

MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME D'OFFICIER MECANICIEN DE
1^{ERE} CLASSE (OM1)

THEME :

**PROTECTION CONTRE LA CORROSION
DES INSTALLATIONS MARINES :**

« LE CAS DE LA COQUE DU REMORQUEUR VB IMPALA »



ENCADRANT PEDAGOGIQUE

Na KOMELAN

Professeur Scientifique d'Enseignement Maritime

REALISE PAR :

TIATASSOU KOUADIO

Année Académique : 2020-2021

REMERCIEMENTS

Louange et honneur à notre SEIGNEUR JESUS –CHRIST qui nous a doté de la merveilleuse faculté de raisonnement et de nous avoir inspiré pour la réalisation de ce travail. C'est à lui que j'adresse ma gratitude en premier lieu.

Je tiens à remercier vivement :

Monsieur Na KOMELAN professeur scientifique d'enseignement maritime à l'ARSTM, pour avoir accepté d'être mon encadrant pédagogique d'une part et d'autre part, pour sa disponibilité, ses orientations et ses conseils avisés tout au long de ce travail.

Monsieur EMMANUEL AUPOIX, Directeur de site BOLUDA France Côte d'Ivoire, pour ses conseils et attention accordés à ce travail.

Monsieur Jean Pierre Le GOURIERES ex-Directeur technique de BOLUDA France Côte d'Ivoire, pour son encadrement durant les missions de carénage qui m'a permis de comprendre la phase pratique de ce travail.

Mes remerciements les plus profonds vont à l'endroit de tous les Enseignants de l'ECOLE SUPERIEURE DE NAVIGATION (ESN) de L'ARSTM et de toute personne ayant contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce travail, plus particulièrement au Cdt N'GUESSAN KOUASSI expert maritime et au capitaine CHERIF AIDARA inspecteur à BOURBON.

DEDICACE

Avec ma profonde gratitude et grand amour, je dédie

Ce modeste travail à :

À mes très chers et adorables parents ;

À ma femme et mon fils Christ- Aurel.

AVANT-PROPOS

Ce travail est un mémoire de fin de cycle d'une formation d'officier machine selon la STCW faite à l'Académie Régionale des Sciences et Techniques de la Mer afin d'obtenir le diplôme d'OFFICIER MECANICIEN DE 1^{ERE} CLASSE (OM1).

Après un temps de navigation en qualité de Stagiaire Mécanicien au chantier naval au même titre qu'à bord des navires, j'exerce actuellement comme Chef Mécanicien à la société de remorquage IRES (Ivoirienne de Remorquage et de Sauvetage). Ce thème a été suscité lors des travaux de carénage et aussi par l'intérêt que nous portons aux phénomènes de la corrosion qui représentaient un véritable fléau pour les remorqueurs de l'IRES. Par la suite nous nous sommes intéressés à mieux appréhender ce phénomène du point de vue scientifique en essayant de nous instruire des recueils de recherche de certains scientifiques, des travaux rédigés de plusieurs Docteurs en sciences des technologies des métaux, en électrochimie, en génie maritime, océanique et par certaines normes internationales sur la lutte contre la corrosion (ISO 8044).

Cependant étant dans un Etat en voie de développement du secteur maritime, avec la récente découverte de plusieurs gisements offshore, nous avons jugé utile de porter notre étude sur le fléau de la corrosion des navires. Afin d'attirer en premier l'attention de nos responsables dans la mise en place d'un moyen efficace de lutte contre la corrosion durant le cycle de vie d'un Navire.

En deuxième d'aider les nouveaux officiers de la marine à mieux cerner les méthodologies de lutte contre la corrosion.

En troisième de proposer une méthode de surveillance de la dégradation de la coque du VB IMPALA.

GLOSSAIRE

ANODE : Electrode positive

ANTI – FOULING : Anti-salissure aussi appelée antifouling est une peinture qui permet de protéger la coque d'un navire des microorganismes (biofilm, coquillages). Cette peinture contient des biocides le plus souvent à base d'oxyde de cuivre, et des produits qui tuent parfois les micro-organismes.

BATTERIES SULFATOREDUCTRICE : famille de bactéries présentes dans la plupart des sols et des eaux naturelles, mais uniquement actives dans des conditions de quasi-neutralité ($\text{pH} \approx 7$) et d'absence d'oxygène. Elles réduisent les sulfates dans leur environnement en produisant des sulfures, et accélèrent la corrosion des matériaux ferreux.

BIOFOULING : ce sont des salissures marines produites par des organismes biologiques. Ils désignent les coquillages ; les algues etc...

BIOFILM : couche de micro-organismes qui se forme sur des surfaces en contact avec l'eau.

BOXCOOLER : C'est un système de réfrigérant en marine constitué de serpentins plongés dans l'eau de mer. Comme son nom l'indique **BOX** : Caisse ; **COOLER** : réfrigérant.

CATHODE : Electrode négative

CARENAGE : C'est une opération de cale sèche (toute opération en rapport avec la carène) et de réparation des navires.

CAVITE : Espace vide à l'intérieur d'un corps solide observé dans la corrosion par piqure ou cavernuse.

CONDITION ANAEROBIE : absence d'oxygène libre dissous dans l'électrolyte c'est le contraire de condition Aérobie

COURANT VAGABOND : courants électriques qui circulent sur des trajectoires différentes des circuits prévus (le cas le plus connu est lié à l'alimentation de voies ferrées en courant continu)

DECHROMATISE : perte de couche de chrome dans le cas des aciers alliés

DEPOT CALCO- MAGNESIEN : précipités minéraux formés sur la cathode métallique du fait de l'augmentation de l'alcalinité que provoque la protection cathodique.

DURETE : propriété physique indiquant la résistance au toucher, à la pression, au choc et l'usure.

DRY DOCK : C'est l'appellation en anglais d'une opération de cale sèche

ELASTICITE : Propriété de reprendre la forme, et le volume primitif avec une sollicitation.

MALEABILITE : Propriété d'un matériau à être déformé à chaud, à froid par choc ou par pression en conservant la nouvelle forme

OFFSHORE : Domaine en pleine mer pour une activité pétrolière

OXYDE : composé résultant de la combinaison d'un corps avec l'oxygène

SULFURE : composé résultant de la combinaison d'un corps avec du soufre

ABREVIATION ET SYMBOLE

ABREVIATION	SIGNIFICATION
A	Ampère
AFNOR	Association Française De Normalisation
AFS	Anti Fouling System
Al	Atome d'Aluminium
Al ⁺	Ions d'Aluminium
API	American Petroleum Institute
ASD	Astern System Drive
Cl ⁻	Ions De Chlore
Cr	Chrome
Cu	Atome De Cuivre
e ⁻	Electrons
EN	Norme Européenne
FeOH	Oxyde Ferrique
FeS	Sulfure de Fer
H ⁺	Ions Hydrogène
H ₂ O	Molécules d'eau
H ₂ S	Hydroxyde de Soufre
ICAF	Impressed Current Anti – Fouling
ISM	International Safety Management
ISO	International Organization For Standartization
K ⁺	Ions Potassium
kg	Kilogramme
kw	Kilowatt
m	Mètre
NaCl	Chlorure De Sodium

ABREVIATIONS ET SYMBOLES

ABREVIATION ET SYMBOLE	SIGNIFICATION
Ni	Nickel
OH	Hydroxyde
OM1	Officier Mécanicien de 1 ^{er} Classe
PCAS	Protection Cathodique Anode Sacrificielle
PCCI	Protection Cathodique Courant Imposé
pH	Potentiel D'hydrogène
SIR	Société Ivoirienne De Raffinerie
SO ₄ ²⁻	Oxyde Sulfurique
STCW	Convention Standard of Training Certification and Watchkeeping for Seafarers
TSM	Techniques Sciences Méthodes
v	Volt
VB	Vicente Boluda

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	02
DEDICACE	03
AVANT - PROPOS	04
GLOSSAIRE	05
LISTE DES ABREVIATIONS ET DE SYMBOLES	07
INTRODUCTION GENERALE	10
CHAPITRE 1 : DEFINITION DES TERMES DE REFERENCE :	13
1 Introduction.....	13
2 Généralités sur La corrosion.....	13
3 Corrosion en milieu marin.....	28
4 Installations marines.....	32
5 Protection contre la corrosion	43
Conclusion du chapitre 1.....	54
CHAPITRE 2 : APPROCHE METHODOLOGIQUE	55
1 Définition du cadre de référence :	55
2 Impact de la corrosion sur la coque du VB impala.....	61
Conclusion du chapitre 2.....	66
CHAPITRE 3 : APPROCHE TECHNOLOGIQUE.....	67
1 Introduction.....	67
2 Protection d'une coque contre la corrosion.....	67
3 Mise en place d'un système de mesure de potentiel de protection.....	80
Conclusion chapitre 3.....	88
CONCLUSION GENERALE	89
LISTE DES ANNEXES.....	90
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES.....	99
RESUME.....	102
TABLES DES MATIERES.....	104

INTRODUCTION GENERALE

Le domaine maritime, appelé « économie bleue » présente de nombreuses opportunités de développement. Les nations les plus puissantes ont saisi cette opportunité depuis l'antiquité. Quant à la Côte d'Ivoire, C'est en 1950 (date d'ouverture du canal de Vridi) qu'il a été véritablement ouvert sur le monde extérieur pour le développement de ses activités maritimes. Cette ouverture a permis à la Côte d'Ivoire de développer des activités maritimes à travers la construction du Port Autonome d'ABIDJAN et de SAN PEDRO.

Dans le développement de ses activités maritimes au port d'Abidjan, la concession du remorquage et du sauvetage en mer est gérée par le groupe français BOLUDA à travers sa filiale à Abidjan IRES (Ivoirienne de Remorquage et Sauvetage).

La société IRES dispose d'une flotte de sept (7) remorqueurs pour assurer le service du remorquage portuaire.

Afin de se conformer, aux prescriptions et aux normes internationales (AFS) sur le contrôle des systèmes antifouling des navires (contrôlé par bureau Veritas).

Les remorqueurs d'IRES effectuent des carénages chaque Cinq (5) ans.

Pendant le carénage des remorqueurs, les défauts observés sur la coque des remorqueurs sont très énormes : Diminution de l'épaisseur de la coque, présence de Cavités à certains niveaux de la coque, présence de rouille sur les surfaces de la coque, détérioration de la peinture, consommation totale des anodes de protection, présence de coquillages sur toutes les surfaces de la coque etc...

