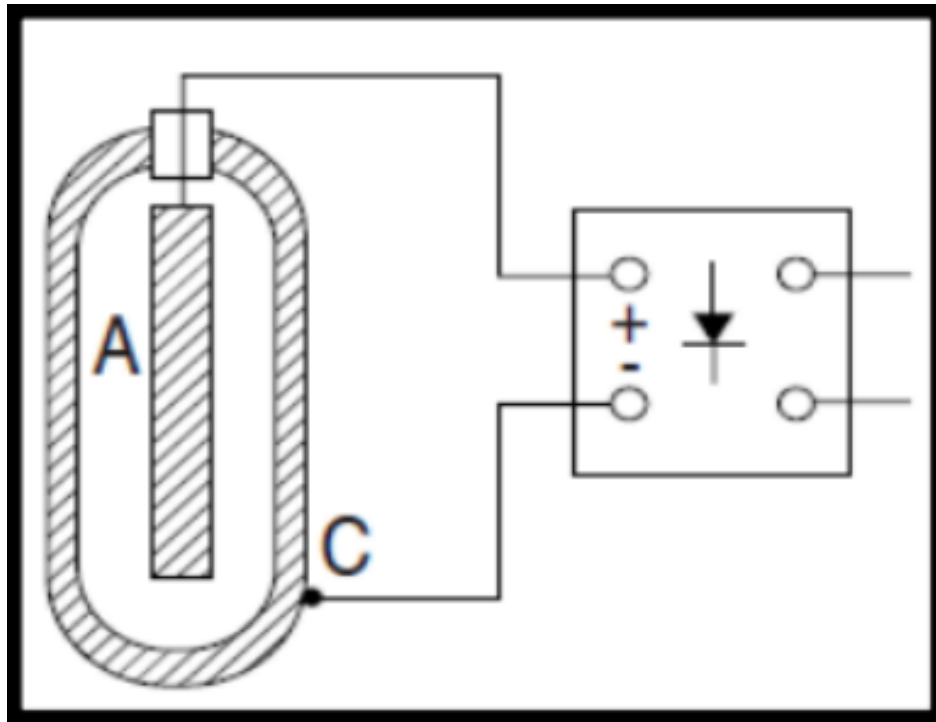


Figure 28 Schéma de protection cathodique d'un réservoir par courant imposé

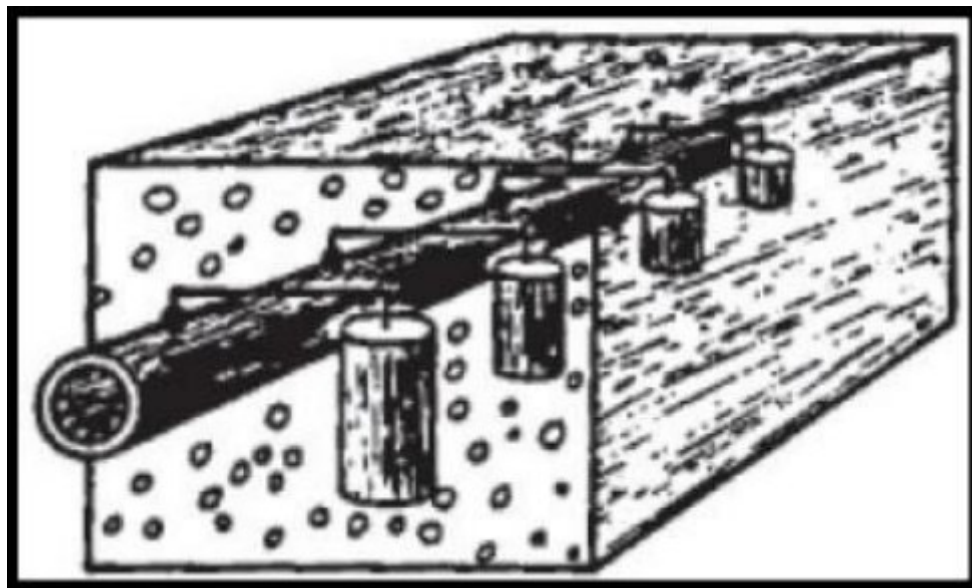


Figure 29 Schéma de protection cathodique d'une canalisation enterrée par anodes

II. STOCKAGE DES PRODUITS PETROLIERS

1- Introduction

Le stockage du pétrole et du gaz consiste à immobiliser temporairement certains volumes de pétrole ou de gaz dans des capacités de stockage appelées appareils à pression ou réservoirs selon, que le produit stocké, est ou n'est pas, sous pression.

L'industrie pétrolière a pour principale caractéristique la mise en œuvre de tonnage très important d'hydrocarbure. Sous forme liquide ou gazeuse, elle se trouve dans l'obligation de prévoir d'énormes capacités de stockage. Cette tendance va s'accroître avec l'obligation faite par les nouvelles réglementations qui prévoit de constituer un stock équivalent à trois mois de consommation pour chaque pays en vue de se mettre à l'abri des pénuries éventuelles. [9]

2- Présentation des réservoirs de stockage : équipements et accessoires des bacs

1- Définition :

Un bac est un réservoir cylindrique et vertical destiné au stockage des hydrocarbures liquides.



Figure 30 Bac de stockage de brut dans La région TFT-Illizi Sonatrach

2- Equipements des bacs :

- **La robe** : C'est une paroi verticale constituée de tôles cintrées au diamètre du réservoir.
- **La virole** : C'est un anneau constitué de tôles dont la succession donne la robe.
- **La cuvette** : C'est un compartiment construit autour d'un bac ou d'un ensemble de bacs destiné à recevoir le contenu du bac ou de l'ensemble de bacs en cas de fuite accidentelle. Le fond : C'est la base du réservoir, il est fait également d'un ensemble de tôles.
- **L'assise** : C'est la fondation sur laquelle repose le réservoir. Le toit : C'est la partie supérieure du réservoir, il est fait d'un assemblage de tôles. Il peut être fixe ou flottant.

3- Réservoirs et composants :

Les réservoirs métalliques verticaux sont classés en 3 types :

- Réservoirs à toit fixe
- Réservoirs à toit flottant
- Réservoirs à toit fixe et écran flottant

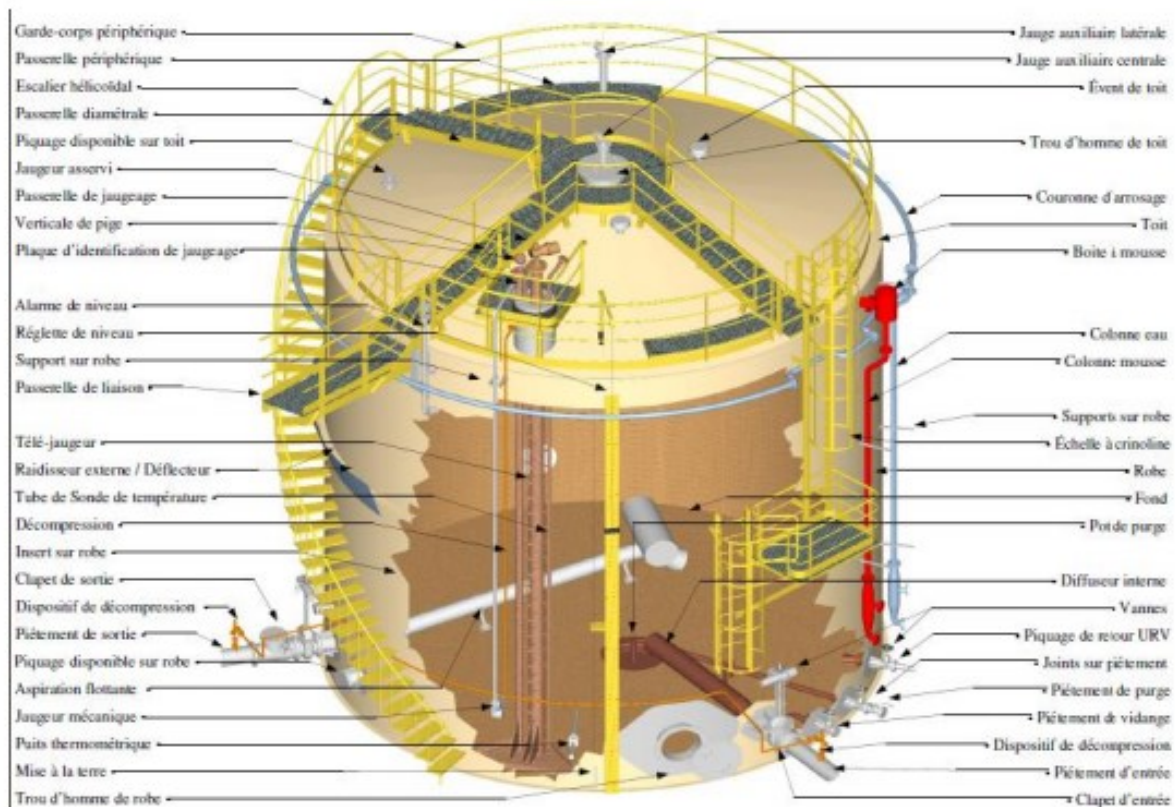


Figure 31 Schéma d'un réservoir à toit fixe

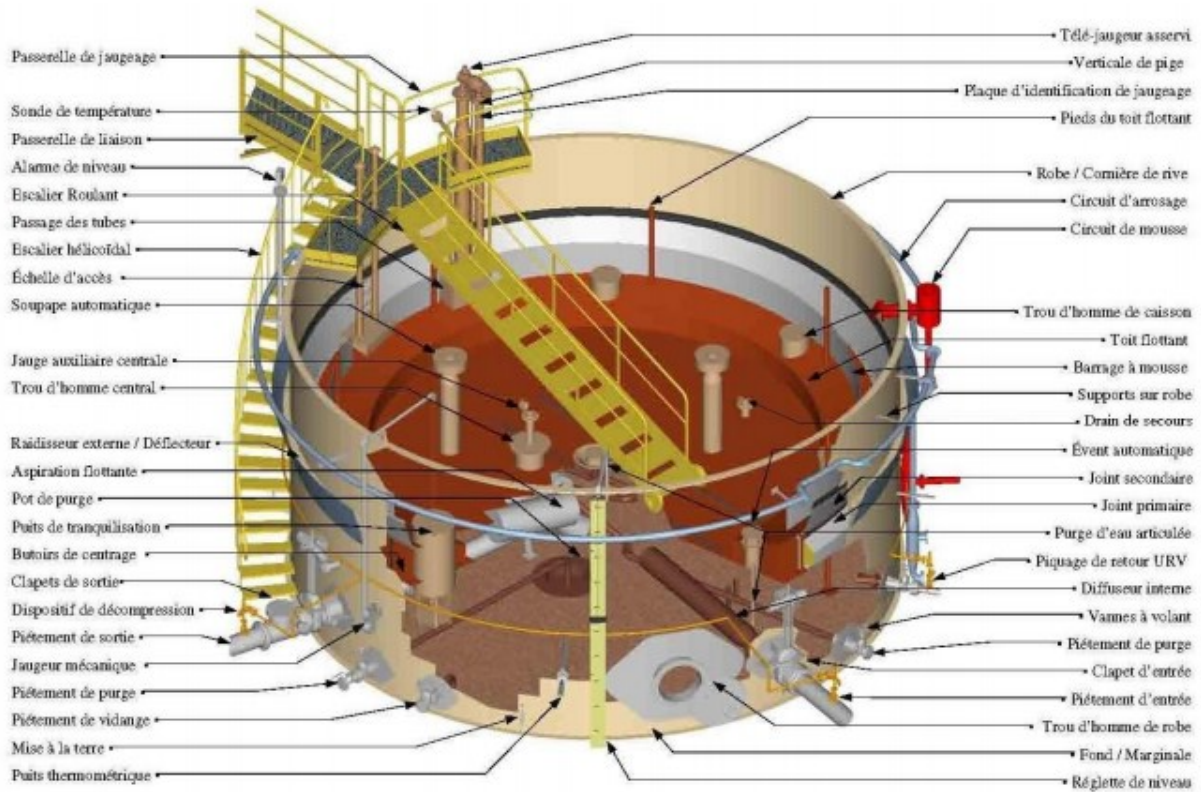


Figure 32 Schéma d'un réservoir à toit flottant

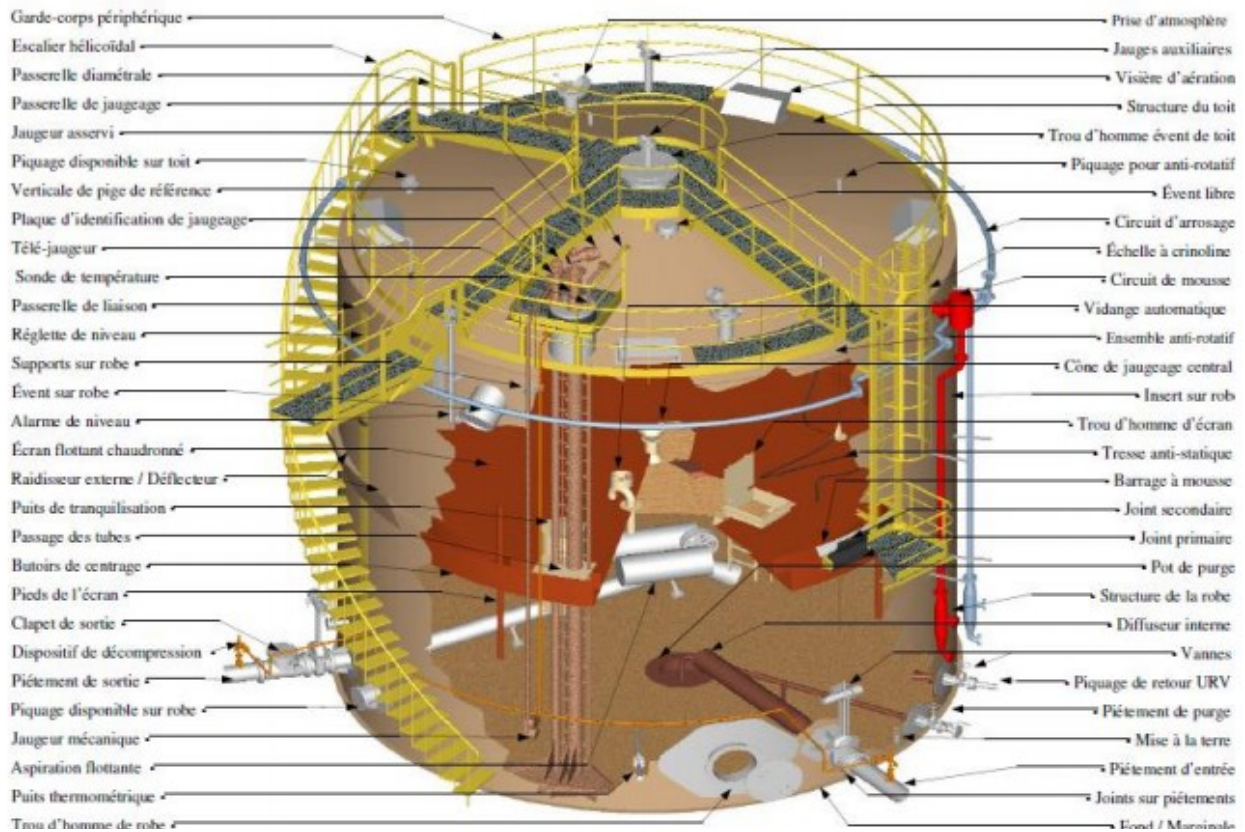


Figure 33 Schéma d'un réservoir à écran flottant

4- Accessoires des bacs

- **Accessoires de lutte contre la surpression**

- **Les événements** : ce sont des ouvertures permanentes situées dans la partie supérieure du réservoir destinées à évacuer l'excédent de vapeur d'hydrocarbures par temps chauds.
- **Les soupapes** : ce sont des dispositifs automatiques qui laissent s'échapper l'excédent de vapeur une fois que la pression de la phase gazeuse à l'intérieur du réservoir atteint une valeur limite ou critique. Cette pression est appelée pression de tarage.

- **Accessoires de lutte contre l'incendie**

- **La couronne de mousse** : extincteur de feux d'hydrocarbures (jaune-orangée).
- **La couronne d'eau de refroidissement** : refroidissement du bac (bleu ou rouge).
- **Cuvette de rétention** : circonscrit la lutte contre l'incendie à un périmètre limité.

- **Accessoires de mesure de niveau de produits**

Sur certains réservoirs (bac de stockage de fiouls et de bitume), des accessoires appelés indicateurs de niveau à flotteur sont installés. Ils permettent de lire directement une règle graduée fixée sur la robe, la valeur du niveau de produits dans le réservoir grâce à un index se déplaçant devant la règle graduée.

- **Accessoires de visite et nettoyage**

Il s'agit des trous d'homme, des gardes de corps, des escaliers et des échelles.

- **Accessoires de réchauffage**

Dans le cas des fiouls, un système de réchauffage est prévu (serpentins tapissant le fond du réservoir). Le stockage du bitume en plus du système de réchauffage, il est aussi prévu un calorifugeage (isolation thermique) couplé au réservoir. [9]

5- Matériaux :

Les matériaux constitutifs des réservoirs sont en général des aciers au carbone, l'acier inoxydable ou un matériau composite pouvant être utilisés pour contenir certains produits chimiques. Les choix d'acier sont effectués en fonction des contraintes propres à chaque élément. Les caractéristiques mécaniques des aciers à prendre en compte sont définies dans les codes de construction ou à défaut dans les codes de réparation. [10]

6- Dossier de suivi individuel

Chaque réservoir doit faire l'objet d'un dossier individuel de suivi. Le contenu de ce dossier comprend, lorsqu'ils sont connus, les éléments suivants :

- Type et caractéristiques (dimensions, volume, calorifugé ou non, serpentin de réchauffage ...)
- Date de construction et code de construction utilisé
- Plans de construction (schémas établis postérieurement pour les réservoirs anciens) ;
- Matériaux de construction, y compris des fondations
- Existence d'un revêtement interne
- Date de l'essai hydraulique initial
- Liste des produits successivement stockés dans le réservoir
- Dates, types d'inspections et résultats
- Dates et résultats des mesures réalisées sur le réservoir
- Réparations et modifications éventuelles et codes utilisés
- Incidents éventuels
- Dossier réchauffeur si existant (souvent suivi comme un ESP à part entière) [10]

3- Mécanismes de dégradation et de défaillance

Les principaux mécanismes de dégradation et de défaillance des réservoirs sont :

- La corrosion
- Les affaissements et problèmes associés
- Les défaillances de structure du réservoir et de ses accessoires
- Dégradations liées au fonctionnement cyclique
- Dégradation des assises
- La fissuration

Ainsi que la combinaison possible de ces modes de dégradations [10]

3.1. La corrosion

La corrosion est l'un des principaux modes de dégradation des réservoirs de stockage, elle peut être de nature électrochimique, bactérienne et peut affecter l'ensemble des composants d'un réservoir de stockage tant en interne qu'en externe. Par ailleurs, la corrosion peut être soit localisée soit généralisée.