Ces défauts observés sont généralement causés par la corrosion en milieu marin.

Le milieu maritime constitue un environnement très agressif pour les surfaces métalliques du point de vue de la corrosion. En effet, ce milieu présente des conditions extrêmes favorables aux phénomènes de corrosion, pour les métaux en particulier les aciers faiblement alliés utilisés pour les coques de navires.

La forte teneur en Chlorure, les variations des conditions d'aération (teneur en dioxygène), le biofouling ou encore le dynamisme du milieu, rassemblent les conditions propices à une dégradation spontanée et rapide des métaux.

Afin de lutter contre ce phénomène naturel et spontané de dégradation des surfaces métalliques dans ce milieu, plusieurs moyens de protection sont mis en œuvre.

Le plus courant est l'application de plusieurs couches de peinture anti-corrosion avec l'association de système de protection cathodique.

Bien que performante, ces systèmes de protection n'arrivent pas à freiner totalement ce phénomène de corrosion, lorsqu'elle est développée sous d'autres formes. La forme la plus dangereuse est la corrosion par courant vagabond.

En effet les courants de fuite influencent de manière négative la protection mise en place sur la coque d'un navire (décollage de la peinture, surconsommation des anodes etc...)

En conséquence, le planning de carénage des remorqueurs d'IRES est parfois précipité pour cause de dégâts importants tels que :

- Les perforations entraînant des voies d'eau au niveau des tanks à gasoil et des caissons de BOXCOOLER (le cas du VB IMPALA en Février 2023),
- Des cavités au niveau des propulseurs entraînant une fuite d'huile et une intrusion d'eau de mer dans les propulseurs (le cas du VB GOLDEN en novembre 2019).

Ces exemples montrent que la corrosion présente un enjeu important sur la sécurité des navires, et à un impact économique très énorme sur les activités de la société IRES.

Vue l'impact de la corrosion, la lutte contre la corrosion est un sujet à traiter avec beaucoup d'attention. Pour ce faire nous sommes amenés à nous poser ces questions suivantes :

- Pourquoi les moyens de lutte ne sont-ils pas efficaces à 100% contre la corrosion marine des métaux ?
- Existe-t-il des méthodes plus efficaces à mettre en place pour optimiser la lutte contre la corrosion marine des métaux ?

- Quelle procédure de surveillance peut – on mettre en place pour mieux évaluer l'évolution de la corrosion dans le temps ?

Dans le développement de notre réflexion, nous allons essayer d'apporter une contribution à la résolution de cette problématique en travaillant sur le thème suivant :

Protection contre la corrosion des installations marine : « le cas de la coque d'un navire ».

Notre travail sera articulé autour des chapitres suivants :

Chapitre 1 : Définition des termes de référence

Ce chapitre consistera pour nous de définir la corrosion et ses diverses formes, de présenter les installations marines et présenter les moyens de protection contre la corrosion, afin d'avoir une connaissance approfondie de la corrosion des métaux en milieu marin et les moyens de lutte.

Chapitres 2 : Approche méthodologique

Dans ce chapitre nous présenterons le cadre de référence afin de mieux appréhender la corrosion sur la coque d'un navire.

Chapitres 3 : Approche technologique

Ce chapitre traitera des technologies de lutte contre la corrosion de la coque d'un navire ; basées sur des recommandations existantes. Aussi vous trouverez notre proposition pour une procédure de surveillance de la protection utilisée sur la coque du VB IMPALA afin d'optimiser la lutte et la prévention contre la corrosion.

CHAPITRE I : DEFINITION DES TERMES DE REFERENCE

1- INTRODUCTION

La corrosion est un phénomène naturel qui affecte la plupart des matériaux métalliques, et qui entraîne la détérioration de ces derniers. Presque toutes les installations métalliques sont en interaction avec les différents environnements dont certains s'avèrent agressifs en occurrence le milieu marin.

Chaque année des dégâts considérables sont constatés, ce qui a pour conséquences des pertes se chiffrant en Milliards de Dollars d'où l'intérêt porté par les scientifiques sur l'étude de la corrosion et de la lutte contre la corrosion.

En effet selon la TSM (Techniques sciences méthodes) le coût total, direct et indirect de la corrosion est estimé entre 2.5 % et 4.5% du PIB mondial. La corrosion consommerait chaque année près de 300 millions de tonnes d'acier et son coût serait de l'ordre 2000 MILLIARDS DE DOLLARDS US par an. [A]

Notre étude de la corrosion des installations marines s'effectuera par la définition des thèmes de référence que sont : « La corrosion », « Les installations marines » et « La protection »

2- GENERALITE SUR LA CORROSION

2.1- Définition de la corrosion

La corrosion, du latin "corrodere", signifie ronger, attaquer. C'est une destruction non voulue des métaux sous l'action de milieux corrosifs (agents atmosphériques ou réactifs chimiques). Après l'attaque, les métaux ont tendance à retourner à leur état primitif d'oxyde, de sulfure, de carbonate etc., plus stable par rapport au milieu considéré et ainsi à subir une détérioration de leurs propriétés.

Cette détérioration se traduit généralement par les effets suivants : diminution de poids, altération de la surface et pertes des propriétés mécaniques. (Voir fig.1)



Fig. 1 : Corrosion marine d'une coque de navire

La corrosion peut se développer par de divers mécanismes. A savoir :

- Chimique (corrosion développée par des produits chimiques).
- Biochimie (corrosion développée par des organismes vivants qui produisent des substances corrosives)
- Electrochimique (création de piles et dissolution des métaux en solution chimique)

2.2 - Types de corrosion

2.2.1 - Corrosion chimique

Ce type de corrosion résulte d'une réaction chimique directe et unique entre le métal et son environnement (gaz, ou solution non électrolytique).

L'oxydation du métal et la réduction de l'oxydant se fait en un seul acte.

Cette corrosion a lieu à haute température elle est appelée corrosion sèche.





Fig.2 Corrosion sèche d'une structure métallique

2.2.2 - Corrosion microbiologique (biochimique)

Connue aussi sous le nom de bio-corrosion, il s'agit d'un processus dans lequel les bactéries interviennent soit d'une façon directe en créant les conditions favorables à la corrosion telle que la production de l'acide sulfurique, soit par l'action indirecte en accélérant un processus déjà établi. C'est aussi le cas des salissures marines (biofouling).

2.2.3- Corrosion électrochimique

La corrosion électrochimique est une réaction d'oxydo-réduction ; elle se déroule dans un milieu électrolytique (atmosphère humide, eau ou sol...) avec une structure métallique (tube en acier, coque d'un navire, une barre de fer etc.....).

Lorsqu'un métal est présent dans un électrolyte, il y a dégradation de ce métal vers l'état d'ion métallique : On dit le métal se corrode. Elle résulte des courants locaux dus à l'existence de pile locale entre la zone cathodique où se déroulent la réduction et la zone anodique où se déroule l'oxydation (voir fig. 3) :

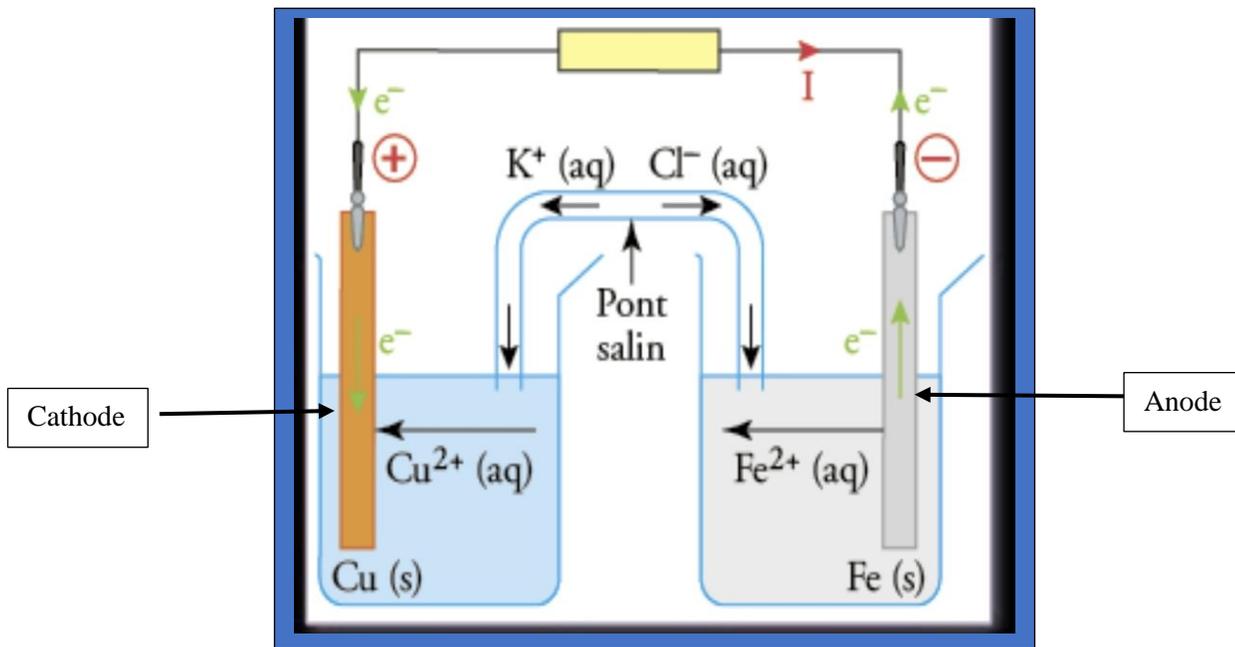


Fig. 3 : Pile cuivre –fer

La présence simultanée de dioxygène et d'eau est un facteur favorable à la corrosion électrochimique des métaux, il en est de même de la présence d'ions dissous dans l'électrolyte qui favorise la circulation du courant électrique dans une solution, même quand ils ne participent pas au bilan des réactions.