La corrosion généralisée associée à la corrosion par piqûres peut se produire à l'intérieur ou à l'extérieur.

Alors que des piqûres isolées peuvent créer des fuites mineures, la concentration d'un grand nombre de piqûres ou une zone de corrosion localisée, peuvent provoquer une fuite majeure. [10]

La corrosion interne peut résulter de :

- Présence de substances agressives ou polluantes dans le produit stocké (parfois en association avec d'autres conditions). Un exemple est la corrosion du ciel du réservoir pouvant affecter la partie interne du toit et de la robe du réservoir du fait de la présence de composés soufrés et de vapeur d'eau.
- Entrée et accumulation d'eau dans le réservoir résultant de la respiration du réservoir en raison de différences de température et condensation de vapeur d'eau, présence d'eau dans le produit stocké, ou entrée d'eau de pluie par le joint des toits flottants.
- Qualité inadéquate des matériaux d'apport des soudures. [10]

La corrosion externe peut résulter de :

- Mauvaise qualité de la couche supérieure de l'assise du réservoir : les polluants dans la couche supérieure de la fondation tels que de l'argile, des pierres, des cendres, ou d'autres matériaux acérés peuvent conduire à une zone de concentration d'oxygène aux points de contact du fond du réservoir. Les petites zones de contact entre le fond et les polluants forment une anode alors que le reste du fond forme une cathode, d'où une corrosion ponctuelle au point de contact.
- Entrée d'eau de pluie par la pénétration et/ou capillarité du fait d'un mauvais contact entre la tôle marginale et l'assise du réservoir.
- Accumulation d'eau de pluie au niveau de la marginale, des cornières sur les viroles ou sur les tôles de toit.
- Délamination de la tôle de marginale particulièrement dans des secteurs où de l'eau et des débris s'accumulent autour de la base du réservoir.
- Qualité inadéquate des matériaux d'apport des soudures des plaques annulaires et des tôles de fond.
- Restes de calamine sur les plaques.
- Température du produit stocké qui peut accroître la vitesse de la corrosion sous calorifuge.

- Agressivité des conditions ambiantes (atmosphères agricoles, industrielles, maritimes, tropicales, ...), fonction de l'humidité relative, de la teneur en chlorures ou en espèces chimiques provenant de la pollution (SO₂ en particulier), de la température, du vent, de la pluie, etc.

Parmi les mécanismes de corrosion généraux et les facteurs aggravant la corrosion, il y a lieu de noter que :

- Les réservoirs de stockage de produits réchauffés sont généralement des réservoirs de type convexe (cone up). La corrosion interne des tôles périphériques du fond est accélérée par rapport aux réservoirs concave (cone down) du fait d'une part de la température et d'autre part de la moindre efficacité de drainage de l'eau éventuellement présente en fond de réservoir.
 - La corrosion galvanique, résultant de la liaison entre des métaux différents en présence d'humidité, est un problème auquel il faut être attentif, notamment au niveau des systèmes de mise à la terre, des dispositifs de purges ou d'échantillonnage.
- [10]

Les différents types de corrosion :

Les divers cas de corrosion affectant les réservoirs de stockage ne peuvent être que de nature électrochimique, c'est à dire qu'ils nécessitent la présence d'eau liquide au contact de la paroi de l'acier. Une espèce " oxydante " est par ailleurs indispensable pour alimenter les piles de corrosion : c'est soit l'ion H⁺, et on parlera alors de corrosion " acide " (significative aux bas pH), soit l'oxygène dissous dans l'eau. C'est aussi bien le cas de la corrosion de l'intérieur des réservoirs par l'eau liquide pouvant séparer et venir au contact de l'acier, que celle de la corrosion de leur paroi externe exposée à l'air (la corrosion atmosphérique provient de l'humidité adsorbée sur l'acier et des pluies) ou aux sols (la corrosion provient de l'humidité inhérente à tous terrains).

La corrosion dite " bactérienne " rencontrée fréquemment (sous la forme de cratères) est provoquée par une augmentation locale de la corrosivité dans des zones où des colonies de bactéries sulfato-réductrices (BSR) trouvent les conditions physico-chimiques favorables à leur prolifération : absence totale d'oxygène dissous (bactéries anaérobies), présence de sources de carbone (hydrocarbures et autres composés organiques), présence d'ions sulfates qu'elles " respirent " pour les réduire en sulfure, généralement sous la forme de H₂S (qui provoque ensuite la corrosion du fait de son caractère acide en présence d'eau), pH et température modérés.

Les points essentiels de la corrosion bactérienne sont :

- Des taux de corrosion plus élevés que les mécanismes de corrosion « normaux ».
- Des niveaux élevés de réparation.

Les options principales qui existent pour empêcher la corrosion bactérienne sont de façon préventive :

- Le drainage régulier de l'eau présente au niveau du fond réservoir.
- La réalisation d'un revêtement interne lors de l'arrêt du réservoir.

A titre curatif si nécessaire : utilisation de bactéricides sous réserve de respecter les précautions relatives à l'usage de ces produits. [10]

3.2. Affaissement et problèmes associés

Les tassements des fondations d'un réservoir peuvent conduire à l'un des effets ou à la combinaison de plusieurs des effets décrits ci-après :

- Tassement différentiel et /ou de la marginale en raison de l'érosion de l'assise.
- Tassement général entraînant l'instabilité du réservoir.
- Endommagement d'un éventuel liner sous réservoir.
- Blocage du toit flottant ou de l'écran flottant.
- Création de contraintes au niveau du réservoir et/ou des tuyauteries attenantes.

Le réservoir suit généralement les tassements du sol sur lequel il est implanté. Ces tassements peuvent être uniformes ou non uniformes ; il convient de les vérifier.

Le tassement uniforme du sol n'est normalement pas dangereux car il apparaît progressivement et augmente uniformément à la fois ; cependant il peut se former un creux dans l'assise autour de la robe du réservoir dans lequel l'eau s'accumule et peut provoquer une corrosion de la bordure annulaire ainsi que des tôles du fond.

Les tassements non uniformes sous la robe représentent un risque plus important pour la zone périphérique du fond. Ces conditions sont défavorables pour la jonction robe/fond et il convient de surveiller les problèmes de tassement local non uniforme sous la robe. Le défaut peut être corrigé en relevant localement le réservoir aux points bas ou, dans les cas graves, en soulevant le réservoir et en remettant les fondations à niveau.

Des tassements importants peuvent engendrer l'ovalisation de la robe, des contraintes supplémentaires, en particulier aux raccordements des tuyauteries au réservoir, à la liaison robe - toit fixe, ainsi que des blocages des toits flottants. [10]

3.3. Défaillance de structure du réservoir et de ses accessoires

Les principales défaillances sont :

- Flambage de réservoirs de stockage à écrans internes en raison de support inadéquat, vide, ou blocage au niveau du joint.
- Flambage du toit flottant en raison d'un supportage inadéquat par les béquilles et/ou blocage au niveau du joint de toit.
- Perte de flottabilité de l'écran interne ou du toit flottant du fait de la présence de produit sur le l'écran ou le toit ou dans les pontons des toits flottants.
- Blocage du drain articulé.
- Déraillement d'échelle sur les réservoirs à toit flottant.
- Blocage d'écran interne ou de toit flottant.
- Rainurage de la robe par un écran interne ou un toit flottant.
- Flambage de la robe.
- Défaut de verticalité des poteaux de support de la charpente.

Le flambage de la robe se traduit par la formation d'une seule ou d'un petit nombre d'ondes sur un côté de l'enveloppe (du côté exposé au vent). Ce type de flambement peut être causé par :

- Des vitesses anormalement élevées du vent (cyclones, ouragans).
- La diminution de l'épaisseur de la robe en raison de la corrosion.
- Des tassements de sol.
- La présence de zones aplaties dans la robe du réservoir.
- La réduction de la section transversale des anneaux raidisseurs en raison de la corrosion.
- La réduction de l'intégrité due à des soudures des anneaux raidisseurs fissurées.

La combinaison de deux ou plusieurs de ces causes augmente le risque de flambement de la robe. Ce mode de défaillance se rencontre essentiellement dans les viroles minces supérieures de la robe du réservoir.

L'ajout d'un raidisseur supplémentaire peut résoudre le problème de flambement. Cette forme de flambement existe généralement pour les réservoirs à toits flottants de gros diamètre et pour les réservoirs présentant des problèmes de rotondité.

Le flambement des robes de réservoirs à toit fixe peut être provoqué par une défaillance de soupape(s) de dépression sur le toit ou des bouchages d'évents. [10]

3.4. Dégradations liées au fonctionnement cyclique

Pendant les cycles de vidange et de remplissage de fortes amplitudes, la robe du réservoir subit des efforts transversaux entraînant une déformation élastique. Comme le fond ne se déforme pas de la même façon que la robe, des contraintes sont générées au niveau de la zone critique.

Le nombre de cycles d'un réservoir de stockage est toutefois faible pour initier des problèmes de fatigue métallurgique. En effet, même dans le cas d'un stockage "journalier", en comptant 1 cycle par jour et une durée d'exploitation de 100 ans, le nombre de cycles ne dépasse pas 3,6 10⁴. Pour un stockage de dépôt, le nombre de cycles est au moins divisé par 10, soit inférieur à 3.10³.

Pour un tel nombre de cycles la fatigue ne pourrait se manifester que dans le cas de fortes contraintes proches de la résistance à la rupture. Or les codes de construction limitent les contraintes typiquement à 40 % de la rupture et 66 % de la limite élastique.

Une autre manifestation des contraintes cycliques peut être la "fatigue / corrosion". Il s'agit d'une perte d'épaisseur liée à la corrosion accélérée par le fait que les contraintes répétées érodent et effritent la zone attaquée. Ceci peut éventuellement se manifester sous le talon, en face externe après un peu plus d'un millier de cycles. Le phénomène est détectable par une perte d'épaisseur anormale. Ce phénomène malgré le nom employé est assimilé à de la corrosion. [10]

3.5. Dégradation des assises

Les causes principales de détérioration des assises sont :

- Le tassement des assises.
- L'érosion.
- La dégradation du béton par : calcination, attaque par eau souterraine, attaque par gel, attaque chimique et végétation non contrôlée.

Les fissures créées par la dégradation du béton peuvent créer des points d'entrée pour l'eau et contribuer à des phénomènes de corrosion au niveau de la tôle annulaire voire du fond.

Par ailleurs, selon que la dégradation des assises soit uniforme ou non, celle-ci peut induire des phénomènes similaires à ceux des tassements évoqués précédemment, à savoir :

- Inclinaison du réservoir.
- Tassements différentiels.
- Déformation du fond du fait des contraintes générées. [10]

3.6. Fissuration

Des fissurations peuvent être rencontrées en fonction de la nature des produits et de la métallurgie du réservoir. Les fissurations se manifestent préférentiellement dans des zones soumises à de fortes contraintes. [10]

3.7. Combinaison de mécanismes de dégradation et autres influences

La corrosion interne et externe en association avec un tassement excessif est une des principales causes de fuite des fonds de réservoir.

L'interface entre la structure du réservoir et la fondation ainsi que la conception et la construction de la fondation sont des facteurs importants

La combinaison des contraintes cycliques avec des tassements irréguliers ou excessifs peut être une cause de fuite des réservoirs. [10]

4- Rôle du stockage

Le stockage des ressources énergétiques est non seulement nécessaire pour compenser les fluctuations d'approvisionnement dues à toutes sortes d'aléas lors de la production, du transport et du raffinage, ou les variations de la consommation, qui dépendent notamment des conditions météorologiques. Il est aussi stratégique pour assurer un minimum d'autonomie énergétique du pays consommateur.

Le stockage doit être assuré aux différentes étapes du cheminement du pétrole, depuis le puits de production jusqu'aux lieux de consommation. Les dépôts pétroliers importants se trouvent essentiellement sur les lieux de production du pétrole brut, aux extrémités des oléoducs, dans les terminaux de chargement et de déchargement du pétrole, à proximité des raffineries. Ces stockages concernent le pétrole brut, les charges, les coupes intermédiaires et les produits finis avant expédition. [9]

5- Méthodologie de calcul et analyse sécuritaire

Les opérations de mesurage sont effectuées vannes de pied de bac de sortie ouvertes. La méthode décrite ci-après a pour but de déterminer la quantité de produit contenu dans un bac à la température de référence de 15° C. A cette fin, trois opérations de mesure sont nécessaires :

- Le relevé de la hauteur du produit et, le cas échéant, de l'eau présente dans le bac.
- Le relevé de la température du produit.
- Le relevé de la masse volumique du produit à température.

Les données ainsi relevées à température ambiante permettent ensuite d'obtenir, par conversion et calcul, le volume de produit à 15 °C [9]

1. Relevé de la hauteur de produit

Le relevé des quantités de produit dans le bac considéré est un élément déterminant du mesurage. Il est effectué par la mesure du niveau de produit présent dans le réservoir.

1.1. Méthodologie :

La mesure du niveau de liquide dans un réservoir à l'aide d'un ruban lesté peut se faire selon deux méthodes :

- Le mesurage dit « par le creux » c'est-à-dire le mesurage par calcul de la différence entre le liquide et la hauteur totale témoin du bac (HTT).
- Le mesurage dit « par le plein » c'est-à-dire le mesurage à partir de la hauteur de produit observée entre la plaque de touche et la surface du liquide. Dans les deux cas, une pâte détectrice est utilisée pour obtenir une trace nette du niveau d'hydrocarbures sur le lest ou le ruban. La méthode de mesurage par le creux est préconisée car elle permet d'éviter certains aléas tels que la déformation de la plaque de touche ou la présence de dépôts de rouille ou de sédiments sur cette plaque qui conduisent à une inclinaison de la carotte. Par ailleurs, il est recommandé d'effectuer plusieurs mesures afin de confirmer le résultat et plus si nécessaire, jusqu'à ce que deux mesures successives soient semblables. [9]

2. Relevé de la température :

2.1. Instruments :

Les prises de température s'effectuent de préférence à l'aide d'une sonde électronique portative de température dont le modèle a été autorisé par l'administration des douanes (cf. arrêté du 27 avril 2001 modifié). Avant toute utilisation de cet instrument, il est procédé au point test des piles. A défaut de sonde électronique portative de température, un thermomètre à dilatation de liquide sera utilisé. Le thermomètre à mercure de pied de bac affiche la température à 1 m de la robe du bac.

Cette mesure, si elle peut être utilisée dans la gestion quotidienne de l'entrepôt, n'est pas considérée comme suffisamment représentative pour être utilisée lors des contrôles.

2.2. Méthodes :

La norme ISO 4268 (mesurage des températures) préconise de commencer les mesures de température par la partie haute du réservoir puis de descendre progressivement le thermomètre et non de commencer par le bas afin de ne pas perturber les couches de produit qui vont être traversées par le thermomètre. Deux méthodes de prise de température sont envisageables :

- La prise de température en plusieurs points du produit, c'est-à-dire tous les mètres en commençant par le haut du bac. La température définitive du produit sera obtenue en calculant la moyenne arithmétique des températures relevées. Cette méthode sera utilisée en priorité lorsque des variations importantes de température sont susceptibles d'être constatées notamment sur une même verticale (présence de stratifications dues à des réceptions récentes).
- La prise de température en trois points du produit. La norme ISO 4268 préconise de mesurer les températures à cinq sixièmes, un demi et un sixième de la hauteur du liquide (soit au milieu de chaque tiers). Le relevé de température doit être aussi précis que possible. Quelle que soit la méthode retenue, il convient d'attendre que le chiffre affiché sur la sonde soit stabilisé avant de le relever définitivement. Par ailleurs, la partie capteur du thermomètre doit rester immergée longuement dans le produit afin de permettre la mise à température et d'obtenir un résultat significatif. En tout état de cause, un contrôle de cohérence par comparaison entre les températures relevées au moyen de thermomètres fixes sur bac et les températures relevées avec thermomètres portatifs est toujours possible. Cependant, cette comparaison ne peut être qu'indicative et jamais décisive. [9]

3. Relevé de la masse volumique à température

La masse volumique d'un produit correspond à la masse de produit par unité de volume exprimée en kg/m^3 . Bien que la détermination de la masse volumique du produit ne soit pas de même importance que la prise de température dans l'ensemble des opérations de mesurage, elle doit néanmoins être effectuée avec soin sur un échantillon représentatif du produit mesuré.

3.1. Instruments :

Il sera fait usage d'un aréomètre en verre étalonné à 15 °C (précision de 1 à 1,5 kg/m^3) et d'un thermomètre à dilatation de liquide (cf. arrêté du 27 avril 2001 modifié).