2.3- Les formes de corrosion

La corrosion des métaux peut prendre différentes formes et se développer à des rythmes différents. Une simple observation visuelle ou au microscope est apte à identifier la forme et le type de corrosion. Selon les formes, on distingue :

- Corrosion uniforme ou généralisée
- Corrosion localisée

2.3.1- La corrosion généralisée

La corrosion généralisée ou uniforme est caractérisée par un taux de corrosion relativement uniforme sur l'ensemble d'une surface exposée. Ce type de corrosion est couramment observé

dans les métaux purs qui sont métallurgiques et de composition homogène. C'est l'aspect de corrosion le plus rencontré dans la pratique, mais c'est l'aspect le moins dangereux. Cependant l'attaque de la surface sera très importante si cette dernière est rugueuse.

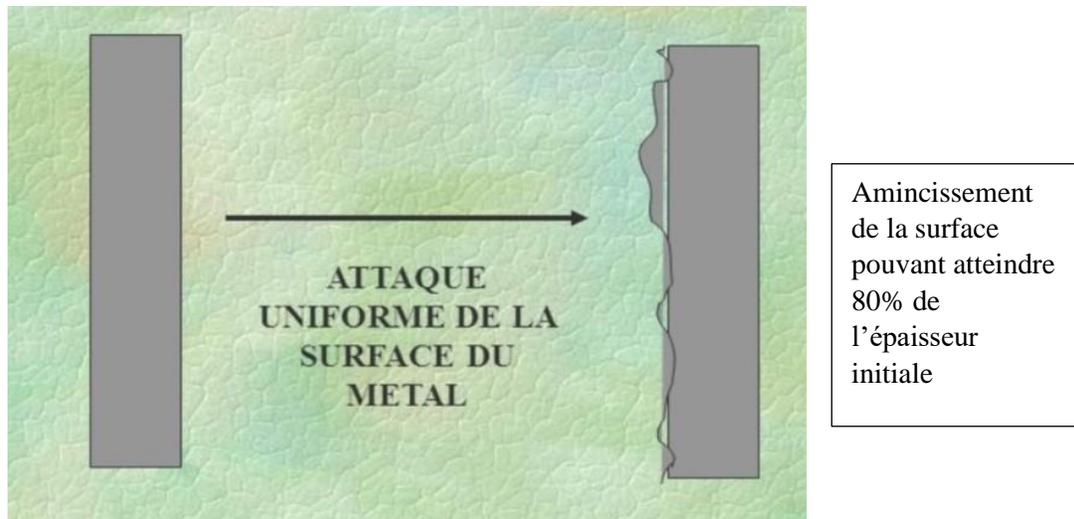


Fig. 4 Corrosion Généralisée

2.3.2- Corrosion localisée

C'est une corrosion qui se déroule en un lieu spécifiquement anodique d'une surface ou d'une structure métallique. Elle diffère de la corrosion uniforme par la distinction claire des endroits anodiques et cathodiques.

En pratique la corrosion localisée provient d'une hétérogénéité du matériau ou de l'environnement et souvent elle pose beaucoup de problèmes.

Donc c'est l'aspect de corrosion le plus dangereux car l'attaque se fait en certains endroits de la surface du métal.

La perte de masse est relativement faible, mais ce type de corrosion est dangereux dans le cas par exemple de perforation de conduit, de ballast ou de coque.

Les principales causes de cet aspect de corrosion sont :

- Surface de métal chimiquement hétérogène.

- Différence de potentiel dans les différentes zones du métal créée par la déformation.
- Endommagement local de la couche passive.

Les différents types de la corrosion localisée sont :

- Corrosion galvanique.
- Corrosion par piquûre.
- Corrosion intergranulaire (inter cristalline).
- Corrosion sous contrainte.
- Corrosion avec érosion.
- Fragilisation par l'hydrogène.
- Corrosion par crevasse.
- Corrosion par aération différentielle
- Corrosion par courant vagabond

2.3.2.1- La corrosion galvanique

La corrosion galvanique est une forme de corrosion qui se développe lorsque deux métaux de natures différentes sont mis en contact dans un milieu électrolytique. L'un des métaux le plus électronégatif s'oxyde et se dissout (anode), tandis que sur l'autre métal a lieu une réduction (cathode) et éventuellement formation d'une couche de produits de réaction (des espèces chimiques de la solution se réduisent et se déposent ; notamment : dépôt calco-magnésien)

Par exemple, la corrosion galvanique d'un assemblage de tôles aluminium cuivre par un rivet sans isolation

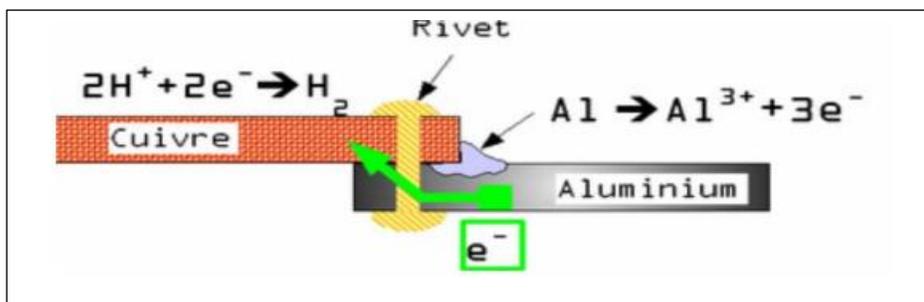


Fig.5 Assemblage de tôles d'aluminium et de cuivre

Le potentiel de dissolution de l'aluminium étant inférieur à celui du cuivre il y a corrosion (voir Fig.6 échelle galvanique)



Fig. 6 Echelle galvanique des métaux

2.3.2.2- Corrosion piqure

La formation de piqûres est un phénomène de corrosion qui survient lorsqu'une pièce est protégée contre la corrosion généralisée par un film passif, souvent un oxyde protecteur. Il s'agit d'une corrosion localisée. En surface, on ne voit qu'un petit point, mais en dessous, il y a une cavité bien plus importante. Ceci entraîne à terme, la perforation de la pièce et sa fragilisation. La formation de piqûres est un phénomène d'autant plus redouté qu'il surprend l'utilisateur car la trace extérieure de corrosion est quasiment indétectable. La piqûre commence toujours par une rupture locale du film passif souvent aux endroits d'hétérogénéités du métal près desquels le film est moins stable.

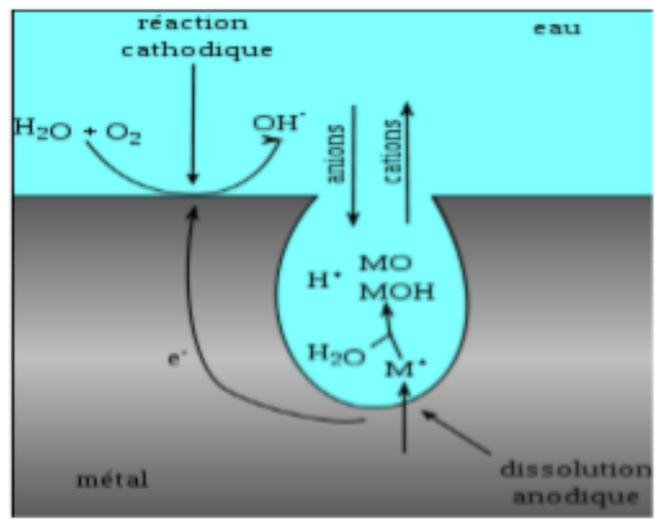


Fig. 7 Piqure

2.3.2.3- Corrosion intergranulaire (inter cristalline)

C'est une attaque sélective aux joints de grains, souvent, il s'agit de phases qui ont précipité lors d'un traitement thermique. Donc le produit de corrosion se trouve aux joints de grains. L'attaque du métal s'effectue en profondeur, le long des joints de grains, ce qui conduit à une microfissure, alors la surface ne présente aucune altération. La perte du métal est insignifiante, mais les caractéristiques sont sensiblement affectées, le métal peut se rompre sous un effort très faible

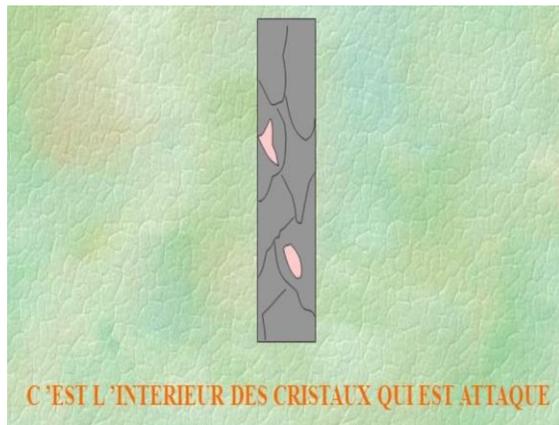


Fig.8 Corrosion intra granulaire

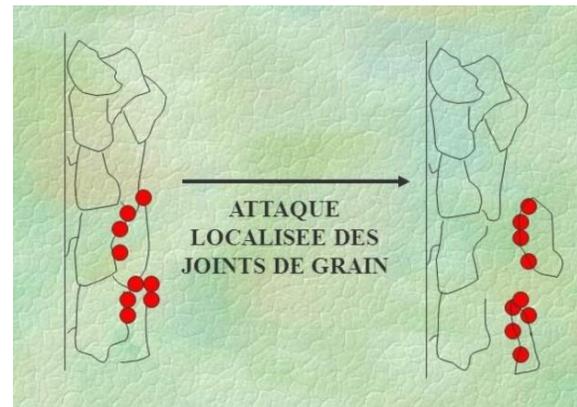


Fig.9 Corrosion intra granulaire sous contrainte

La présence des carbures dans les alliages, favorise la corrosion intergranulaire surtout dans le cas des aciers inoxydables du type 18-10 (18 % Cr, 10 % Ni). Par exemple, dans le cas du soudage de plaquettes d'acier inoxydable du type 18-10, il se forme alors au voisinage des joints de grains une zone déchromatisée dont la largeur n'excède pas 1 à 2 μm , la teneur en chrome de la zone déchromatisée est de 10 % tandis que celle du carbure de chrome (Cr_{23}C_6) contient 90 % de chrome. En effet, l'alliage comporte au centre des cristaux une région contenant 18 % Cr, au voisinage des joints de grains un précipité de carbure de chrome. Ces trois phases possèdent un potentiel de corrosion différent et déterminent la formation de couples électrochimiques.