3.2. Méthodes :

La lecture de la masse volumique à température s'effectue généralement à partir de l'échantillon de produit prélevé à l'orifice central du bac, transvasé dans une éprouvette en verre dans laquelle seront également placés le densimètre ou l'aréomètre ainsi que le thermomètre à dilatation de liquide. Le transvasement dans une éprouvette n'est pas nécessaire lorsque l'on utilise une éprouvette densité température. Les mesures se font alors directement dans l'éprouvette. La lecture de l'aréomètre s'effectue au niveau de la surface plane du liquide et non pas au niveau de l'aréomètre même où se forme parfois un « ménisque ». La lecture de l'aréomètre et du thermomètre sont simultanées. La lecture de la masse volumique à température est effectuée dans les locaux de l'entrepôt. Comme précédemment pour les opérations de mesurage de température, les mesures de densité sont effectuées de manière contradictoire en présence du titulaire de l'entrepôt ou de son représentant. [9]

6- Inspection basée sur la criticité (RBI)

6.1. Définition

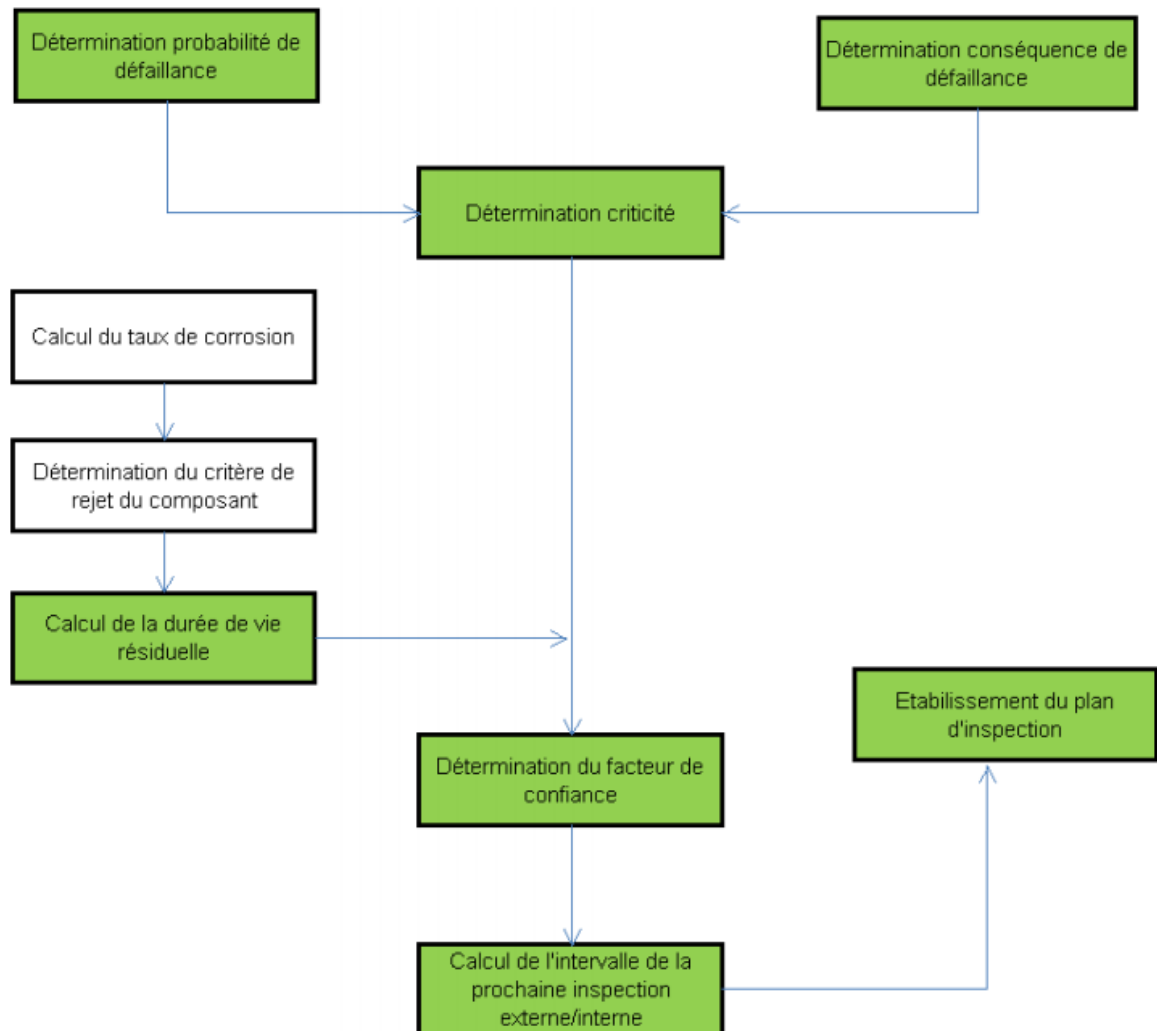
L'inspection basée sur le risque (RBI) est une méthode dans laquelle les biens sont identifiés pour une inspection en fonction de leurs risques associés par opposition à un intervalle de temps fixe prédéterminer. En d'autres termes, il s'agit d'un outil de priorisation et de planification, principalement utilisé dans les industries du pétrole et du gaz, qui aide à identifier les éléments hautement prioritaires (c'est-à-dire ceux à haut risque). [10]

6.2. Principe de la méthode proposée

Le principe de la méthode est le suivant :

- Établissement de la criticité d'un réservoir de stockage en fonction de la combinaison de la probabilité de défaillance et de la gravité de la défaillance.
- Détermination du plan d'inspection (natures, localisations, étendues et périodicités des actions d'inspection) en fonction de la criticité, du facteur de confiance et de la durée de vie résiduelle estimée. [10]

Figure 34 Le logigramme suivant est un exemple illustrant le principe de la méthode



6.3. Détermination de la criticité d'un réservoir

Comme la probabilité (vraisemblance d'une défaillance due à la dégradation) et la gravité (conséquence sur l'environnement, la santé et la sécurité) varient en fonction de la partie du réservoir concernée, l'analyse de la criticité est effectuée pour chacune des trois sections du réservoir concerné (fond et fondations, virole, toit). La criticité globale du réservoir est la criticité maximale de chacune des trois sections. [10]

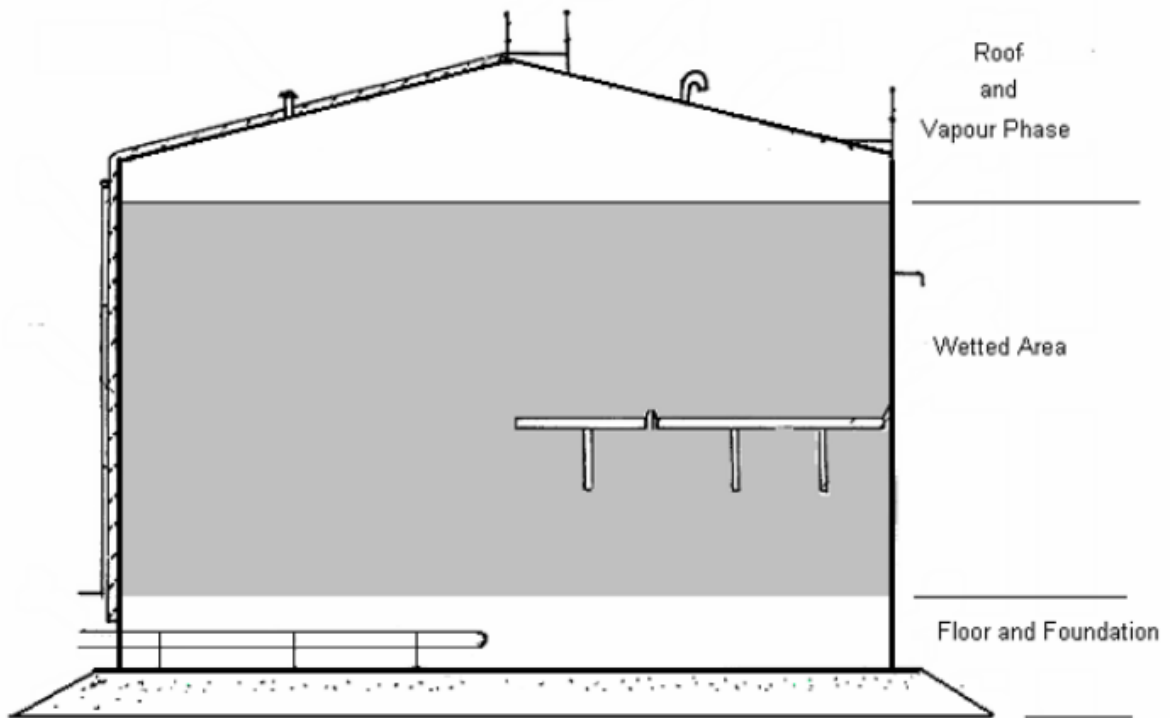


Figure 35 sections à prendre en compte lors de l'application du RBI à un réservoir de stockage conventionnel

6.3.1. Détermination des probabilités de défaillance

De façon générale les cinq facteurs à prendre en compte pour la détermination de la probabilité de défaillance sont :

- Type de dommage
- Inspection
- Conception
- Etat
- Produit stocké

Le taux de probabilité de l'apparition d'un mode de défaillance particulier pour tout composant de réservoir est évalué en étudiant les mesures adoptées ou les caractéristiques existantes qui influencent le mode de défaillance. Ces facteurs sont différents selon la section du réservoir considérée. Les principaux facteurs sont rassemblés dans le tableau suivant :

	Fond du réservoir	Virole du réservoir	Toit du réservoir
Protection cathodique (existence, type, efficacité)	X		
Revêtement interne	X	X	X
Revêtement externe	X	X	X
Température de stockage du produit	X	X	X
Corrosivité du produit	X	X	X
Type de fond (cône up, cône down, plat)	X		
Corrosivité des vapeurs pour les toits fixes			X
Efficacité du drainage pour les toits flottants			X
Présence de serpentin de chauffage	X	X	
Type de fondation	X	X	
Contact avec de l'eau souterraine	X		
Efficacité du drainage du réservoir	X		
Méthodes d'inspection hors service utilisées lors de la précédente inspection	X	X	X
Méthodes d'inspections en service utilisées	X	X	X
Fréquence des inspections en service	X	X	X
Corrosion sous isolation		X	X

Chaque facteur est associé à une valeur ou « note » qui reflète son influence sur la probabilité de l'apparition de la défaillance induite. Ces notes peuvent être pondérées pour chaque facteur afin de représenter leur importance relative sur la probabilité de l'occurrence du mécanisme de défaillance. [10]

6.3.2. Détermination des conséquences de défaillances

Les conséquences d'une défaillance sont évaluées en termes de gravité pour chacune des parties du réservoir en fonction du mode de défaillance en prenant en compte les barrières de réduction des risques telles que cuvettes de rétention, détection hydrocarbure, détection de fuite... Elles sont évaluées pour chaque catégorie :

- La sécurité
- La santé
- L'environnement

Les pertes financières peuvent également être prises en compte dans la détermination de la gravité.

Les principaux facteurs de conséquence à prendre en compte, le cas échéant, sont :

- Mode de défaillance (c.-à-d. petite fuite, fuite importante du fond, rupture fragile de robe).
- Type et volume de produit.

Avec :

N= Criticité négligeable

B= Criticité basse

M = Criticité moyenne

H= Criticité haute

E = Criticité élevée

Remarques sur la criticité

La criticité :

- Est représentative de l'ensemble des facteurs listés ci-avant, notamment de l'état connu ou estimé du réservoir et de son évolution compte tenu des modes de défaillances retenus.
- Détermine le plan d'inspection à mettre en œuvre en fonction de la durée de vie prévue.
- Peut être déterminée à un instant donné ou estimée à terme.
- Peut être révisée sur la base des retours d'expérience cumulés.
- Doit être révisée régulièrement sur la base des inspections réalisées (inspection en service et visite de routine). [10]

6.3.4. Durée de vie résiduelle

L'évaluation de la dégradation d'un équipement ou d'un composant est essentiel pour une planification efficace des inspections.

L'analyse de la dégradation repose principalement sur les composants liés à l'intégrité, comme la corrosion des éléments métalliques ou les mesures de tassement du réservoir.

Dans le cas de corrosion, l'analyse est effectuée en utilisant la vitesse de dégradation et l'épaisseur de retrait (ou surépaisseur pour dégradation/corrosion) pour s'assurer que le réservoir n'est pas remis en service avec une épaisseur inappropriée.

La vitesse de dégradation peut être directement déduite de :

- L'historique des mesures d'épaisseur sur le réservoir concerné.
- L'historique des mesures d'épaisseur sur un réservoir témoin.

- L'efficacité des mesures de protection contre la corrosion (revêtement interne, liner, protection cathodique ...).
- De valeurs issues de la littérature lorsque les mesures ne sont pas disponibles.

Sauf justification particulière (modifications des conditions d'exploitation et/ou renforcement des mesures de protection) la valeur de la vitesse de dégradation retenue sera la plus pénalisante des valeurs issues des historiques de mesure

La durée vie résiduelle est définie comme :

Durée de vie résiduelle (RL) = $(t_M - t_R) / \text{vitesse de dégradation}$, où :

t_M : dernière épaisseur minimale mesurée

t_R : épaisseur de retrait

L'épaisseur de retrait peut être prédéterminée ou déduite de calculs appropriés contenus dans les codes de conception et de réparation. [10]

6.3.5. Facteur de confiance

Le facteur de confiance reflète l'appréciation portée sur la robustesse de l'analyse de la durée de vie résiduelle.

Le facteur de confiance dépend, de façon non exhaustive :

- Du nombre d'inspections précédemment réalisées.
- De l'intervalle d'inspection précédente.
- De la qualité des données issues des inspections précédentes (niveau d'efficacité).
- De la qualité des méthodes d'inspection (hors exploitation et en service).
- Du résultat des inspections.
- Des mesures de maintenance préventive et du type et de l'étendue des réparations
- Des affectations successives du réservoir.

Remarque sur la détermination du facteur de confiance :

Une première détermination peut être obtenue sur la base d'analyses génériques. Cependant sa détermination doit être faite de façon approfondie lors de chaque établissement d'un nouvel intervalle d'inspection. [10]

III. La protection cathodique appliqué aux réservoirs des stockage des hydrocarbures

1. Introduction :

En bref, toutes les installations souterraines de stockage de carburant dans les stations-service devront utiliser ce système anti-corrosion.

Il existe de nombreuses formes de corrosion. Les deux types les plus courants liés au fond d'un réservoir sont généraux et ponctuels. Dans la corrosion générale, des milliers de cellules microscopiques se forment sur une zone de la surface métallique, entraînant une perte de métal. En corrosion ponctuelle, les cellules individuelles sont plus actives et différentes zones anodiques et cathodiques peuvent être identifiées. La perte de métal dans ce cas peut être concentrée dans des zones relativement petites, sans que la corrosion n'affecte des zones considérables de la surface.

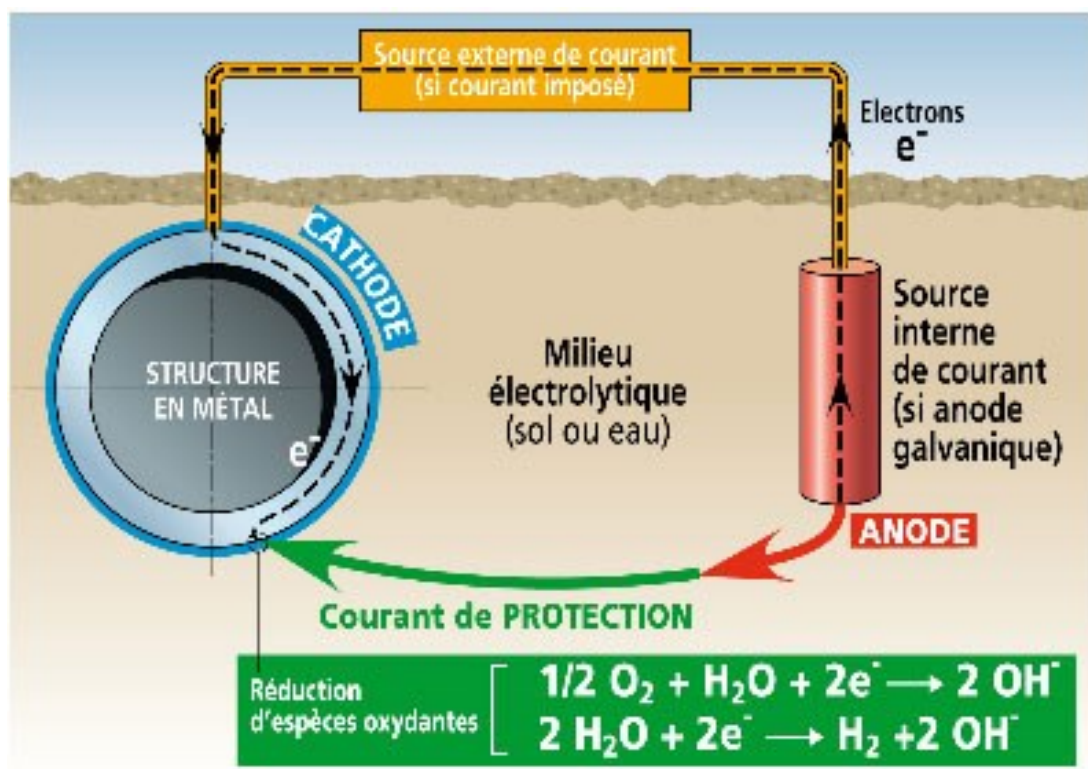
La composition du métal est importante pour déterminer quelles surfaces deviennent des anodes ou des cathodes. Des différences de potentiel électrochimique peuvent survenir entre les zones adjacentes en raison d'une répartition inégale des éléments dans l'alliage ou dans les contaminants à l'intérieur de la structure métallique. La corrosion peut également être causée par la différence entre le métal de soudure, les zones affectées par la chaleur (ZAT) et le métal de base.

Les propriétés physiques et chimiques des électrolytes influencent également la formation de zones cathodiques sur la surface métallique. Par exemple, des différences potentielles peuvent être générées entre les zones d'une surface en acier, en raison de différentes concentrations d'oxygène. Les zones à faible concentration en oxygène deviennent anodiques et les zones à forte concentration en oxygène deviennent cathodiques. Cela peut provoquer de la corrosion dans les zones où la boue et d'autres débris sont en contact avec le fond en acier d'un réservoir sur une couche de sable ou où un réservoir est placé sur deux types de sols différents.

Les caractéristiques du sol affectent considérablement le type et le taux de corrosion d'une structure au contact. Par exemple, les sels dissous influencent la capacité de charge actuelle des électrolytes du sol et aident à déterminer les taux de réaction sur les zones anodiques et cathodiques. La teneur en humidité, le pH, la concentration en oxygène et d'autres facteurs interagissent de manière complexe, influençant la corrosion. [11]

2. Définition :

La protection cathodique est une technique permettant de réduire la vitesse de corrosion d'un matériau métallique, en présence d'un milieu aqueux, en diminuant le potentiel de corrosion du métal (polarisation cathodique d'où le terme protection cathodique). L'ouvrage métallique à protéger est alors placé à un potentiel tel que la vitesse de corrosion devient acceptable sur toute la surface de métal en contact avec le milieu aqueux. Pour cela on fait circuler un courant électrique entre une anode auxiliaire et le matériau à protéger qui constitue la cathode. Ce courant qui circule donc du milieu vers le métal, est ajusté de façon à atteindre une valeur de potentiel pour laquelle la vitesse de corrosion du métal devient très faible. Cette protection s'applique à toute structure métallique en contact avec un environnement aqueux notamment les ouvrages en acier au carbone enterrés ou immergés, les surfaces internes de capacités métalliques contenant un électrolyte, ainsi qu'aux armatures du béton. Cette protection est souvent associée à des procédés de prévention de la corrosion tels que les revêtements (peintures, polymères...).