2.3.2.4- Corrosion sous contrainte (CSC)

Il s'agit d'un type de corrosion tout à fait général qui se produit sous l'action commune d'une contrainte mécanique et d'un milieu corrosif (fig.10). En l'absence de la contrainte, le phénomène ne se produit pas. La C.S.C se manifeste sous la forme de fissures qui peuvent être intergranulaires, soit Trans granulaires. Les contraintes peuvent être, d'origine interne, provenant des opérations de mise en forme et des traitements thermiques, ou d'origine externe, qui résultent des conditions d'utilisation.

Les pertes de poids des matériaux corrodés sont en général très faibles car la corrosion est localisée. Ce type de corrosion a des conséquences pratiquement importantes, étant donné que la variété des matériaux métalliques est le siège et le caractère du phénomène difficilement prévisible.

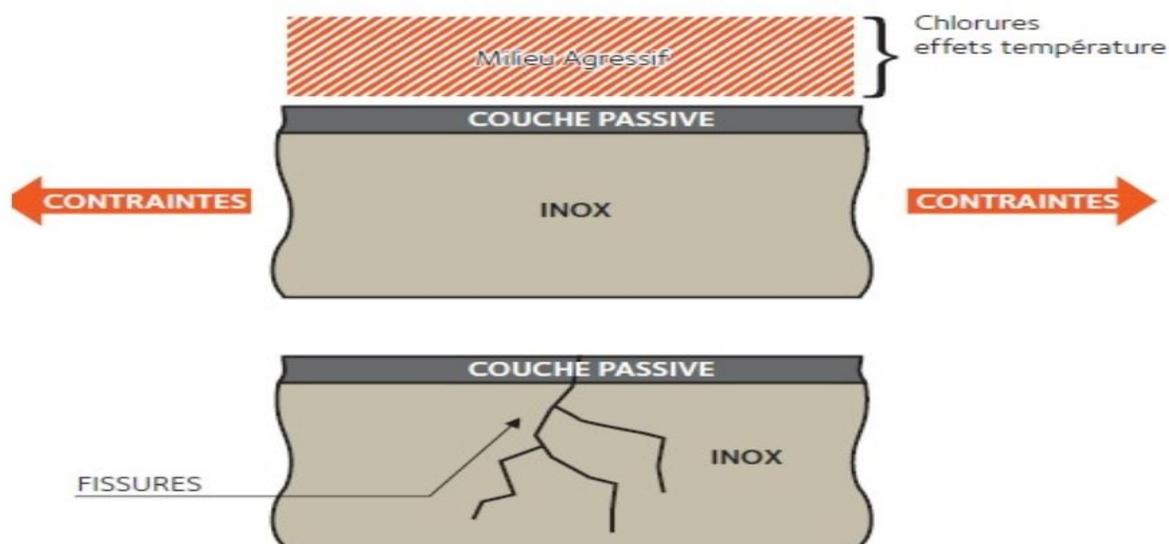


Fig. 10 corrosion sous contrainte CSC

2.3.2.5- Corrosion érosion / 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 frottements

et d'usure peuvent intervenir. On a apparition de sillons, vallées, surfaces ondulées, trous ayant un aspect directionnel caractérisé.

Les phénomènes de turbulence peuvent détruire les films protecteurs.

Cette forme spéciale de corrosion par érosion est la corrosion par cavitation, qui se produit dans les turbines hydrauliques, pompes etc.

Ce type de corrosion est causé par la formation et l'explosion de bulles de vapeur dans un liquide au contact de la surface du métal.

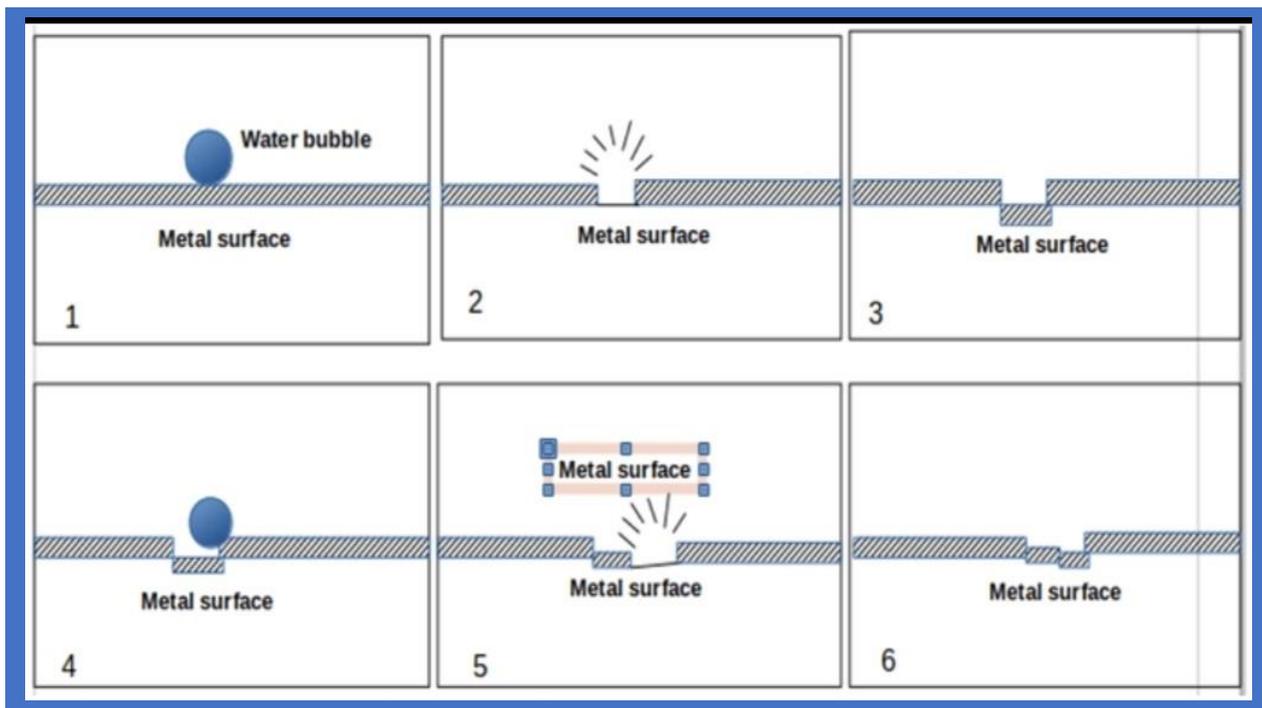


Fig.11 la formation et l'explosion de bulles de vapeur de liquide

1 et 4 : formation de vapeur d'eau sous forme de bulbes à la surface

2 et 5 : Explosion du bulbe

3 et 6 : Destruction de couche passive par arrachement de matière sur le métal

La cavitation entraîne des vitesses de corrosion très élevées sur des matériaux, par ailleurs très résistants en condition stable.

Par exemple : les rouées de pompe, les hélices etc...



Arrachement important
de matière

Fig.12 Hélice attaquée par la corrosion par cavitation

2.3.2.6- Corrosion caverneuse

Elle peut apparaître lorsqu'une pièce métallique est au contact d'un électrolyte dont le renouvellement n'est pas assuré : interstices entre matériaux de même nature, dépôts divers, sous matériau isolants, etc. Le processus de développement de la corrosion par crevasse (caverneuse), n'est pas fondamentalement différent de celui de la corrosion par piqûres. Cependant, la cinétique et la morphologie de l'attaque sont toute autre. Celle-ci s'étend en largeur à la surface de l'interstice ou sous le dépôt, et non pas en profondeur comme pour les piqûres.

L'anode, dans l'interstice, est le siège d'une réaction d'oxydation du métal tandis que le reste de la surface est la cathode où se produit la réduction de l'oxygène.

La corrosion par crevasses peut prendre un caractère dangereux, notamment dans l'eau de mer. La prévention contre la corrosion caverneuse impose l'utilisation d'assemblages sans interstices (joints), soudés par exemple. Le nettoyage des dépôts et salissures, l'utilisation de joints solides et non poreux.

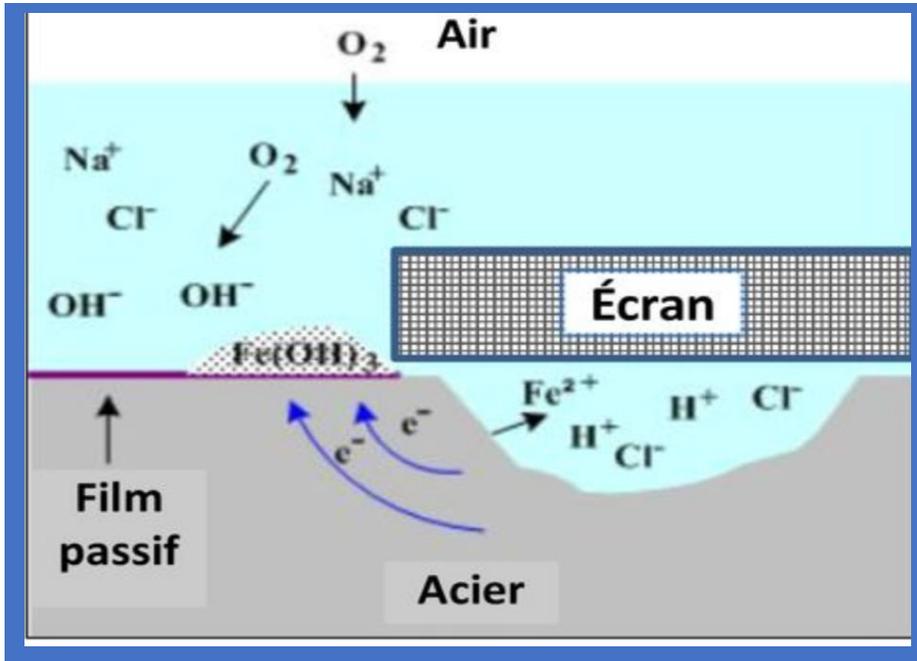


Fig. 13 Corrosion cavernouse

2.3.2.7- Corrosion par fragilisation d'hydrogène

L'hydrogène est un élément qui peut aisément diffuser dans les métaux et altérer leurs propriétés mécaniques. Ce phénomène a des conséquences pratiques considérables car il a de multiples occasions de pénétrer dans les aciers (élaboration, décapage, soudage, dépôts galvaniques, utilisation en milieu humide, hydrogène sulfuré, etc.) et il en résulte parfois, des ruptures catastrophiques immédiates ou différées selon les moyens de s'en prémunir, il existe trois types de fragilisations :

- La fragilisation par décarburation ; La formation de soufflures
- La fragilisation par l'hydrogène dissoute en présence de contrainte

C'est de loin, le phénomène le plus dangereux (car sa propagation est très rapide), le plus complexe (car on ne peut pas définir une cause mais des facteurs de risque). Aussi, il est le moins connu (car il existe beaucoup de théories qui ne sont pas susceptibles de décrire le tout). Tous les aciers sont atteints à des degrés divers. Toutes les propriétés mécaniques sont altérées à l'exception de la résilience sur l'état recuit. La fragilisation peut se traduire par une rupture

immédiate pour une contrainte très inférieure à la limite d'élasticité du métal exempt d'hydrogène. Elle peut intervenir au bout d'un certain temps, c'est la rupture différée. Les contraintes appliquées ou provenant d'écroutissage, changement de phase, etc., peuvent être à l'origine de la rupture. Les facteurs de risque sont la teneur en H₂, la structure et la composition de l'acier, sa limite d'élasticité, sa mise en œuvre. Pour lutter contre ce phénomène, on doit limiter les possibilités de pénétration de l'H₂, utiliser les structures stables et peu sensibles comme les structures martensitiques. Les aciers à haute limite d'élasticité, ont tendance à être plus altérés par l'H₂ que les aciers à faible limite d'élasticité.