3. Méthodes de protection cathodique pour le contrôle de la corrosion :

La protection cathodique est une méthode largement acceptée de contrôle de la corrosion. La corrosion des réservoirs de stockage en acier hors sol peut être réduite ou éliminée par l'application appropriée d'une protection cathodique. La protection cathodique est une technique qui fait que toute la surface du métal à protéger fait office de cathode d'une cellule électrochimique. Il existe deux systèmes de protection cathodique :

- Anodes sacrificielles
- Courant imposé (poste de soutirage redresseur de protection cathodique) [11]

3.1. Anodes sacrificielles

Les systèmes d'anodes sacrificielles, utilisant des anodes galvaniques, qui sont faites de magnésium ou de zinc sous forme de barres, installent les anodes enterrées directement dans le sol entouré d'un mélange chimique et emballées dans des sacs spéciaux.

Les anodes sont connectées au système individuellement ou en groupes. Les anodes galvaniques sont limitées dans leur courant de sortie par la tension du système et la résistance du circuit. Des systèmes imprimés de type courant doivent être utilisés pour la protection cathodique des grandes structures revêtues exposées ou détériorées.

Le nombre d'anodes nécessaires à la protection cathodique des réservoirs de stockage hors sol dépend du besoin en courant total et du courant de décharge moyen individuel des anodes au sol. Lors du calcul du placement de l'anode, les facteurs influençant la distribution actuelle sur la géométrie de la structure doivent également être pris en compte.

Généralement, une meilleure distribution du courant et une polarisation plus uniforme sont obtenues en répartissant uniformément les anodes autour du réservoir ou sous les réservoirs nouvellement construits. [11]



Figure 37 ANODES EN MAGNÉSIUM

3.1.1. La composition chimique de l'anode sacrificielle :

Les anodes en magnésium sont disponibles avec plusieurs compositions chimiques différentes mais en deux types génériques de base avec des tensions de sortie d'environ 1,55 et 1,75 V (par rapport une électrode de référence cuivre/ sulfate de cuivre).

Composition chimique	Sortie (Cu/CuSO ₄)	
	BAS POTENTIEL 1,55 V	HAUT POTENTIEL 1,75 V
Aluminium	5,3-6,7%	0,01% maxi
Zinc (Zn)	2,5-3,5%	-
Cuivre (Cu)	0,08% maxi	0,02% maxi
Silicium (Si)	0,3% maxi	0,05% maxi
Manganèse (Mn)	0,25% min	0,5-1,3%
Fer (Fe)	0,005% maxi	0,03% maxi
Plomb (Pb)	0,03% maxi	-
Autres impuretés, chacune	-	0,05% maxi
Total autres impuretés	-	0,30% maxi
Magnésium	Reste	Reste
Capacité (Ah/kg)	1230	1230

3.1.2. Applications des anodes en magnésium en protection cathodique :

Parmi les matériaux utilisés pour fabriquer des anodes sacrificielles, le magnésium est celui dont la tension de polarisation dynamique est la plus élevée et il est le plus souvent utilisé pour les installations à terre (dans des électrolytes plus résistifs) où l'emploi de zinc et d'aluminium ne serait pas économique.

3.1.3. Anodes pré-backfillées :

Les anodes utilisées pour les conduites, les cuves et les réservoirs enterrés sont généralement fournies pré-conditionnées dans un sac en coton entouré d'un backfill. L'environnement créé par le backfill aide à générer un courant de sortie et une vitesse de dissolution plus uniformes et il abaisse la résistance de l'électrolyte. Les anodes utilisées dans des sols à faible résistivité peuvent être fournies nues.



Figure 38 ANODES EN MAGNÉSIUM

AVANTAGES :

- Installation facile
- Faible entretien
- Distribution de courant uniforme
- Aucune source d'énergie externe nécessaire

LIMITATIONS :

- Faible courant fourni
- Inefficace dans des environnements de haute résistivité

3.2. Protection cathodique par courant imposé

Il consiste à relier le métal à protéger avec le pôle négatif d'une source de courant continu d'alimentation, courant pur ou rectifié, et le pôle positif à une électrode auxiliaire (anode). Ce système est connu sous le nom de protection cathodique à courant imposé.

Les anodes à courant imposé doivent être constituées de matériaux tels que le graphite ; fonte à haute teneur en silicium ; métaux platinés ; la magnétite et un mélange d'oxydes métalliques, entre autres. Ces anodes sont installées nues avec un matériau de remplissage spécial (tel que du graphite en poudre à haute teneur en carbone). Ils sont connectés, individuellement ou en groupe, à une borne positive ou à une source de courant continu, au moyen de conducteurs isolés. La structure est connectée à la borne négative, à partir d'une source de courant continu.

AVANTAGES :

- Large gamme de tension et de courant de sortie
- Efficace pour structures nues ou mal revêtues
- Efficace dans un environnement de haute résistivité

LIMITATIONS :

- Elle nécessite plus de maintenance
- Le coût pour l'alimentation continue
- Il peut provoquer des interférences par des courants parasites
- Dommages dans la protection dans le revêtement

Chapitre 02 : La partie Expérimentale

1. La corrosion de bac de stockage R8 dans la région TFT :

1.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons présentés, Faisant suite à une demande faite par la division de Production (DP) dans la région industrielle de TFT et après le sablage des tôles du fonds et de la première virole du bac suite aux recommandations mentionnées dans le rapport d'expertise précédent, nous avons procédé à une seconde expertise technique sur les tôles du fonds et les tôles de la 1ère virole du bac de stockage R8 se trouvant au centre de stockage CPC, cette opération fait par une organisation spécifique des expertises et de contrôle de qualité.

1.2. Caractéristiques techniques de l'équipement :

Bac cylindrique vertical à toit fixe constitué de 05 viroles sous forme d'une enveloppe cylindrique verticale avec un toit conique soudé.

Constructeur / pays	ENCC HASSI AMEUR / Algérie
Année de fabrication	1991
Repère	R8
Fluide emmagasinée	Hydrocarbures
Pression de service (bar)	Atmosphérique
Code de construction	API 650 STD
Type	Aérien
Surépaisseur de corrosion (mm)	03
Capacité (m3)	1000
Hauteur (mm)	10950
Diamètre intérieur (mm)	34137

1.3. OBJECTIF :

Le but de l'expertise est de déterminer les différentes anomalies et défauts rencontrés dans les tôles du fond et de la 1^{ère} virole, pour se faire l'inspection du bac se décompose de la façon suivante :

- Contrôle visuel de toutes les tôles, soudures et de leur état général.
- Contrôle de l'épaisseur résiduelle moyenne par sondage.
- Evaluation approximative et recommandations de l'état général des tôles du fond et de la 1^{ère} virole.

1.4. CONSTATS ET OBSERVATIONS VISUEL :

Nos constats et observations vont se porter sur l'ensemble des tôles du fond ainsi que sur les tôles de la première virole, l'état de surface visuel se présente comme suit :

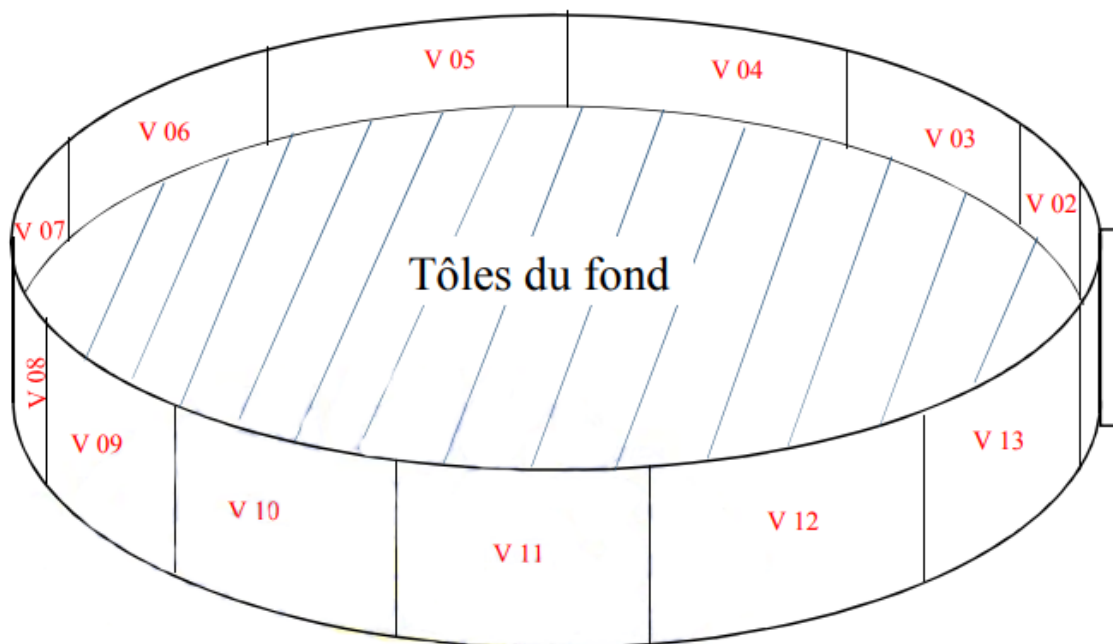


Figure 39 : Représentation schématique approximative de la répartition des tôles de la 01^{ère} virole du bac R8

1.4.1. Tôles du fonds :

a. Etat général :

L'aspect général du fonds qui a déjà subi des réparations par des points de rechargement **Fig39** et par le soudage des rustines uniquement au niveau de la jonction entre les tôles de la 01^{ère} virole et celles du fonds, **Fig40** révèle un relief irrégulier sur certaines tôles due à leur gondolement **Fig41**.

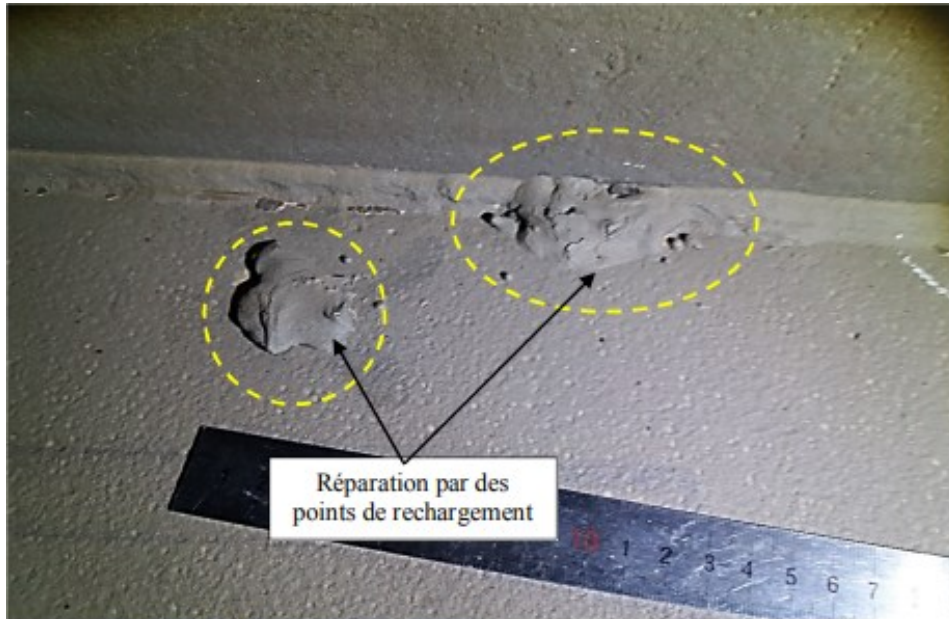


Figure 40 Réparation par des points de rechargement

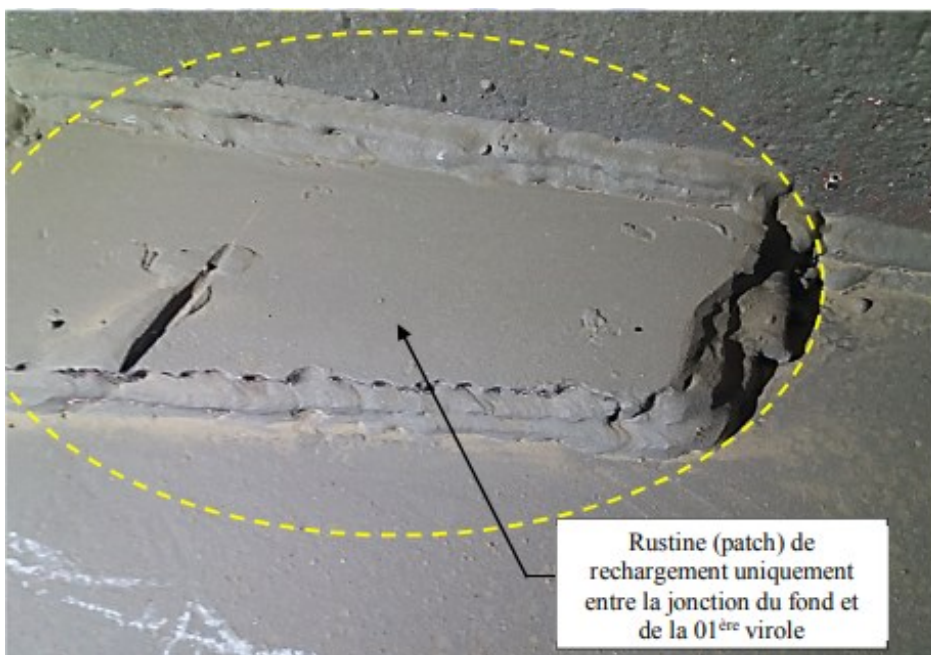


Figure 41 : Réparation par rustine (patch) uniquement entre la jonction du fond et de la 01^{ère} virole

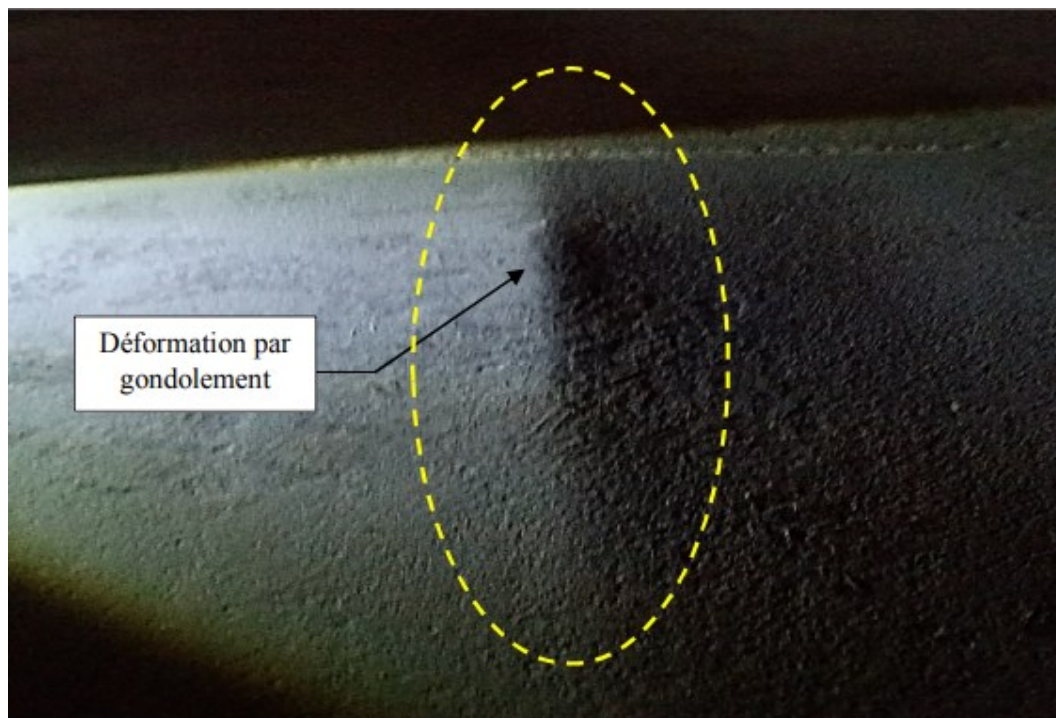


Figure 42 : Déformation par gondolement

b. La liste des défauts de corrosion existés :