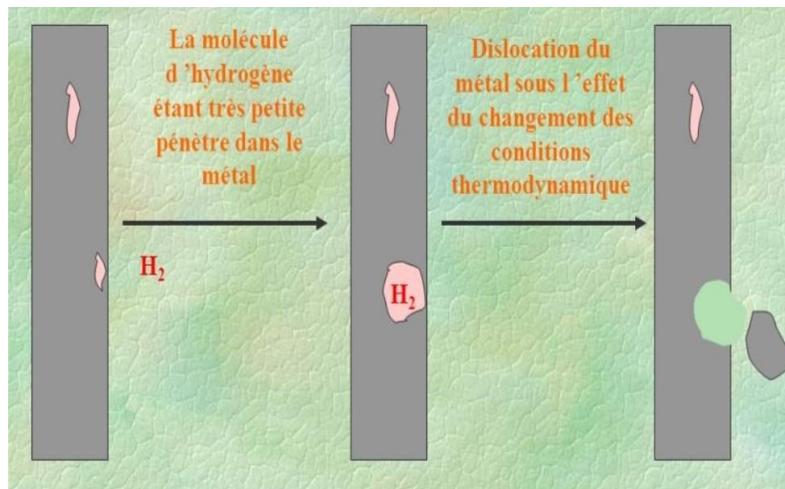


Fig.14 Corrosion par fragilisation par l'hydrogène

2.3.2.8- Corrosion par aération différentielle

La corrosion par aération différentielle se produit lorsqu'un même matériau est en contact avec deux milieux de teneurs en oxydant différentes. Par exemple si un piquet est planté dans la terre ou la vase, la partie proche de la surface est en contact avec plus de dioxygène que la partie profonde, il peut donc se créer une pile entre la partie profonde et la partie en surface. C'est-à-dire la partie la moins aérée devient l'anode et la partie la plus aérée devient la cathode. La corrosion par aération différentielle se rencontre aussi sur les structures immergées, lorsque la concentration en dioxygène évolue avec la profondeur.

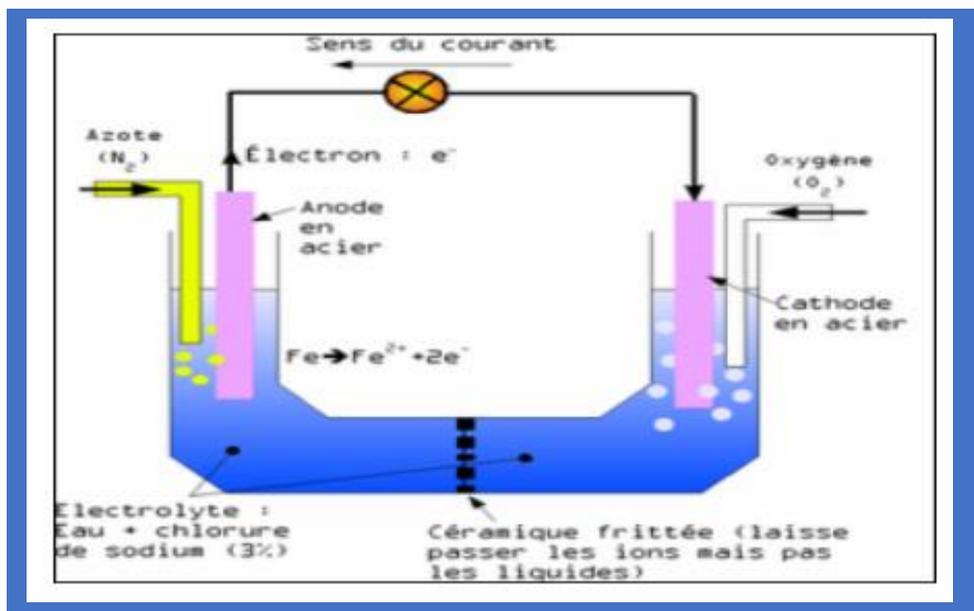


Fig.15 Expérience d'Evans

C'est parfois le cas des coques de bateaux. La couche d'eau proche de la surface est plus riche en oxygène que les couches profondes. Le problème d'aération différentielle peut se poser lorsqu'une pièce n'est peinte qu'en partie, ou lorsque la peinture est rayée.

2.3.3.9- Corrosion par courant vagabond

La corrosion par courant vagabond est une corrosion favorisée par une fuite de courant dans un milieu électrolytique. Elle se produit plus sur les structures métalliques immergées ou enterrées (pipeline).

Etant donné que la circulation d'un courant électrique est un mouvement d'ensemble de porteurs de charges électriques généralement des électrons au sein des métaux conducteurs et par des ions dans une solution aqueuse (électrolytique).

Les courants de fuite vont faire perdre plus rapidement des électrons au métal qui lui est en contact : dans cette condition il y a formation d'ions métalliques d'où présence de corrosion sur le métal.

Cette corrosion a lieu dans les zones de fuites (sortie du courant) du courant au niveau du métal.

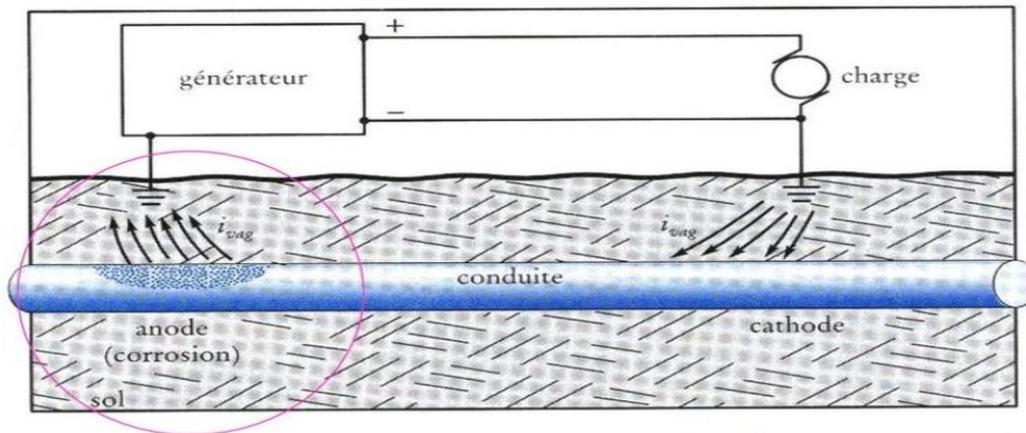


Fig. 16 Pipeline exposée à une corrosion par courant vagabond

Conclusion partielle

Il existe trois (3) types de corrosion (chimique, électrochimique et microbologique) qui se manifestent sous différentes formes dépendant d'une multitude de facteurs :

- Composition chimique et microstructure du métal.
- Composition chimique de l'environnement.
- Paramètres physiques (température, convection, l'irradiation, etc.).
- Sollicitations mécaniques (contraintes, chocs, frottements, etc.).

La résistance à la corrosion n'est donc pas une propriété intrinsèque du métal, mais plutôt une propriété de l'interface métal-milieu, d'où la nécessité de caractériser la composition chimique et la microstructure de celle-ci, ainsi que son comportement électrochimique. La corrosion dans toutes ces formes dépend donc de phénomènes à la fois complexe et aléatoire : le cas du milieu marin

3- CORROSION EN MILIEU MARIN

3.1- Définition du milieu marin

Le milieu marin est un milieu très hétérogène en composition chimique. Il est majoritairement composé en NaCl avec une salinité de 35g/kg (voir tableau 1).

En fonction de la profondeur et de la situation géographique le taux de dioxygène dissout, la température, le PH, la biodiversité, les houles et les courants varient. Ceux-ci font du milieu marin un milieu très complexe. Les mers et les océans recouvrent 70% de la planète terrestre.

Le milieu marin Comprend :

- L'atmosphère marin : zone soumise aux particules d'eau de mer entraînée par le vent et les brouillards salins.
- Zone soumise aux éclaboussures marines
- Zone soumise à la marée
- Zone immergée

Les facteurs de la corrosion en milieu marin sont :

- Chimiques : taux d'oxygène, salinité ; PH, gaz carbonique
- Physique : vitesses des courant, pression et températures
- Biologiques : salissures marines biologiques, végétales avec élimination d'oxygène et absorption de gaz carbonique, animales avec absorption d'oxygène et élimination de gaz carbonique [B]

La corrosion microbiologique (biochimiques), la corrosion électrochimique sont les principaux types de corrosion les plus rencontrés en milieu marin.

Ion	Concentration (g/kg)	Ion	Concentration (g/kg)	Ion ou molécule	Concentration (g/kg)
Cl ⁻	19.354	Ca ²⁺	0.412	Sr ²⁺	0.008
Na ⁺	10.77	K ⁺	0.399	B(OH) ₃	0.0257
SO ₄ ²⁻	2.712	HCO ₃ ⁻	0.140	F ⁻	0.0013
Mg ²⁺	1.290	Br ⁻	0.067		

Tableau 1 Constituants de l'eau de mer [C]

3.2- La corrosion microbiologique

Cette forme de corrosion est favorisée par les salissures marines biologiques (algues, coquillages.....) Ces salissures contiennent des micro-organismes qui produisent des substances corrosives telles que CO₂, H₂S, H₂SO₄, NH₃ ou d'un acide organique. Ces micro-organismes peuvent être des bactéries sulfatoréductrices, bactéries acidogènes, les bactéries du fer et du manganèse, les bactéries nitrifiantes.

Certaines bactéries telles que les bactéries sulfatoréductrices peuvent réduire les sulfates par l'intermédiaire d'hydrogène, selon l'équation (1) et oxyder le fer pour former des sulfures ferreux. (Voir fig.17)



L'hydrogène provient par exemple des régions cathodiques, il y a donc dépolarisation des cathodes et formation accélérée de Fe²⁺ aux anodes.



Aussi, le recouvrement des salissures (biofouling) en milieu marin sur les métaux crée parfois une aération différentielle entre les parties recouvertes et les parties non recouvertes d'où développement de corrosion par aération différentielle ou cavernueuse. (Voir fig.18)

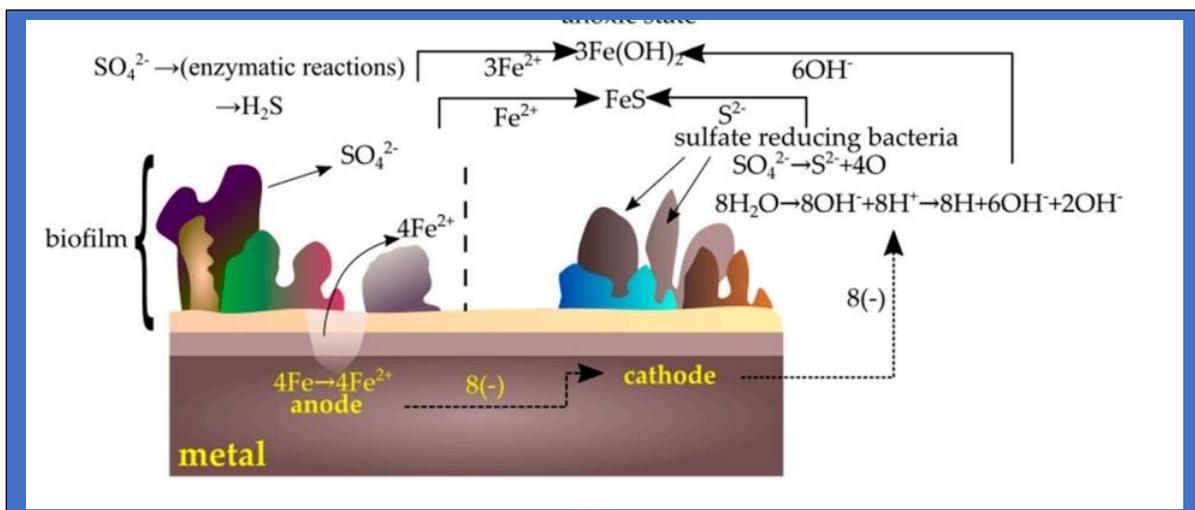


Fig. 17 Processus de la Bio-corrosion



Fig.18 Exemple de métal ayant subi une forte corrosion en milieu marin oxygéné (avec de plus un phénomène de corrosion caverneuse sous les coquillages) [C]

Remarque : hormis la bio corrosion, les salissures marines ont un impact sur l'exploitation des navires :

- Augmentation du poids et réduction de la vitesse du navire ce qui augmente la consommation en carburant du navire.
- Obstruction des circuits de refroidissement par les coquillages ce qui entraîne un mauvais refroidissement des équipements thermiques.

3.3- La corrosion électrochimique en milieu marin

La corrosion électrochimique en milieu marin se déroule par le même processus d'oxydoréduction. Cependant le milieu marin du fait de ses conditions complexes (ions dissous, PH, salinité, vitesse des courants, taux d'oxygénation etc...) Plusieurs formes de corrosion électrochimique peuvent se développer simultanément :

- La corrosion généralisée en atmosphère marin.
- La corrosion localisée : En zone immergée, zone soumise à la marée, zone soumise aux éclaboussures, en atmosphère marin.

La corrosion électrochimique dans le milieu marin se développe très rapidement car la présence de NaCl assure efficacement la conductivité électrique. (Voir fig.19)

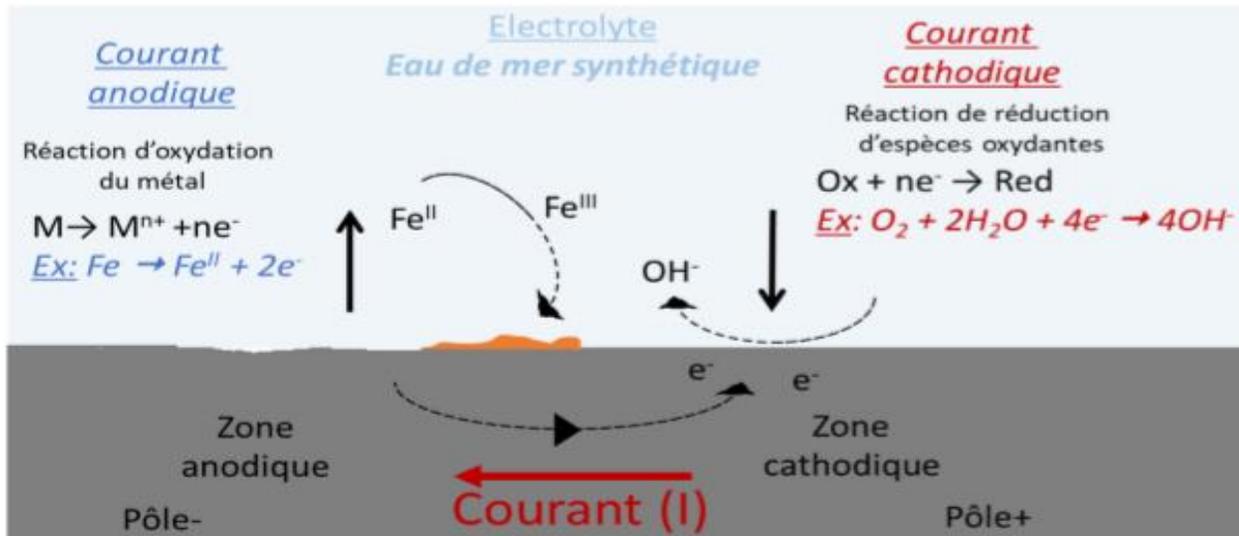


Fig.19 Processus de corrosion électrochimique d'une Barre de fer exposée dans un milieu marin [D]

et la Zone

cathodique. Elle met en exergue une circulation de courant électrique et une formation solution chimique.

La zone anodique : elle est le siège de la réaction d'oxydation. A cet endroit, le fer s'oxyde et libère des ions ferriques dans l'électrolyte laissant derrière lui une perte d'électrons ce qui entraîne la corrosion de la barre de fer aux endroits appelés zones anodiques.

La zone cathodique : elle est le siège de la réaction de réduction où les ions présents dans l'électrolyte sont réduits sur la surface de la cathode.

La réaction de réduction des ions hydrogènes présentes dans l'eau est celle qui se produit le plus souvent en formant le gaz d'hydrogène.

Nous remarquons que selon le milieu en contact avec le métal dans le milieu marin, il y'a développement de différents mécanismes de corrosion (corrosion microbologique et électrochimiques).

Ceci nous motive à faire une étude des installations marines afin de mieux appréhender le type de corrosion dont celle-ci peut être sujet en milieu marin.

4 LES INSTALLATIONS MARINES

4.1 Définition

Une installation marine est un ouvrage construit ou installé dans le domaine maritime : Soit en pleine mer, dans les profondeurs de la mer, dans les ports, ou sur des plages etc...

4.2 Principaux types d'installations marines

4.2.1 Plate-forme pétrolière

Une plate-forme pétrolière est une construction marine destinée à l'exploitation d'un gisement de pétrole en pleine mer. En fonction des zones d'exploitation nous avons différents types de plateformes (voir fig.20)

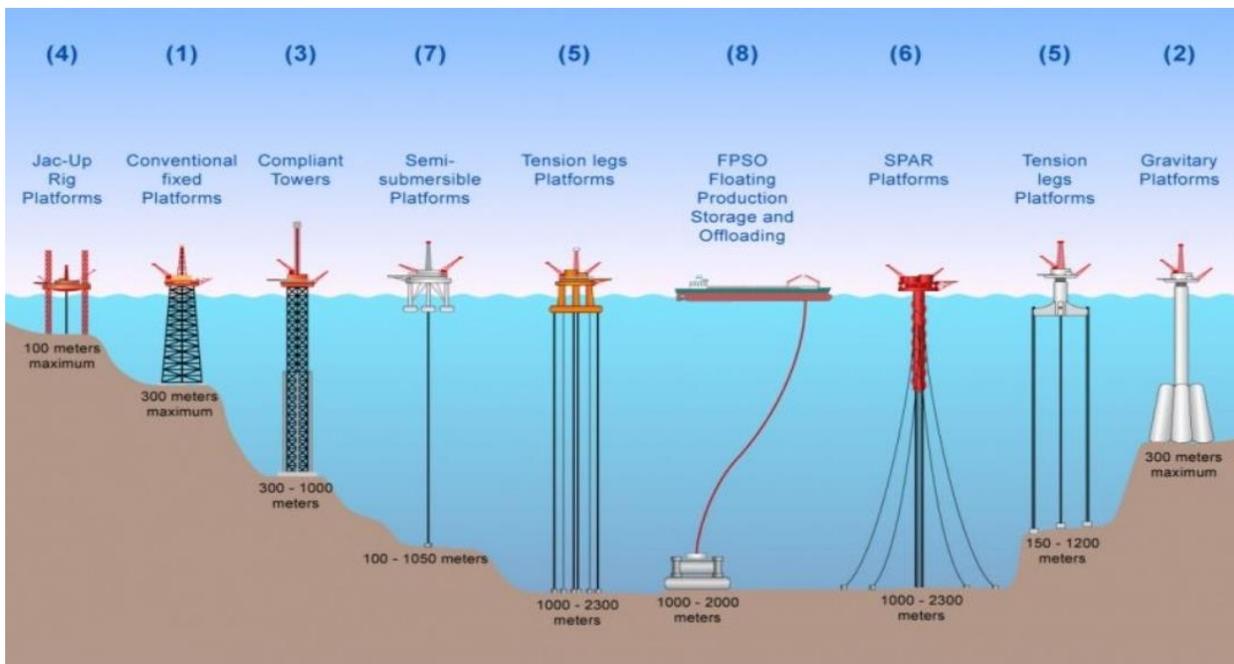


Fig. 20 TYPES DE PLATE-FORME

4.2.2- Navire

Un navire est un bateau (moyen de transport capable de flotter sur l'eau et de s'y déplacer) destinée à la navigation maritime. (Voir fig. 21)



Fig. 21 PRESENTATION D'UN NAVIRE DE PECHE

En fonction des activités à effectuer en mer nous avons plusieurs types de navires : TANKERS, PORTE-CONTENEURS, FERRIES, REMORQUEURS, NAVIRE DE GUERRE etc. ...