Figure 43 Pique de corrosion légère



Figure 44 Piqures de corrosion sévère



Figure 45 Piqures de corrosion traversante



Figure 47 Corrosion sous forme d'égratignure



Figure 46 Légère corrosion au niveau de cordon de soudure

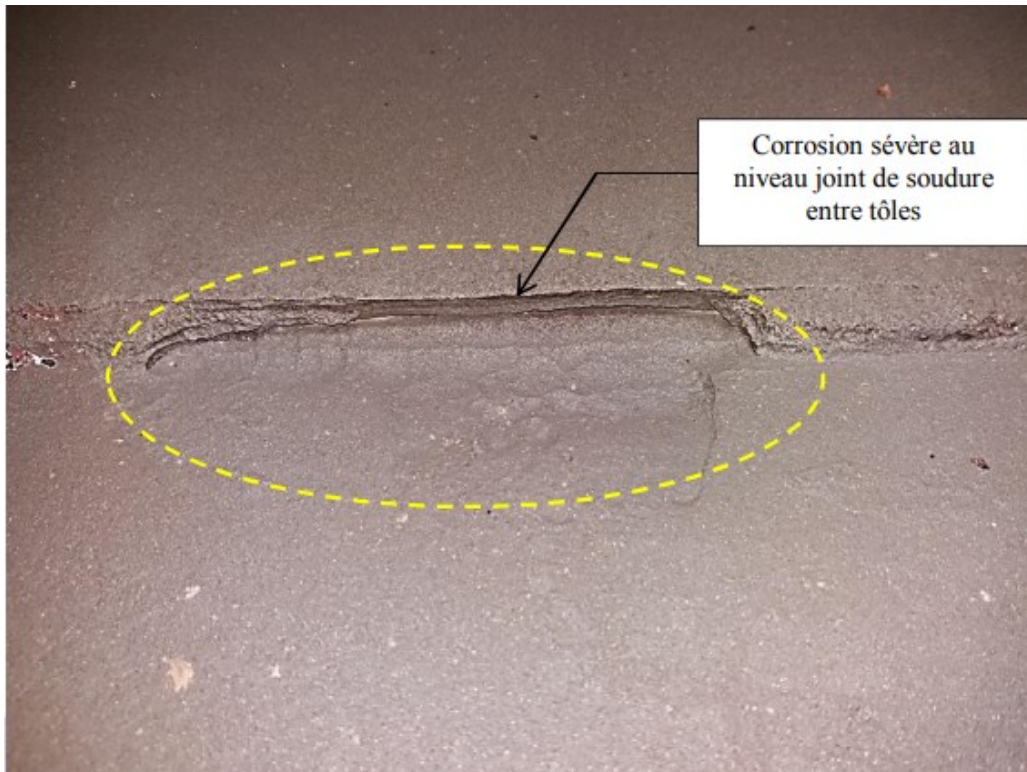


Figure 48 : Corrosion sévère au niveau de joint de soudure entre tôles

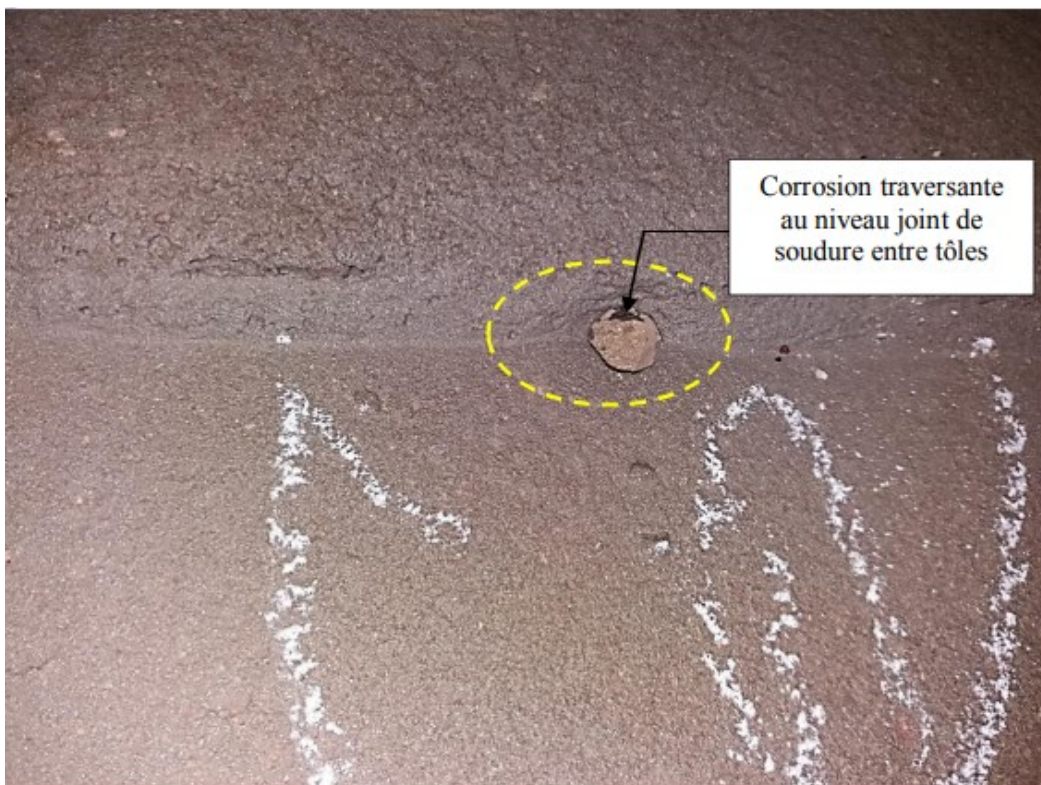


Figure 49 Corrosion traversante au niveau joint de soudure entre tôles



Figure 50 Regroupement de piqures de corrosion légère formant un nid



Figure 51 Regroupement de piqures de corrosion sévère formant un nid

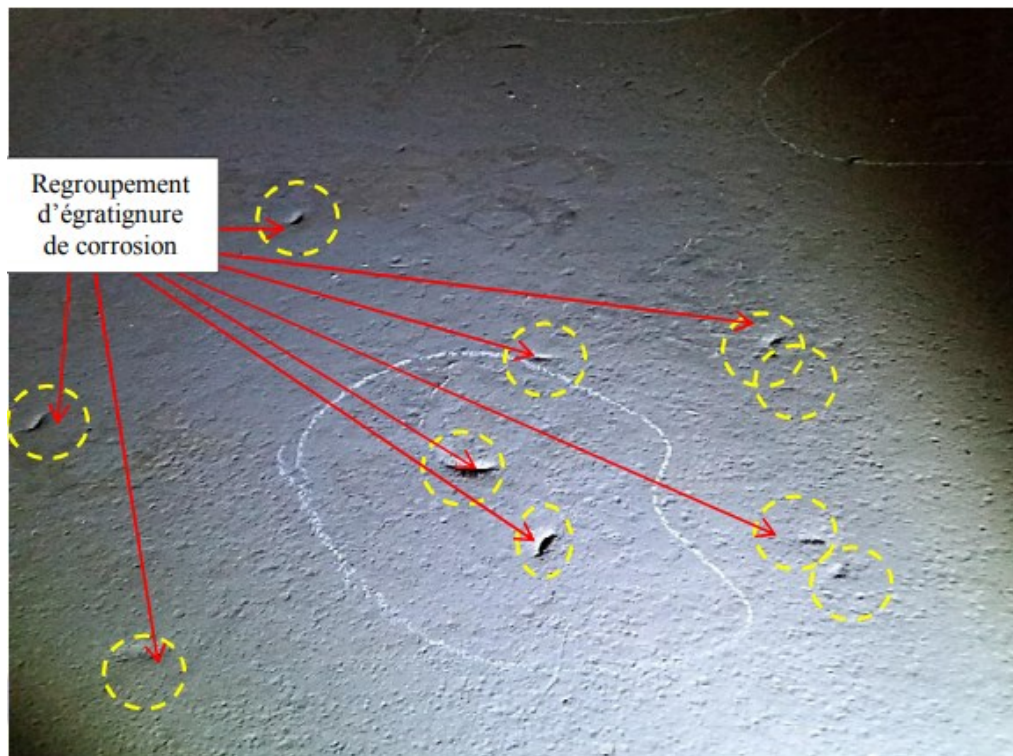


Figure 53 Regroupement d'égratignure de corrosion

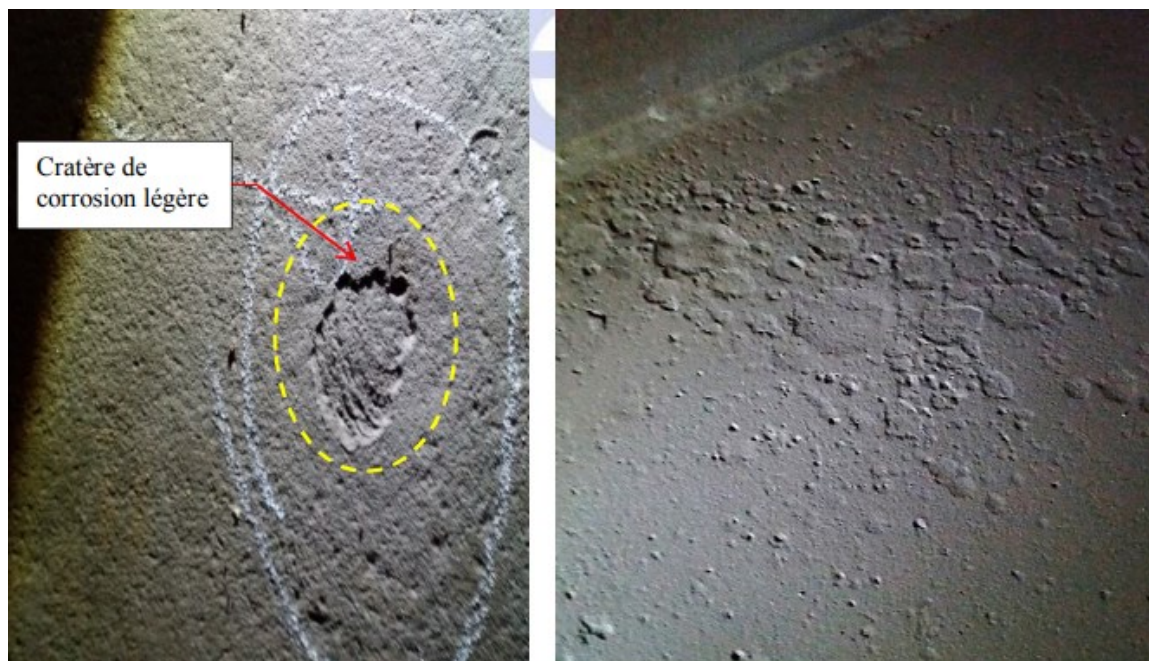


Figure 52 Cratère de corrosion légère

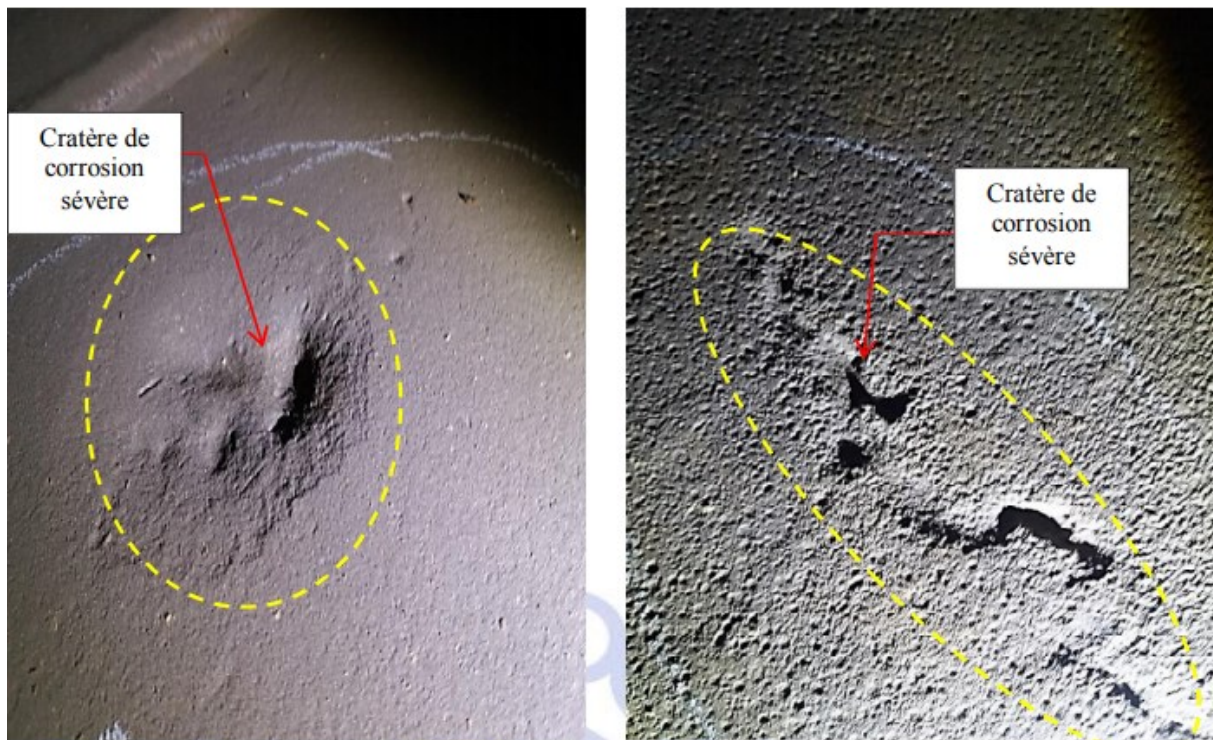


Figure 54 Cratère de corrosion sévère

Ainsi des défauts de soudage sont également rencontrés sur les rustines de rechargements due à la mauvaise application du procédé de soudage conduisant ainsi à des cordons de soudure irréguliers avec des porosités qui nécessitent un meulage et un rechargement.

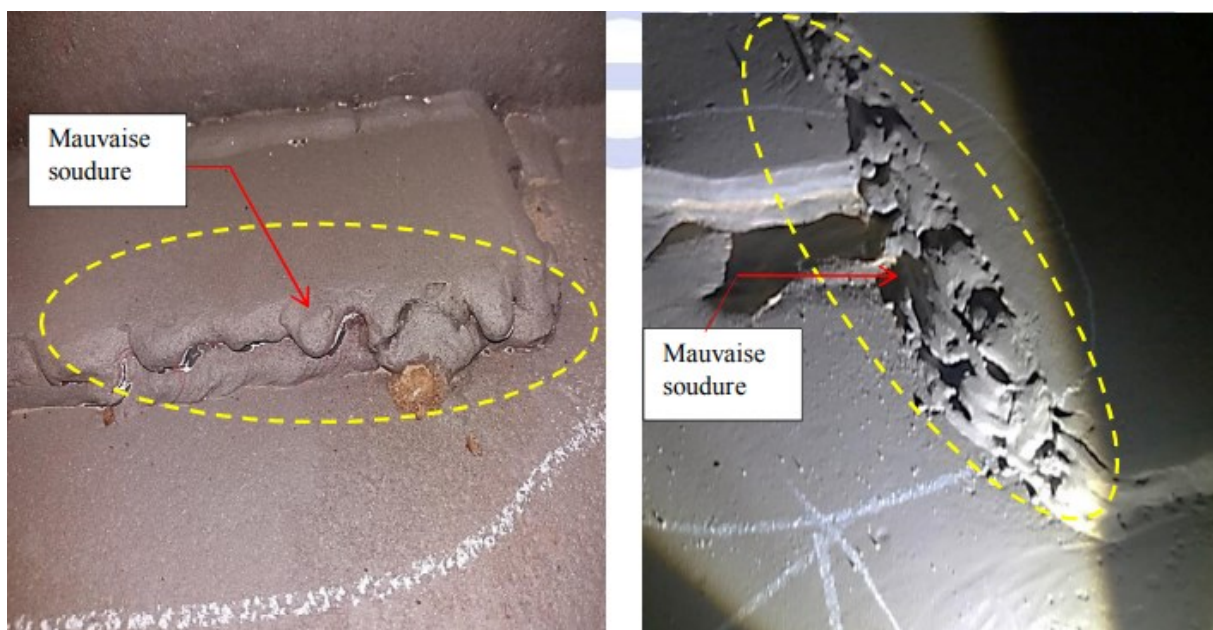


Figure 55 Mauvaise soudure qui peut présenter des points faibles pour la corrosion

c. Etat des tôles pour chaque rang

Pour les défauts de corrosion : Ce tableau représente la distribution des défauts de corrosion dans les tôles de fond,

N° Tôle	Corr légère	Corr sévère	Corr traversante	Corr joint de soudure	Autres défauts	Nbres Total défauts	
A	01	Nid piq	2egr + 06	01		10	
	02		Nid piq			01	
	03	02egr	Nid piq			M+S Rust 04	
	04		Nid piq	01		02 (M+S Rust) 04	
	05	01egr	01egr P.R+Nid piq	06		M+S P.R 10	
	06	01egr	05+nid piq	08	01 leg		16
	07		nid piq+01 Egr		01 Sev	02(M+S P.R)	05
	08	08 egr	Nid piq				09
	09	Nid egr					01
	10	Nid piq	01		02 leg		04
	11	Nid piq	01				02
	12	01 egr			02 leg		03
	13	01+01egr	01 egr + 01	01	04 leg +03 sev	Mauv soud support	13
	14	04	02		02 leg +01 sev		10
	15	01+01egr	02		02 leg		06
	16	03egr +01	01		01 leg		06
	17	02egr +02			01 leg		05
	18	01egr +01			03 leg +01 sev	M+S P.R	07
	19	06egr +01			03 leg		10
	20	08egr +01	04	01	01 crat		15
	21	07egr +Nid piq	01		01 leg		10
	22	02egr +02					04
	23	02egr / Nid piq 03					03
	24		24 05egr + nid pîq	03		M+S J.S	10
	25					M+S J.S	01
01		Nid piq				01	
02		Nid piq	16	02 Tr Rust	M+S Rust/2(M+S P.R) /02(M+SJ.S)/06(S P.R)	30	
03		07+nid pîq	06	01 Tr	S.Rust/2S/5(M+S P.R)	23	
04	Nid (Egr+piq)	06egr+02	08	04 leg	M P.R	22	
05	02Egr	01egr+03	05	01 Sev	03(M P.R)	15	

B	06	Nid piq	02		06 leg		09
	07	Nid piq	02		03 leg		06
	08	Nid piq			05 leg		06
	09	02 Egr	02				04
	10	01	01		07 leg		09
	11	02	03		03 leg		08
	12	01Crat+01	02Crat				04
	13	01Crat	02Crat+01		02 leg		06
	14	02			02 leg		04
	15	02	02Crat+02	01		M grains	08
	16	Nid piq	02egr+01		02 leg		06
	17	02	02				04
	18		02				02
	19					2(M+S Rust)/ 2(M+S P.R)	04
20					2 (M+S Rust)	02	

Tableau 1 Détails des défauts sur le fond du bac (partie 01)

N° Tôle	Corr légère	Corr sévère	Corr traversant	Corr joint de soudure	Autres défauts	Nbres Total défauts	
C	01	Nid piq	02	03	01 Sev		07
	02		Nid piq	05			06
	03	02	Nid piq/06Crat	15		2(M+S Rust)	26
	04		Nid piq/11Egr	09			21
	05	04 Egr	Nid (piq+Crat)	08			14
	06		Nid piq	04		3(M+S P.R)	08
	07		Nid piq	02			03
	08	01	04	01	01 Leg		07
	09	1+2Egr	04	01	02 Leg		10
	10	01	8+3Crat	15	01 Leg		28
	11	07	Nid crat				08
	12	03	01+01Egr		01 Leg		06
	13	04+3Egr	05			(M+S Rust)/M grains	14
	14	08Egr	02+03Egr			M+S (Rust+P.R)	15
	15	01+3Egr	02+13Egr			M+S Rust	20
	16	3Egr	01			2(M+S Rust) / M grains	07
	17					M+S Rust	01
D	01		Nid piq				01
	02	Nid piq		05	01 Tr	3(M+S P.R)	10
	03	04 Egr		02			06
	04		02		01 Leg	M+S (Rust+P.R)	05
	05		Nid piq	05	01 Leg	02M+SRust /Crat S.L.Exp	10
	06			11		2(M+S Rust) / M+S P.R	14

	07	02 Egr		03	01 Tr	M+S Rust	07
	08	/	/	/	/	/	/
<i>Tableau 2 Détails des défauts sur le fond du bac (partie 02)</i>							
N° Tôle		Corr légère	Corr sévère	Corr traversante	Corr joint de soudure	Autres défauts	Nbres Total défauts
G	01	01				01 S	02
	02		01			01(Me + S)	02
	03	Nid piq	03	06		Me + S	11
	04	Nid piq	01(S.D)		04(Lég)		06
	05	02/ 08 Egr			01 Sev Patch	Me + S	12
	06	01			01Leg / 01Sev	M+ S	04
	07	01			01Leg / 01Sev	M P.R	04
	08	/	/	/	/	/	00
F	01	Nid piq				M+S	02
	02	01	Nid piq	16			18
	03	Nid piq	01				02
	04	Nid piq	02		01Leg	S	05
	05	Nid piq	03	05	01Leg		10
	06	Egr		02			03
	07	01 + Egr	02				04
	08	2Crat+1	02		01Leg		06
	09	01 Egr			05Leg		06
	10	04 Egr			01 Sev		05
	11			01	02Sev + 01Leg		04
	12			01	02Leg		03
	13		02	02	03Sev		07
	14	05Crat	02		01Leg		08
	15	01			01Leg		02
	16		01	01			02
	17	/	/		/	/	00
E	01				01 Tr entre tôles	M+S Sous.P.T	02
	02	05Egr/ 01	04 /Nid piq	04		M+S Rust	16
	03	02/Nid piq	02	10			15
	04	02 /01Egr	05/Nid piq	05			13
	05	01/Nid piq	02	02			06
	06	02	02/ Nid piq	04	03 Leg		12
	07		06/ Nid piq		08Sev		15
	08	01	01	02	01Sev		05
	09	06Egr			02Leg		08
	10	01Crat			03Sev		04
	11	01Egr			02Leg/01Sev		04
	12	06Egr			01Leg/02Sev	M+S P.R	10

13	/	/	/	/	/	00
14				03Leg		03
15	01Egr	01/Nid piq	01	02Leg		06
16	03Egr			03Leg / 02Sev		08
17	Nid Egr					01
18	Nid Egr	02				03
19	Nid Egr /1					02
20	/	/	/	/	/	00

Tableau 3 Détails des défauts sur le fond du bac (partie 03)

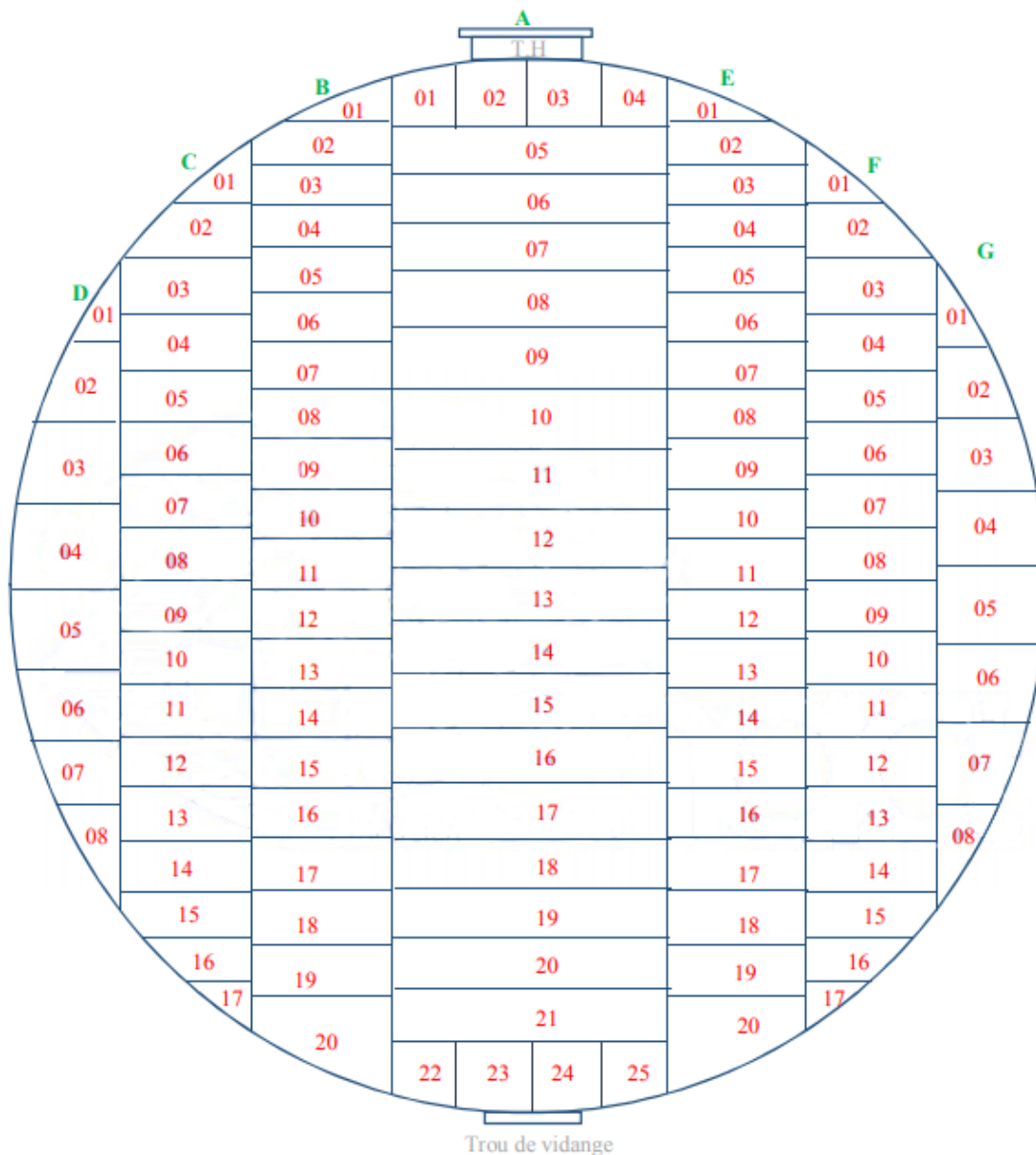


Figure 56 La représentation schématique des tôles du fonds

Avec

P.R : Point de Rechargement / **Sev** : Corrosion sévère / **Lég** : Corrosion légère / **Tr** : Corrosion traversante / **S.D** : Sous la ligne de Drainage / **S.P** : Sous Plaque / **Egr** : corrosion sous forme d'égratignure / **M** : Meulage / **S** : Soudage /

M+S : Meulage + soudage / **Crat** : cratère de corrosion / **S. P.T** : Sous plaque de touche /

Rust : Rustine (patch) / **Nid piq** : regroupement de corrosion formant un nid / **Crat** : Cratère / **J.S** : Joints de soudure /

S.L.Exp : Sous la ligne d'expédition / **Mauv soud support** : mauvaise soudure du support

Pour les défauts de déformation :

La plupart des tôles du fonds ont subi des déformations dont certaines d'entre elles se présentent dans un état grave.

1.4.2. Tôles de la première virole :

- ✓ L'ensemble des tôles sur le 01^{er} quart de la première virole représente un aspect érosif par la présence des cratères et piqures de corrosion allant de légère et sévère, tandis que dans les $\frac{3}{4}$ restante la corrosion n'est que partielle avec les même forme et type que dans le $\frac{1}{4}$ des tôles.

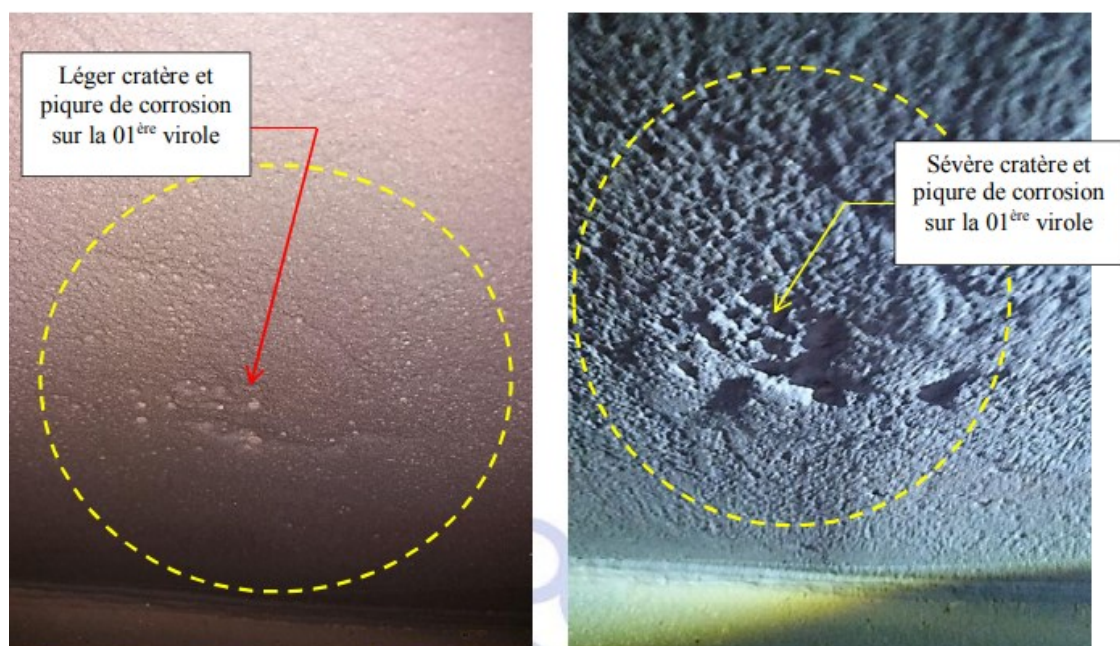


Figure 57 Léger et sévère cratères et piqures et piqures de corrosion sur la 01^{ère} virole

- ✓ Début de dégradation de la bride de la ligne d'expédition au niveau de la V10.



Figure 58 : Dégradation par corrosion de la bride de la ligne d'expédition côté arrière

- ✓ Dégradation importante des supports de tube de jaugeage et des tiges de la plaque de touche.



Figure 59 Dégradation par corrosion des supports de tubes de jaugeage

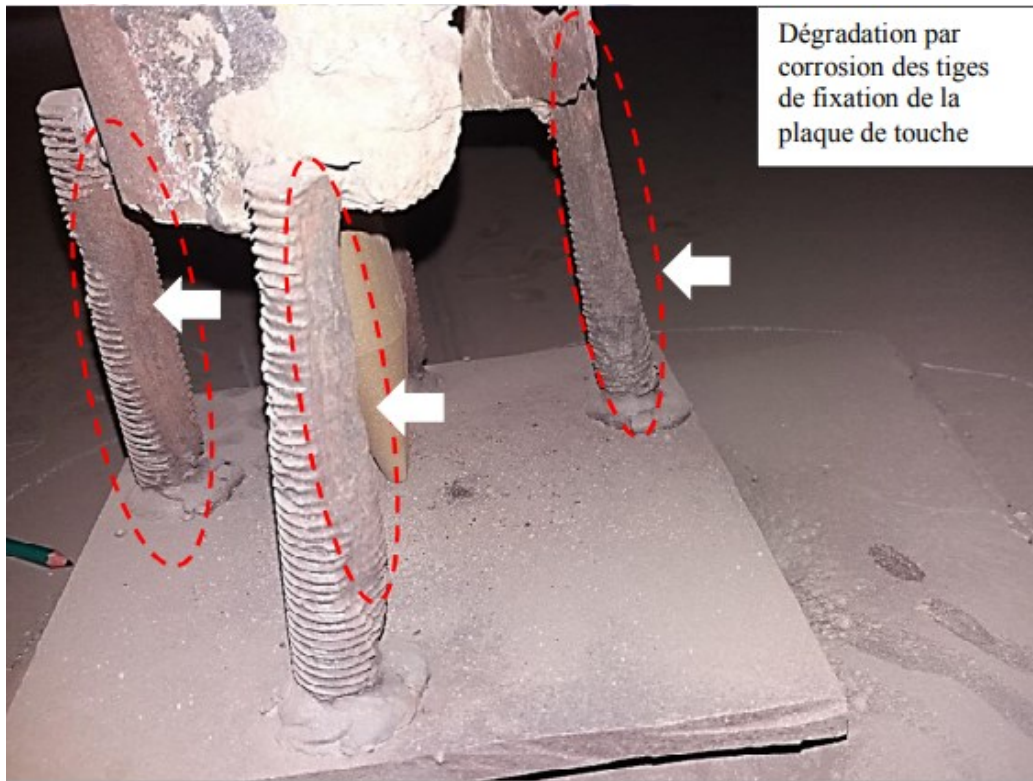


Figure 60 Dégradation par corrosion des tiges de fixation de la plaque de touche

✓ Corrosion sévère sur un piquage sur la 04^{ème} virole.

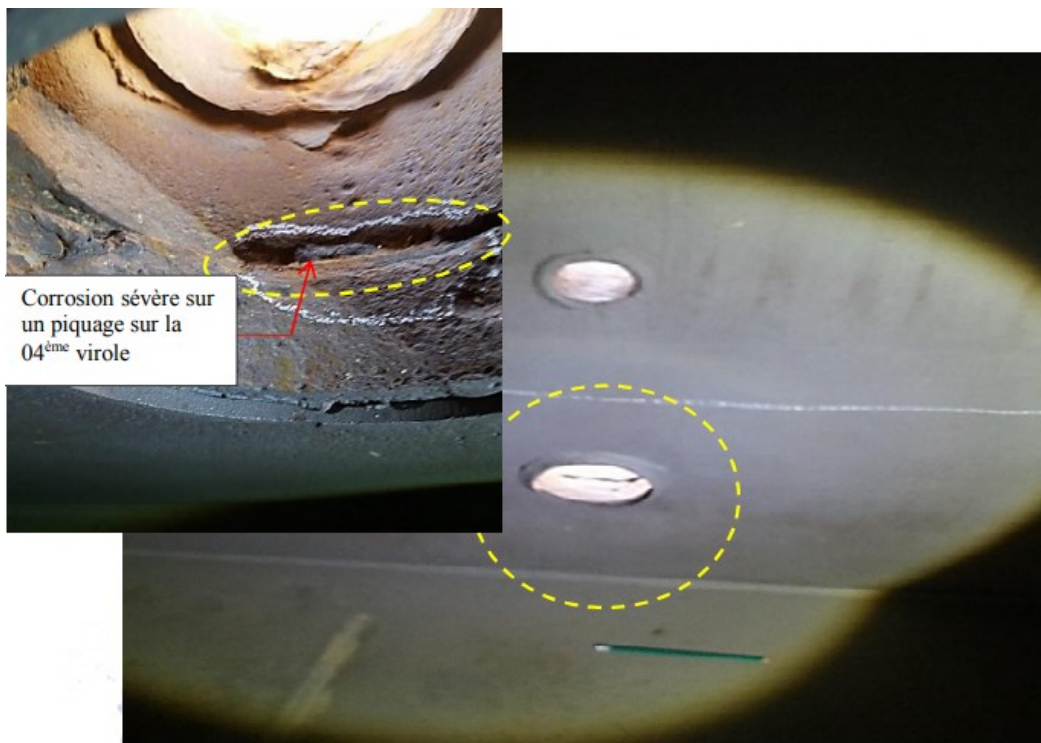


Figure 61 Corrosion sévère sur un piquage sur la 04^{ème} virole

- ✓ Aspect érosif sous le support de la plaque de touche au niveau de la 01ère virole.

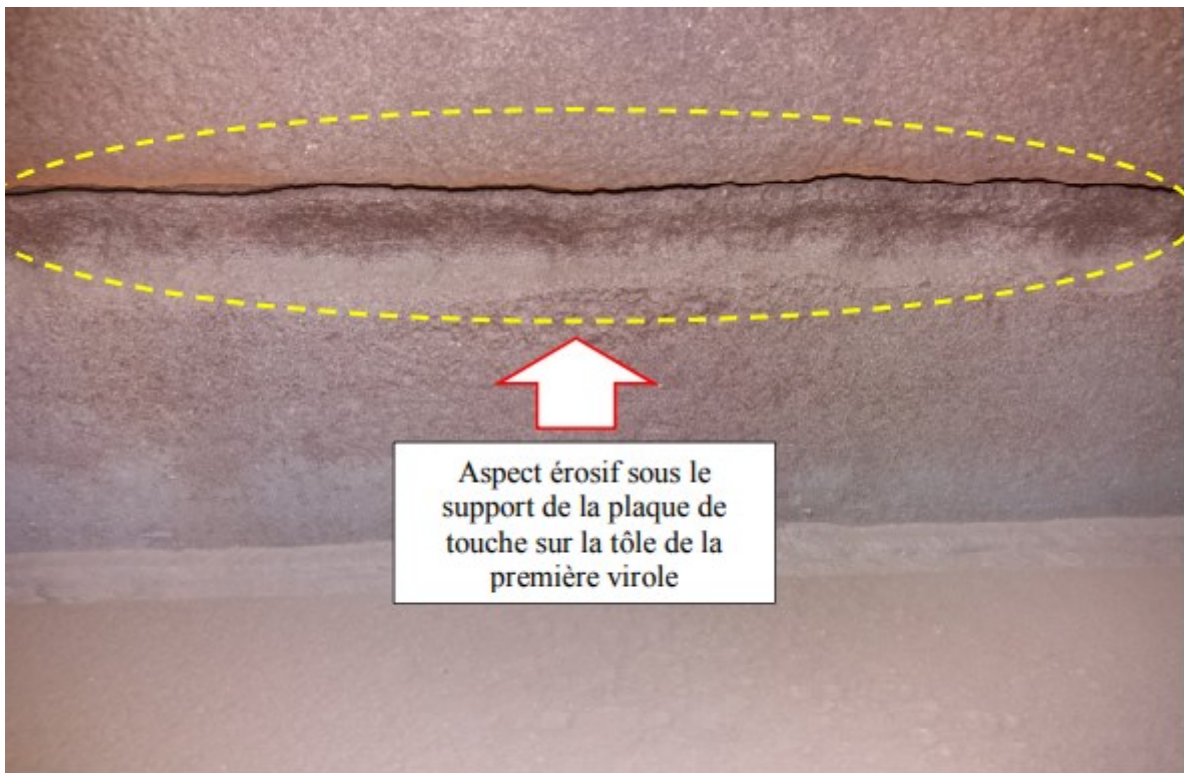


Figure 62 Aspect érosif sous le support de la plaque de touche sur la tôle de la première virole

1.5. MESURE PAR ULTRASON :

Le contrôle par ultrasons est une méthode de contrôle non destructif permettant la détection de défaut à l'intérieur d'un matériau. Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission et la réflexion d'onde de type ultrasons à l'intérieur d'un matériau. Les ondes utilisées peuvent être libres (de compression ou de cisaillement) ou guidées (de surface ou de plaque).