D'un point de vue générale un navire peut être subdivisé en deux de grandes parties :

- Les œuvres vives : Partie de la coque immergée délimitée par la ligne de flottaison. Elle comporte la quille, le safran, l'hélice, l'arbre porte hélice, les propulseurs d'étraves. Elle est appelée la carène
- Les Œuvres mortes : Partie émergée de la coque située au-dessus de la ligne de flottaison. Elle comporte le château, la cheminée, la pontée etc.....

4.2.3 Dock

Un dock est une structure marine destinée au carénage (cale-sèche) des navires. Il est équipé de très grandes pompes et de grands ballasts qui lui permettent de s'immerger presque totalement pour l'opération de hissage et d'être plus légère pour l'opération d'échouage.



Fig. 22 Exemple de dock

4.2.4 Bouée

Une bouée est une structure marine le plus souvent de forme cylindrique maintenue fixe sur l'eau par des ancres situées au fond de l'eau. Elles servent de signalisation pour le trafic maritime, pour l'amarrage et le chargement, le déchargement des produits pétroliers sur les sites offshore.



Fig.23 BOUEE D'AMARRAGE

4.2.5 Centrale thermique flottante

C'est une installation marine flottante qui produit de l'énergie électrique à travers l'énergie issue de la combustion du gaz ou de produits d'hydrocarbures.

Il est maintenu fixe sur l'eau grâce à des ancres situées dans le fond de l'eau.



Fig.24 Centrale thermique flottante d'Azito

4.3- Principaux matériaux de construction des installations marines

Pour des raisons économiques, et environnementales la construction des installations marines, s'effectue en majorité avec l'usage des métaux tel que : l'acier (pour les coques de navire, les piliers, pieux, les ancres, les pipelines etc. ...), le cuivre et ses alliages (échangeur thermique), l'aluminium et ses alliages (coques, plancher...etc.), le bronze (hélices pour les navires), Le fer et ses alliages (l'acier), l'aluminium, le cuivre et ses alliages seront définis pour mieux comprendre l'influence de la corrosion sur ces métaux les plus utilisés pour la construction des installations marines.

4.3.1- L'ACIER

L'acier est un alliage de fer et de carbone, La teneur en carbone variant de 0,1 à 2%. L'acier possède un ensemble de propriétés mécaniques remarquables : une forte résistance à la traction et aux chocs, une bonne élasticité, une excellente dureté, qui lui assurent des emplois

de plus en plus nombreux. Au cours du XXe siècle, l'acier est devenu le produit phare de la grande industrie.

Le Processus de l'obtention de l'acier s'effectue par la production de la fonte au haut fourneau par les oxydes ferriques. La fonte ainsi obtenue est purifiée et diminuée de sa teneur par un convertisseur ou soit raffinée par un four électrique à l'arc. En fonction du type d'usage l'acier doit avoir de bonnes propriétés métallurgiques :

Les caractéristiques mécaniques, les compositions chimiques du matériau et la soudabilité métallurgique.

Ces propriétés sont définies par des normes :

- Américain Petroleum Institute (API) 5 L, PSL1,
- La norme européenne EN 10219-1 : 1997

Les alliages aciers sont des alliages fer-chrome contenant au moins 12% de chrome dont la structure dépend des éléments d'addition : ainsi, le nickel (élément gamma-gène) stabilise la structure austénitique, alors que le chrome et le molybdène favorisent la structure ferrique (éléments alpha-gènes). Il en existe de nombreuses nuances et leur domaine d'utilisation est étroitement lié à leur composition et à leur structure.

Le tableau ci-après regroupe quelques nuances classiques d'aciers inoxydables avec leur composition en éléments majeurs.

Nuance	Dénomination AFNOR / AISI	Composition
Austénitique	Z 2 CN 18.10* / 304 L Z 2 CND 17.12 / 316 L Z 2 CNNb 25.20	Cr 18%, Ni 10%, Fe Cr 17%, Ni 12%, Mo 1,5%, Fe Cr 25%, Ni 20%, Nb 0,25%, Fe
Ferritique	Z 6 C 13 Z 8 CD 17.01 Z 1 CD 26.01	Cr 13%, Fe Cr 17%, Mo 1%, Fe Cr 26%, Mo 1%, Fe
Austéno-ferritique	Z 5 CNDU 21.08	Cr 21%, Ni 8%, Mo 2,5%, Fe

Table 2 Nuances d'aciers inoxydables couramment employés [E]

* : Signification de la norme AFNOR :

Z : aciers spéciaux, 2 : teneur en carbone (10-2 %), C : chrome, N : nickel D : molybdène, U : cuivre.

La résistance à la corrosion des aciers inoxydables est essentiellement due à la formation en surface d'une couche passive qui apparaît naturellement à l'air et qui est constituée d'un oxyde riche en chrome, de faible épaisseur (environ 10 nm), et résistant. Ces matériaux doivent donc être employés dans des conditions où ils conservent cette passivité car des destructions locales de cette couche protectrice conduisent inévitablement à des phénomènes de corrosion localisée.

Le processus de corrosion que peut subir l'acier est celui décrit dans le processus de la corrosion électrochimique en milieu marin.

4.3.2- Le cuivre

Le cuivre est un métal de transition de numéro atomique 29, de configuration électronique à l'état fondamental $[Ar] 3d104s1$ et de masse molaire 63,546 g.mol⁻¹. Le cuivre existe sous trois degrés d'oxydation : 0, +1 et +2. C'est l'un des métaux les plus anciennement connus et utilisés par l'homme. Sa malléabilité, la fiabilité des contacts qu'il permet ainsi que sa bonne conductivité électrique et thermique sont les raisons essentielles de l'emploi généralisé de cuivre dans l'industrie maritime.

Les alliages de cuivre ont de multiples applications, les principaux sont :

- Le laiton : Alliages de cuivre et de zinc de 5 à 45%. Ce sont les alliages de cuivre les plus utilisés
- Le bronze : alliages de cuivre et d'étain de 3 à 20%
- Maillechorts : Alliages de cuivres avec 9 à 26% Nickel et de 17 à 28 % de zinc
- **La corrosion du cuivre**

Le cuivre est certes moins noble que l'or et le platine du point de vue des potentiels rédox, mais le diagramme d'équilibre potentiel-pH établi par **POURBAIX** pour le système Cu/H₂O

montre l'existence de domaines d'immunité et de passivation compris dans le domaine de stabilité de l'eau.

Les différentes études déjà réalisées sur la corrosion du cuivre en milieu neutre montrent que celle-ci conduit essentiellement à la formation d'ions cuivriques Cu^{2+} en solution, et de deux oxydes Cu_2O et CuO . Les couches passivantes en milieu neutre et alcalin sont constituées soit d'une couche simple d'oxyde de cuivre(I), soit d'une couche duplexe d'oxyde cuivreux et d'oxyde cuivrique plus ou moins hydraté, ce deuxième oxyde ne se forme que sur une couche de Cu_2O d'épaisseur suffisante.

Cette couche d'oxyde empêche le cuivre de s'oxyder en milieu neutre.

Cependant en milieu marin la présence d'ions Cl^- détruit cette couche passive pour favoriser la corrosion du cuivre dans des conditions de pH et de Potentiel donnée. (Voir fig.25)

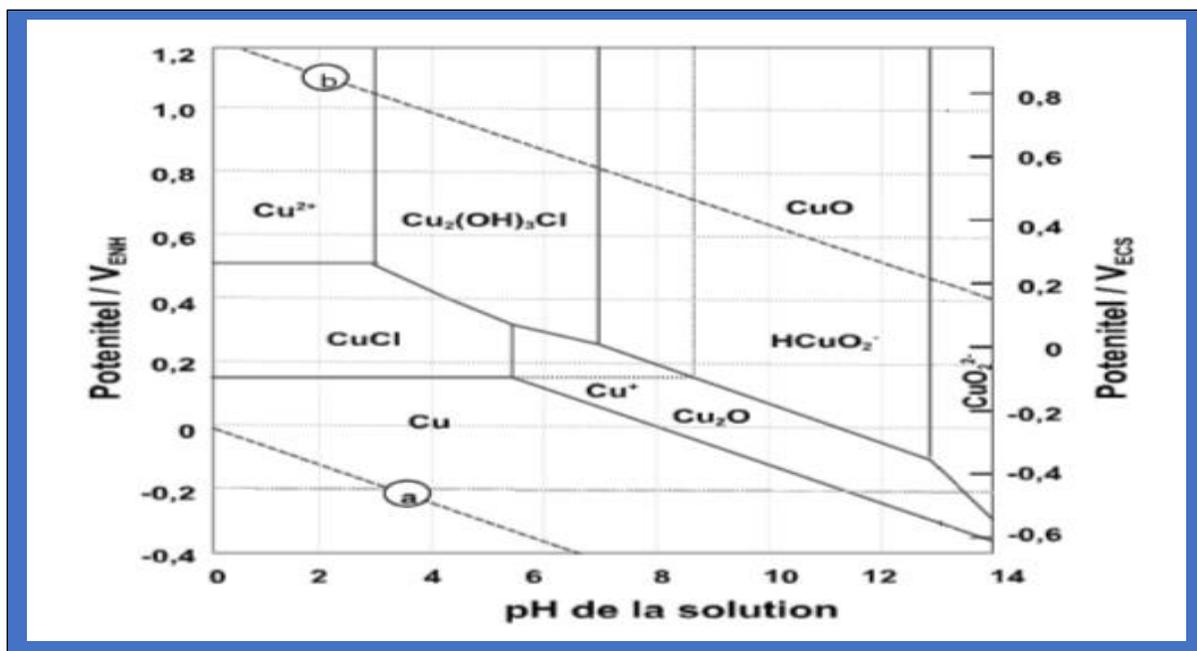


Fig.25 Diagramme E-pH du système $\text{Cu}/\text{H}_2\text{O}/\text{Cl}^-$ à $T = 25\text{ °C}$ et pour des concentrations de $10^{-4}\text{ mol.L}^{-1}$ [F]

En effet la formation de 2CuCl soluble déstabilise le développement des oxydes et provoque la corrosion par piqure de cuivre. D'autres complexes hydroxylés peuvent également exister dans ce milieu : $\text{Cu}_2(\text{OH})^{2-}$, $\text{Cu}_2(\text{OH})_3^{2-}$ et $\text{Cu}_2(\text{OH})_4^{2-}$. La formation de ces complexes

solubles empêche la précipitation de films d'oxydes protecteurs et entraîne une corrosion accélérée de cuivre.