1.5.1. L'équipement utilisé :

Le **27MG** d'Olympus est un mesureur d'épaisseur à ultrasons peu coûteux conçu pour prendre des mesures précises d'un seul côté des tubes métalliques, des réservoirs et d'autres équipements corrodés ou érodés par l'intérieur. Sa conception légère (seulement 340 g) et ergonomique permet de le manipuler à une main. Malgré sa petite taille, ce mesureur d'épaisseur est doté d'un grand nombre de fonctions novatrices tirant profit des mêmes technologies que nos mesureurs d'épaisseur plus avancés. Alimenté par batteries, cet appareil durable et robuste est équipé d'un grand écran LCD à rétroéclairage facilitant la lecture des chiffres. Il offre aussi un clavier à code de couleurs intuitif donnant un accès direct à de nombreuses fonctions essentielles. [12]



Figure 63 Le mesureur d'épaisseur portable 27MG

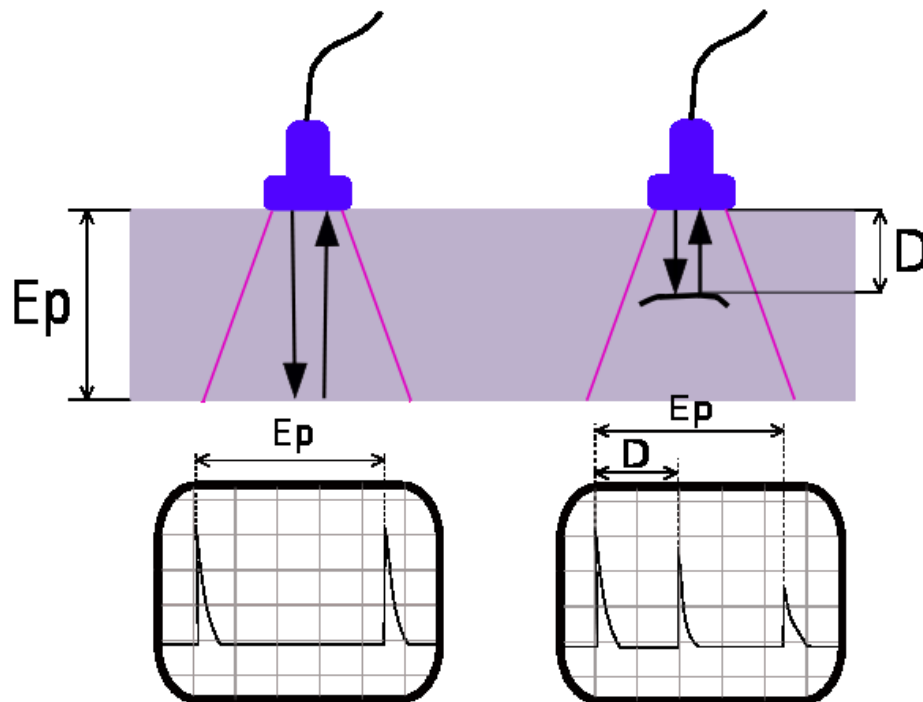
Les fonctions standard sont les suivantes : reconnaissance automatique des sondes pour optimiser la performance, compensation de zéro automatique pour améliorer la précision des mesures effectuées sur les surfaces à température élevée, réglage du gain pour améliorer les mesures sur les matériaux à forte atténuation (comme le métal coulé), mode différentiel, alarmes hautes et basses et mode minimum et maximum qui conserve la mesure minimale ou maximale à 20 mesures par secondes. [12]

1.5.2. Principe :

Une onde ultrasonore est émise par un transducteur placé sur la surface du matériau à contrôler et se propage dans le matériau. Il existe des méthodes par contact (le palpeur est en contact avec la pièce) ou par immersion (la pièce et le palpeur sont immergés dans de l'eau). Dans le cas de la méthode par contact, il est nécessaire d'ajouter un couplant (eau ou gel) entre le palpeur et la pièce pour assurer la transmission des ondes. Lorsque ces ultrasons rencontrent une interface délimitant deux milieux ayant des impédances acoustiques différentes, il y a réflexion. Les ultrasons réfléchis sont captés par un palpeur (qui peut être le même que l'émetteur). Il y a création d'un « écho ».

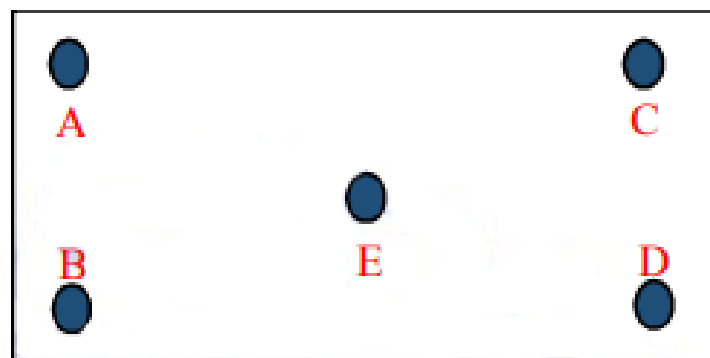
Dans le cas d'une pièce comportant deux surfaces, la détection de défaut se fait en comparant le temps mis pour faire un aller-retour dans l'épaisseur de la pièce et le temps mis pour la réflexion sur un défaut.

D'un point de vue pratique, on utilise un écran d'oscilloscope. Les échos sont représentés par des pics sur l'écran. [13]



1.5.3. Epaisseurs du fonds et de la 01ère virole :

Les 115 tôles du fond ont été contrôlées par ultrason 27MG depuis l'intérieure à raison de 05 points par tôle selon le schéma suivant :



✓ Les mesures des tôles de Fonds :

Tôle N°	A [Mm]	B [Mm]	C [Mm]	D [Mm]	E [Mm]	Tôle N°	A [Mm]	B [Mm]	C [Mm]	D [Mm]	E [Mm]		
A	01	6.70	7.15	6.82	7.80	6.28	B	01	7.36	7.42	8.15	7.39	8.37
	02	8.82	8.46	8.95	8.36	8.51		02	7.77	6.22	7.77	8.57	5.89
	03	8.53	8.52	8.16	7.64	8.50		03	8.04	7.27	7.07	8.48	8.96
	04	7.27	7.41	6.93	7.97	8.51		04	8.22	7.95	8.68	8.77	7.59
	05	7.68	8.43	7.39	8.24	8.10		05	7.91	7.62	8.89	8.74	8.68
	06	8.29	8.72	8.68	8.61	8.38		06	8.61	8.39	8.38	8.47	8.42
	07	7.59	8.84	8.70	7.88	7.14		07	8.36	8.27	7.76	8.71	8.46
	08	8.63	8.75	8.95	8.76	8.95		08	8.36	8.52	8.56	8.54	8.66
	09	8.92	8.77	8.20	8.33	8.20		09	8.92	8.66	8.59	8.72	7.14
	10	8.53	8.30	8.82	8.64	8.59		10	8.14	8.94	8.64	8.68	8.48
	11	8.82	8.71	8.70	8.04	8.20		11	7.02	8.30	8.70	8.86	8.63
	12	8.85	9.03	8.43	8.92	8.22		12	8.44	8.37	8.14	7.14	8.26
	13	8.72	8.10	8.78	7.88	8.54		13	5.63	7.90	8.84	8.66	6.02
	14	8.94	8.52	8.43	8.64	8.13		14	8.36	6.14	8.71	8.88	8.39
	15	8.50	8.56	8.42	8.31	8.84		15	8.20	8.66	8.46	8.23	8.31
	16	8.74	8.14	9.02	8.76	8.91		16	8.75	8.86	7.77	8.32	6.94
	17	8.82	8.17	8.84	8.64	8.66		17	8.06	8.74	8.91	8.84	7.34
	18	8.66	8.10	8.81	8.07	8.85		18	7.74	8.10	8.72	8.41	8.36
	19	9.84	8.23	8.93	8.61	8.94		19	7.78	7.58	8.75	8.26	8.57
	20	8.77	8.20	7.71	8.42	8.73		20	8.66	8.92	8.47	8.89	8.91
	21	8.36	8.15	8.57	9.06	8.36		/	/	/	/	/	/
	22	8.63	8.14	8.33	8.14	8.04		/	/	/	/	/	/
	23	8.75	8.69	8.47	8.72	8.70		/	/	/	/	/	/
	24	8.74	8.73	8.58	8.84	8.89		/	/	/	/	/	/
	25	8.86	7.71	8.41	8.47	8.32		/	/	/	/	/	/

Tôle N°	A [Mm]	B [Mm]	C [Mm]	D [Mm]	E [Mm]	Tôle N°	A [Mm]	B [Mm]	C [Mm]	D [Mm]	E [Mm]		
D	01	8.56	7.56	7.28	8.30	7.97	G	01	8.01	8.18	8.32	7.98	8.13
	02	8.15	7.09	8.54	8.32	8.59		02	8.27	8.50	8.75	8.20	8.37
	03	8.73	7.86	8.32	8.64	8.51		03	8.01	5.43	6.66	8.34	8.86
	04	8.28	8.25	8.89	7.17	8.00		04	8.15	8.66	5.22	8.60	8.70
	05	7.88	8.30	8.04	7.62	7.20		05	8.74	8.48	8.46	8.74	8.59
	06	8.85	8.10	8.20	7.33	7.95		06	8.72	8.70	7.47	8.73	7.48
	07	7.97	8.14	8.02	8.28	8.09		07	8.64	8.56	8.39	7.75	8.44
	08	8.25	8.10	8.14	8.32	7.93		08	8.43	8.93	8.54	8.12	8.11
	01	7.53	7.61	5.62	8.82	7.44		01	8.78	8.44	7.15	7.23	6.88
	02	7.70	8.37	8.15	8.85	7.06		02	7.02	7.20	6.82	5.32	8.32
	03	8.28	6.73	7.99	7.49	7.24		03	8.28	8.59	8.03	7.42	8.34
	04	8.94	6.32	8.41	7.50	8.61		04	7.06	8.68	7.84	8.90	9.01
	05	8.84	6.39	7.12	8.72	6.91		05	8.61	6.50	8.63	8.35	8.68
	06	8.46	7.74	7.53	8.94	8.24		06	8.78	8.40	8.64	9.01	8.94
	07	8.14	8.71	8.20	8.91	8.95		07	8.53	8.50	8.92	8.42	8.14
	08	8.84	7.87	8.94	8.88	8.78		08	8.95	8.45	8.77	7.75	8.78

C	09	8.04	8.49	8.15	8.52	8.82	F	09	8.50	8.15	8.28	8.67	8.96
	10	8.12	7.84	8.68	5.15	7.77		10	8.81	8.42	8.40	9.01	8.91
	11	8.48	9.01	8.41	6.74	9.01		11	8.14	8.75	8.38	8.84	8.42
	12	8.64	8.47	8.87	8.70	9.01		12	8.58	8.70	8.66	8.43	8.30
	13	8.42	8.56	8.24	8.84	8.87		13	7.86	8.90	8.99	7.58	8.56
	14	8.76	8.14	8.66	8.71	8.97		14	8.87	8.82	7.94	7.85	8.86
	15	8.17	8.45	8.70	8.27	8.70		15	8.72	8.93	8.32	8.74	8.90
	16	8.64	8.70	8.24	8.66	8.42		16	8.44	8.39	9.04	8.39	8.21
	17	8.70	8.28	8.16	8.34	8.52		17	8.52	7.88	8.26	8.53	8.05

Tôle N°		A [Mm]	B [Mm]	C [Mm]	D [Mm]	E [Mm]
E	01	8.42	8.80	6.56	8.05	7.33
	02	8.90	7.51	8.02	8.30	6.74
	03	8.60	9.00	6.76	8.19	8.43
	04	8.77	8.44	7.95	8.64	8.36
	05	7.34	5.58	8.22	8.32	8.47
	06	8.39	8.76	7.92	8.16	7.94
	07	8.11	8.66	8.64	8.86	8.90
	08	8.17	8.72	8.76	8.19	8.02
	09	8.71	8.50	8.43	7.86	8.87
	10	8.42	8.66	8.58	6.62	8.38
	11	8.71	8.38	8.63	8.20	8.55
	12	8.63	8.14	8.26	8.14	8.64
	13	8.58	8.74	8.86	8.24	8.36
	14	8.84	8.70	8.66	8.74	8.59
	15	8.60	8.36	7.96	8.83	8.74
	16	8.66	8.64	8.52	7.94	8.44
	17	8.74	8.58	8.02	7.56	8.36
	18	8.38	8.52	8.77	7.78	8.56
	19	8.74	8.24	8.44	8.49	8.45
	20	8.66	8.42	8.57	8.40	8.90

✓ Les mesures de la 01ère virole :

Tôle N°		A [Mm]	B [Mm]	C [Mm]	D [Mm]	E [Mm]
01 ère Virole	01	16.88	17.35	16.93	17.08	17.00
	02	17.02	16.92	17.40	17.04	17.03
	03	17.45	16.75	17.17	16.83	17.26
	04	17.10	16.93	17.04	16.51	17.28
	05	16.99	16.97	17.43	16.58	17.26
	06	17.02	16.71	16.92	17.21	17.35
	07	17.04	16.95	17.25	16.88	17.43
	08	17.06	17.09	17.29	17.07	17.20
	09	17.00	17.05	16.99	16.92	17.14
	10	16.90	16.94	16.97	16.94	17.33

	11	17.42	16.95	16.99	16.94	17.20
	12	16.98	17.02	17.06	17.02	17.00
	13	17.45	16.60	17.20	17.12	17.23

2. Protection cathodique des fonds des bacs de stockage

2.1. Calcul de la pc interne des bacs

2.1.1. Surface à protéger :

✓ Pour les bacs :

$$S_a = \pi \times D \times (D / 4 + H_w)$$

Où :

S_a = Surface totale (m²)

p = facteur qui définit la surface mouillée de l'eau

D = Diamètre interne (m)

L = longueur du bateau (m)

H_w = hauteur du réservoir en contact avec l'eau (m)

✓ Pour les réservoirs enterrés (séparateur, sécheur, colonne, navires...etc.)

$$S_a = \pi \times D \times p \times (L + D)$$

2.1.2. Courant total requis pour la protection :

$$I_t = i \times S_a \times f$$

Où :

I_t = courant total requis (A)

i₀ = densité de courant de protection à une température allant jusqu'à 30 ° C (A / m²)

i = densité de courant de protection à la température de fonctionnement (A / m²) = $i_0 + 0,25 i_0 [(T-30) / 10]$

T = température de fonctionnement (° C)

f = facteur de compensation géométrique

2.1.3. Masse totale d'anode requise pour la protection :

$$W_t = (C \times I_t \times Y) / U$$

Où :

W_t = Masse totale de l'anode requise (kg)

C = taux de consommation d'anode (kg / A / an)

Y = durée de vie théorique (année)

U = facteur d'utilisation de l'anode

2.1.4. Quantité d'anode requise par poids :

$$N'a = W_t / W_a$$

Où :

W_a = Poids de l'anode unique (kg)

N'a = Quantité d'anodes en raison du poids requis de l'anode

2.1.5. RESISTANCE A L'ANODE :

$$R_a = [r / (2 \times L)] \times [\ln (8 L / d) - 1]$$

Où :

R_a = résistance anodique (ohm)

d = diamètre équivalent de l'anode (m)

L = longueur de l'anode (m)

r = résistivité de l'eau (ohm m)

2.1.6. Sortie courant par anode :

$$I_a = (E_a - E_p) / R_a$$

Où :

I_a = Sortie courant anodique (A)

E_a = potentiel du circuit anodique proche (V)

E_p = Potentiel de protection en acier (V)

R_a = résistance à l'anode (Ohm)

2.1.7. Quantité d'anode requise pour satisfaire le courant total requis :

$$N''a = \zeta a / I_a$$

Où :

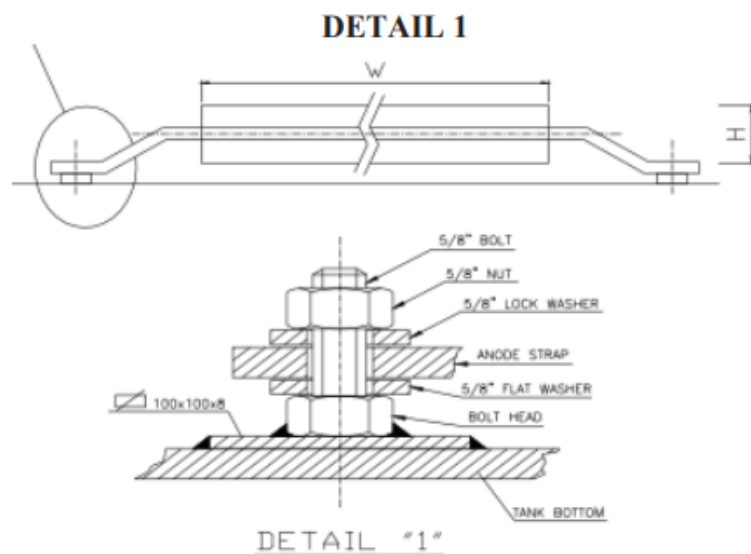
$N''a$ = quantité d'anodes en raison du courant requis

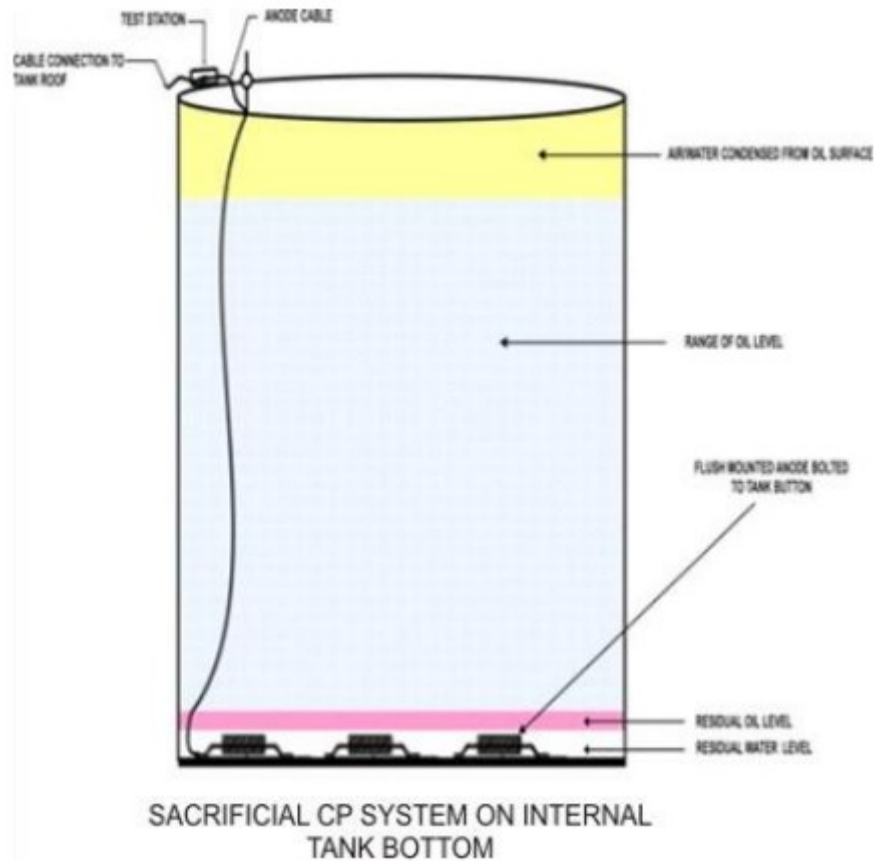
2.1.8. Quantité finale d'anode :

Le plus grand nombre d'anodes entre $N'a$ et $N''a$ définit la quantité finale d'anodes.

2.1.9. Mode d'installation des anodes dans les bacs :

La forme d'anode suivante (montée sur pied) doit être installée sur les parois du réservoir au fond comme suit :





2.1.10. COMPOSITION CHIMIQUE DES ANODES EN ALUMINIUM

L'aluminium doit être un alliage Al-Zn-In, dont la composition est indiquée dans le tableau suivant :

Impuretés matérielles	Composition (%)	Alliage de matériau	Composition (%)
Fe	0.01 max	Zn	2.5 --5.50
Cu	0.006 max	In	0.015—0.040
Si	0.150 max	Al	Reste
Cd	0.002 max		
Autres (totale)	0.15 max		

3. Protection cathodique des fonds des bacs externes (en contact avec le sol)

3.1. Conditions de conception :

Le système CP doit être basé sur l'utilisation du système ICCP pour protéger le fond des réservoirs en contact avec le sol à l'aide d'une entrée de courant continu (transformateur / redresseur) et d'anodes.

Désignation	Valeur	Observations
Type d'anode	Anodes en Ferro-silicium - chrome	/
Poids anodique	23 kg	/
Densité de courant	10 mA /m ²	Le calcul de la densité de courant doit être augmenté de 25% pour chaque augmentation de température de 10 ° C (supérieure à 30 ° C).
Facteur d'endommagement du revêtement	100%	Les surfaces inférieures du réservoir sont considérées comme nues car il s'agit de réservoirs existants et les conditions de revêtement ne sont pas connues.
Durée de vie	20 Années	/
Surdimensionnement de courant continu	30 %	/

3.2. Caractéristiques des anodes en silicium

Tableau des caractéristiques des anodes en ferro-silicium-chrome :

Caractéristique	Valeur
Poids (pour une anode)	23 kg
Capacité de courant pour une anode	0.5 kg/A.an
Efficacité du courant	90%
Facteur d'utilisation	85%
Longueur d'anode	1500 mm
Diamètre d'anode	50 mm

3.3. Critères de protection

Le système doit être conçu pour atteindre un potentiel structure-électrolyte de (-) 750 mV et le potentiel maximal doit être limité à (-) 1 500 mV afin d'éviter une protection excessive de la structure.

Les potentiels doivent être enregistrés par rapport à une électrode de référence saturée de cuivre-sulfate de cuivre (Cu/CuSO₄).

3.4. Notes de calcul

Cette section détaille les calculs de conception pour les réservoirs de stockage. Les formules suivantes seront utilisées pour la conception d'un système de protection cathodique :

3.4.1. Surface du fond du réservoir ST :

$$S_T = \pi \times (D/2)^2$$

D : Diamètre du réservoir en mètre

3.4.2. Courant total requis :

$$I_T = S_T \times i \times S$$

i : Densité de courant en mA/m²

S_T : Surface totale à protéger en mètre carré

S : marge de sécurité

Il doit être le courant minimum requis pour le système de PC proposé.

REMARQUE : Un système de protection cathodique efficace doit avoir une bonne distribution du courant. Cela nécessite de placer une quantité maximale d'anodes autour du fond du réservoir. La quantité et l'emplacement des anodes sont régis par la taille de la cuve (fond du bac), le courant nominal du système et la résistivité du sol.

3.4.3. Poids total d'anode requis W :

$$W = \frac{\text{temps de design} \times \text{courant totale requis} \times \text{capacité de courant}}{\text{courant efficience} \times \text{facteur d'utilisation}}$$

Avec :

Durée de vie = 20 ans

Anode en fonte de silicium Capacité actuelle = 0,5 kg / A. année

Efficacité du courant d'anode en fonte de silicium = 90%

Facteur d'utilisation = 85%

3.4.4. Quantité d'anode requise N :

$$N = \frac{\text{poids anodique requis}}{\text{poids d'anode unitaire}}$$

Poids d'une anode : 23 kg

Il doit s'agir de la quantité minimale d'anodes requise pour le réservoir.

3.4.5. Résistance de l'anode à la terre Ra :

$$Ra = \frac{0,159\rho}{N \times L} \left[\ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 + \frac{2L}{s} \times \ln(0,656 \times N) \right]$$

Ra = résistance de l'anode en ohms

L = longueur de l'anode (longueur du colis) égale à 2 m

d = diamètre de l'anode (diamètre du boîtier) égal à 0,15 m

ρ = résistivité en ohm-cm (le remblai entourant les anodes a une résistivité de 0,5 Ohms.m)

S : espacement entre les anodes égal à 3 m

N : quantité d'anodes

- La longueur de l'anode à cartouche est de 2 m et le diamètre de 0,15 m. Les anodes à installer doivent avoir un espacement approximatif de 4 m.
- Deux raccords de drainage négatifs sont fournis par réservoir pour une meilleure distribution du courant et pour des raisons de sécurité.
- La longueur des câbles de tête négatifs est de 115 et 138 m.
- Le câble collecteur positif a une longueur d'environ 80 m.
- Les longueurs de câble de queue d'anode sont de 20 m et 25 m.
- Le câble d'anode est de 1x16 mm².

3.4.6. Résistance totale du circuit :

La résistance totale du circuit comprend la résistance anodique et la résistance du câble. D'où résistance totale R_T

$$R_T = R_c + R_a$$

Rc : résistance du câble en ohms

Ra : résistance des anodes en ohms

3.4.7. Évaluation du transformateur-redresseur :

Le transformateur-redresseur doit avoir une capacité suffisante pour répondre à la résistance du circuit.

La tension de l'unité T / R peut être calculée en utilisant la formule :

$$Tension = Courant \times Résistance$$

4. Les interprétations

L'état du fond est souvent le facteur le plus important pour déterminer quelle est la réelle durée de vie restante du réservoir c'est pourquoi nous avons apporté un intérêt tout particulier à l'étudier visuellement ; nous comptons sur le fond aux alentours des 840 défauts dont environ 213 sont traversante. Cependant l'erreur humaine reste toujours probable et la possibilité de présence d'autres défauts sous dépôts n'est pas exclus.

4.1. Déformation :

Les déformations et les affaissements dans le fond peuvent donner lieu à toutes sortes de problèmes :

- ✓ La présence d'eau dans les substances stockées peut s'accumuler à terme dans ces endroits de sorte que cela ne peut pas être empêché via le drainage. La présence d'eau peut occasionner de la corrosion dans ces zones plus basses.
- ✓ Une autre conséquence possible des déformations est la création de tensions trop grandes dans le fond ou les parois latérales du réservoir, ce qui peut mener à des fissures ou à l'existence de zones sensibles à la corrosion.

Lorsqu'un réservoir est vide, il se peut que des fléchissements ne soient pas remarqués directement. Vu que le fond n'est pas chargé avec du produit, il peut en effet arriver que la plaque de fond à cet endroit ne touche plus le sous-sol **L'annexe B de l'API 653** décrit une méthodologie afin de déterminer les tassements de fond de réservoir.

- ✓ Après avoir marché sur les tôles du fond nous avons détecté par surcharge (avec le poids du corps) des zones critiques où les tôles ne touchent pas le sol tel que tôle E10, E17, B9 et B10, il est donc souhaité de découper les tôles sur ces zones pour voir l'état de la fondation.



Figure 64 Les tôles de fond R8 avant la réparation

4.2. Corrosion

Il se peut que les piqûres de corrosions puissent survenir à l'intérieur du fond comme à l'extérieur :

La corrosion sur la surface externe du fond peut être initiée par un processus électrochimique d'où le sol sur lequel pose le fond joue le rôle d'électrolyte. De nombreux facteurs peuvent affecter la corrosivité du sol : pH, résistivité, teneur en humidité, teneur en ions chlorure, teneur en ions sulfure, teneur en ions sulfate, teneur en oxygène, bactéries, courant vagabond etc.

Tandis que la corrosion interne du bac provient en général par l'eau de décantation qui peut contenir des agents très favorisant à la corrosion tels que : les bactéries, CO₂, salinité, le pH, les ions de Cl, O₂...etc. surtout en absence ou en dégradation du revêtement ou même la mauvaise application des couches de revêtement peut accélérer le processus de dégradation par corrosion.

5. Recommandations et conclusions

- ✓ Il est fortement recommandé de procéder à des examens avancés sur les tôles du fonds par M.F.L (Magnetic Flow Leakage), pour avoir une évaluation détailler sous les tôles du fonds en consultant des organismes ayant les outils nécessaires pour l'exécution du test ; comme il est souhaitable de consulter l'avis du constructeur pour des examens et des suggestions encore plus poussés et de fournir le dossier technique de l'équipement.
- ✓ Procéder au relever de la rotondité et de la verticalité du bac depuis l'extérieur et également à des relevées de l'intérieure du fond pour vérifier la criticité des tassements et des déformations, selon le code **API 653**.
- ✓ Il est fortement recommandé de procéder à l'analyse de la composition chimique sur un échantillon d'une tôle découpée afin de pouvoir obtenir sa nuance.
- ✓ Changer les supports corrodés du tube de jaugeage.
- ✓ Changer la bride corrodée de la ligne d'expédition et isoler les écrous des brides pour éviter le couplage galvanique.
- ✓ Les cratères sur la 01^{ère} virole ainsi les nids de piqures et d'égratignures et également les cratères de corrosion doivent être colmatés pour éviter toute propagation en profondeur.
- ✓ Meuler les grains de soudage et recharger les joints de soudure des supports et des rustines.
- ✓ Découper les tôles suspectes qui ne touchent pas le sol tel que E10, E17, B9 et B10 pour voir l'état de la fondation et de faire des analyses en prélevant des échantillons sur le sol pour étudier son agressivité.
- ✓ Il est souhaitable de faire des analyses sur l'agressivité des substances stockés sur le bac.
- ✓ Une fois ses travaux sont exécutés réparer le fond par une méthode appropriée de tel sorte d'assurer l'intégrité général de l'équipement.
- ✓ Appliquer un système de protection cathodique à l'équipement pour protéger les tôles depuis l'extérieure et au revêtement interne du fond et de la première virole.

Annexes et références

Bibliographie

- [1] M. B. Naïma, «Evaluation Des Performances Des Peintures,» Boumerdès, 2008.
- [2] F. Ropital, «Corrosion et dégradation des métaux métalliques,» édition Technip, Paris, 2005.
- [3] P. S. Audisio, Le LIVRE MULTIMEDIA de la CORROSION, Lyon: Laboratoire MATEIS-Corrils de l'INSA de Lyon.
- [4] C. DEFONTAINE, «Mécanismes de corrosion, systèmes de protection et vieillissement accéléré,» 2011.
- [5] M. d. f. d. p. A. A. N. e. BENDAHIR, «Corrosion dans les installations pétrolières de surface causes, effets et remèdes,» ADRAR, 2019.
- [6] D. M. D. Si-Salah, «"Corrosion & Protection" Première Partie GNL,» 2003.
- [7] J. T. Gérard BERANGER, «Encyclopædia Universalis,» [En ligne]. Available: <http://www.universalis.fr/encyclopedie/corrosion/>. [Accès le 08 août 2020].
- [8] D. H. BENSABRA, Cours de Corrosion et Protection des Métaux, Jijel, 2016.
- [9] Dr.AKE, Cours de Stockage Distribution des Hydrocarbures, Côte d'Ivoire, 2014.
- [10] D. 94, «Guide d'inspection et de maintenance des réservoirs aériens cylindriques verticaux,» Octobre 2011.
- [11] Ailematic, «Protection cathodique contre la corrosion des métaux,» Frontignan, France, 2020.
- [12] OLYMPUS, *Solutions industrielles , Inspection. Mesure. Imagerie. Analyse.*
- [13] J. Perdijon, « Le Contrôle non destructif par ultrasons,» Hermès, Paris, 1993.
- [14] M. Froment, «CORROSION INTERGRANULAIRE.SUR LE,» *Journal de Physique Colloques*, p. 36 (C4), 1975.
- [15] «Les différentes formes de corrosion aqueuse,» chez *Matériaux Métalliques "Phénomènes de Corrosion"*.

[16] Wikipédia, «Contrôle par ultrasons».

Liste des figures

Figure 1 Corrosion générale (rouille) d'une pièce en acier	4
Figure 2 Corrosion localisée d'un acier	5
Figure 3 Corrosion par piqûres sur la paroi d'une cuve en acier inoxydable austénitique Cr18-Ni10	6
Figure 4 Corrosion par piqûres de type1 du cuivre dans de l'eau froide.....	6
Figure 5 Série galvanique du graphite et de divers métaux et alliages dans l'eau de mer [3] ..	7
Figure 6 Corrosion galvanique d'une pièce	7
Figure 7 Coupe longitudinale montrant une attaque par corrosion sélective [6]	8
Figure 8 Corrosion feuilletante d'une canalisation en alliage d'aluminium véhiculant de l'eau	9
Figure 9 Mécanisme de la corrosion Caverneuse [3]	10
Figure 10 Corrosion caverneuse d'un acier allié sous un joint [3]	10
Figure 11 Corrosion-érosion d'un tube en cuivre véhiculant de l'eau [3]	11
Figure 12 Corrosion cavitation d'une aube de pompe en alliage de nickel Hastelloy C276 en milieu acide chlorhydrique [3]	12
Figure 13 Corrosion frottement d'une pièce en acier [3]	13
Figure 14 Stress corrosion cracking in a welded alloy steel structure (stresses induced by welding) [3].	14
Figure 15 Contrainte appliquée en fonction du nombre de cycles [3]	15
Figure 16 Cloquage lié à une surprotection cathodique d'une canalisation pétrole. [3]	16
Figure 17 : Mécanisme de la corrosion atmosphérique	17
Figure 18 Corrosion chimique : effets sur les rivets et les inserts	18
Figure 19 Exemple de bactéries responsable de la corrosion bactérienne et corrosion dentaire.	18
Figure 20 Biofilm of Desulfovibrio Desulfuricans.....	19
Figure 21 Aspect et mécanisme de la corrosion-érosion.....	19
Figure 22 La corrosion des matériaux métalliques en eau de mer corrosion galvanique.....	20
Figure 23 Influence de la concentration en NaCl sur la corrosion de Fer dans des solutions aérées	22
Figure 24 Variation de la vitesse de corrosion de l'acier au milieu aqueux en fonction de pH	23
Figure 25 Une forme adaptée pour diminuer la corrosion.....	24
Figure 26 Série galvanique pour certains métaux dans l'eau de mer	25

Figure 27 Corrosion en présence de revêtements métalliques plus nobles (a), et moins nobles (b) que le substrat.....	26
Figure 28 Schéma de protection cathodique d'un réservoir par courant imposé.....	28
Figure 29 Schéma de protection cathodique d'une canalisation enterrée par anodes	28
Figure 30 Bac de stockage de brut dans La région TFT-Illizi Sonatrach	29
Figure 31 Schéma d'un réservoir à toit fixe	30
Figure 32 Schéma d'un réservoir à toit flottant	31
Figure 33 Schéma d'un réservoir à écran flottant.....	31
Figure 34 Le logigramme suivant est un exemple illustrant le principe de la méthode.....	43
Figure 35 sections à prendre en compte lors de l'application du RBI à un réservoir de stockage conventionnel	44
Figure 36 une représentation de la criticité sous forme matricielle.....	46
Figure 37 ANODES EN MAGNÉSIUM	51
Figure 38 ANODES EN MAGNÉSIUM	52
Figure 39 : Représentation schématique approximative de la répartition des tôles de la 01 ^{ère} virole du bac R8.....	55
Figure 40 Réparation par des points de rechargement	56
Figure 41 : Réparation par rustine (patch) uniquement entre la jonction du fond et de la 01 ^{ère} virole.....	56
Figure 42 : Déformation par gondolement	57
Figure 43 Piqure de corrosion légère	57
Figure 44 Piqures de corrosion sévère	58
Figure 45 Piqures de corrosion traversante	58
Figure 46 Légère corrosion au niveau de cordon de soudure	59
Figure 47 Corrosion sous forme d'égratignure	59
Figure 48 : Corrosion sévère au niveau de joint de soudure entre tôles.....	60
Figure 49 Corrosion traversante au niveau joint de soudure entre tôles.....	60
Figure 50 Regroupement de piqures de corrosion légère formant un nid.....	61
Figure 51 Regroupement de piqures de corrosion sévère formant un nid	61
Figure 52 Cratère de corrosion légère	62
Figure 53 Regroupement d'égratignure de corrosion	62
Figure 54 Cratère de corrosion sévère	63
Figure 55 Mauvaise soudure qui peut présenter des points faibles pour la corrosion	63
Figure 56 La représentation schématique des tôles du fonds.....	67
Figure 57 Léger et sévère cratères et piqures et piqures de corrosion sur la 01 ^{ère} virole.....	68
Figure 58 : Dégradation par corrosion de la bride de la ligne d'expédition côté arrière	69
Figure 59 Dégradation par corrosion des supports de tubes de jaugeage.....	69
Figure 60 Dégradation par corrosion des tiges de fixation de la plaque de touche.....	70
Figure 61 Corrosion sévère sur un piquage sur la 04 ^{ème} virole.....	70
Figure 62 Aspect érosif sous le support de la plaque de touche sur la tôle de la première virole.....	71

Figure 63 Le mesureur d'épaisseur portable 27MG	72
Figure 64 Les tôles de fond R8 avant la réparation	85

Liste des tableaux

Tableau 1 Détails des défauts sur le fond du bac (partie 01)	65
Tableau 2 Détails des défauts sur le fond du bac (partie 02)	66
Tableau 3 Détails des défauts sur le fond du bac (partie 03)	67