Globalement, le film de Cu_2O ne se trouve donc presque jamais dans les conditions où il peut assurer une protection, puisque dès qu'il commence à se transformer en CuO , son épaisseur diminue et l'oxydation directe du cuivre est de nouveau possible.

À titre d'exemple, la figure 26 présente une conduite d'eau en cuivre recouverte de produits de corrosion.



Fig.26 Produit de corrosion du cuivre

4.3.3 L'aluminium

L'aluminium est un élément chimique de numéro atomique 13 de symbole Al.

Il est le métal le plus abondant de la planète et de façon plus générale le troisième élément le plus abondant après l'oxygène et le silicium. Il représente environ 8% de la masse totale des matériaux de la surface solide de la Terre. Très réactif, on trouve de l'aluminium dans plus de 270 minéraux différents dont la bauxite où l'aluminium est présent sous forme d'oxyde hydraté (l'alumine Al_2O_3) à hauteur de 40 à 60%.

L'aluminium métallique est connu pour être très sensible à l'oxydation. Le métal mis à nu s'auto-passive instantanément par oxydation. Ce film composé d'alumine se forme spontanément dès que l'aluminium est mis en contact avec un milieu oxydant tel que l'oxygène de l'air. Cette couche d'oxyde protège l'aluminium contre la corrosion.

L'aluminium est un matériau très couramment utilisé dans l'industrie grâce à certaines de ses remarquables propriétés : il est très léger (sa densité est trois fois plus faible que celle de l'acier et du cuivre), résistant à la corrosion, malléable et ayant une coloration argentée durable. A noter que l'aluminium est un très bon conducteur alors que son oxyde est un excellent isolant. Toutes ces propriétés en font le deuxième métal le plus utilisé au monde après l'acier avec une consommation annuelle s'élevant à plus de 50 millions de tonne.

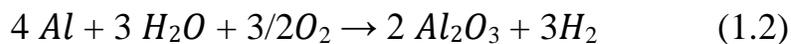
- **Les alliages d'aluminium**

Les alliages d'aluminium sont des compositions chimiques où d'autres éléments sont ajoutés à l'aluminium pur afin d'améliorer ses propriétés et notamment sa résistance mécanique.

Parmi les éléments d'alliage on retrouve le fer, le silicium, le cuivre, le magnésium, le manganèse et le zinc, ajoutés à des concentrations combinées allant jusqu'à 15% en masse.

- **Corrosion de l'aluminium**

Comme énoncé précédemment, l'aluminium est un métal qui se recouvre spontanément d'un film d'oxyde protecteur lorsqu'il est exposé à un milieu contenant de l'oxygène. Les réactions mises en jeu dans l'air (1.1) et dans l'eau (1.2) sont les suivantes :



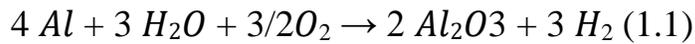
L'épaisseur de la couche d'alumine peut varier de quelques nanomètres à une dizaine de nanomètre. Ce film résistant et isolant assure la protection du métal contre la corrosion. En effet, en couvrant la totalité de la surface, il empêche les électrons produits par l'oxydation du métal d'atteindre la surface de l'oxyde. Cette action protectrice ne peut être assurée si le film d'oxyde est dissout ou présente un défaut.

La stabilité thermodynamique de la couche d'oxyde en fonction du pH est présentée sur le diagramme d'équilibre potentiel-pH, également appelé **diagramme de POURBAIX** (voir fig.27).

La zone démarquée en pointillés sur le diagramme correspond au domaine de stabilité de l'eau. On remarque alors que le domaine de stabilité de l'aluminium métallique (appelé zone d'immunité sur le diagramme) n'est pas compris dans cette zone. Cela signifie qu'au contact de l'eau l'aluminium n'est pas sous forme métallique.

Trois autres zones apparaissent également sur ce diagramme :

- la zone de passivation dont le pH est compris entre 3,9 et 8,6 et pour laquelle l'oxyde d'aluminium est stable et se forme selon la réaction ci-dessous.



- la zone de corrosion à pH < 3,9 où l'aluminium se dissout en formant des ions Al_3^+ selon la réaction 1.2.



- la zone de corrosion à pH > 8,6 où l'aluminium se dissout et forme des ions AlO_2^- selon la réaction 1.4.

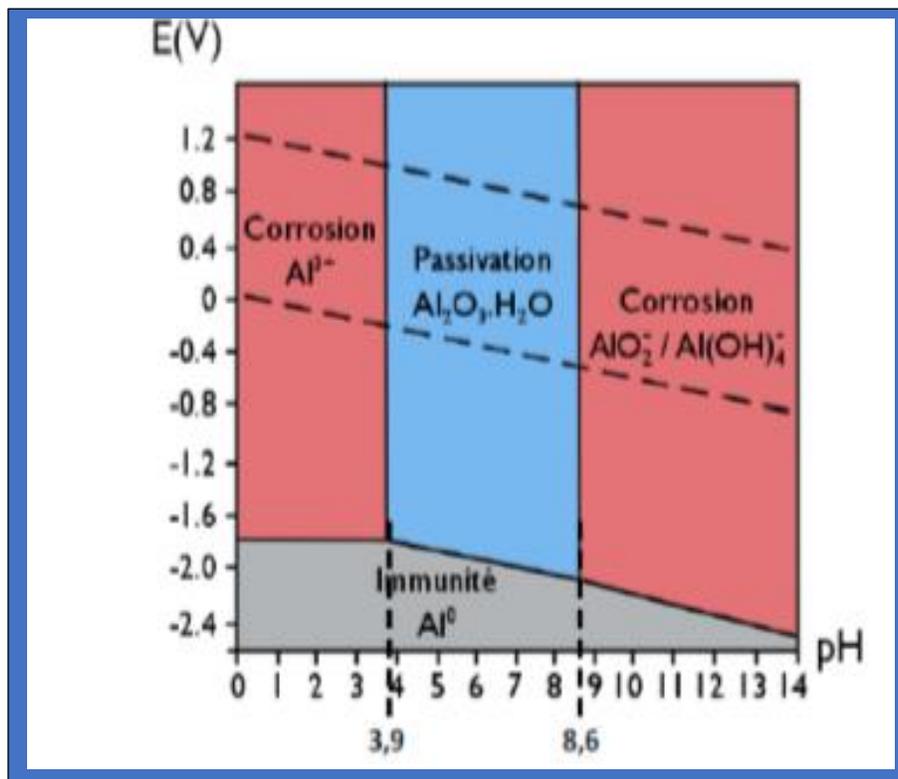


Fig.27 Diagramme de Pourbaix de l'aluminium pur [G]

En eau de mer l'oxydation de l'aluminium peut également avoir lieu sous l'action des ions chlorures lorsque leur teneur est suffisante, pour former des chlorures d'aluminium souvent appelé sel d'aluminium (voir fig.28 et 29). Selon l'équation :

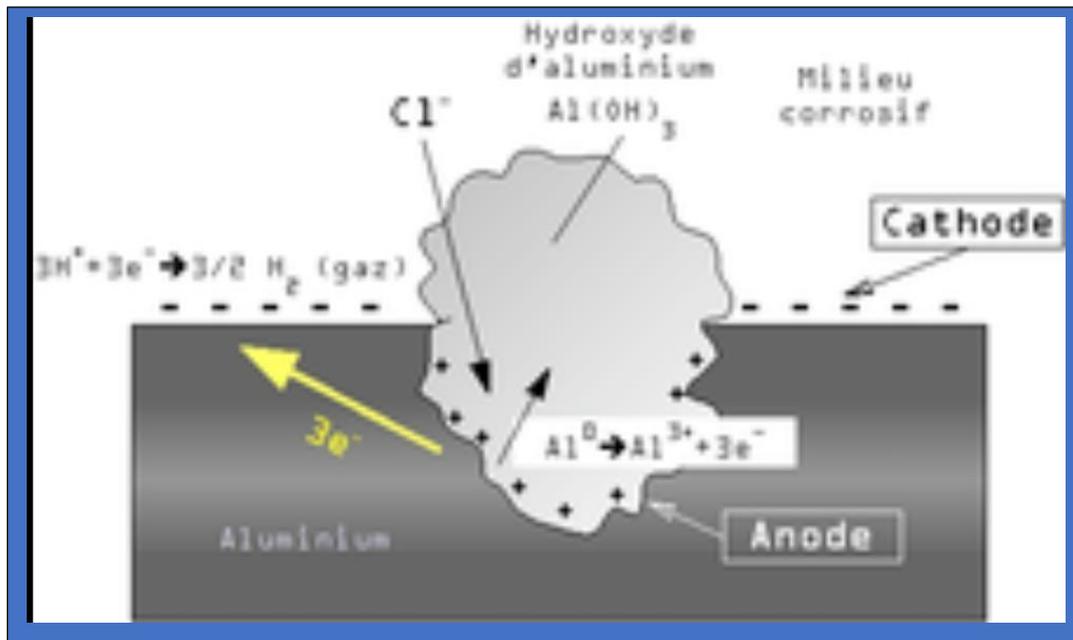
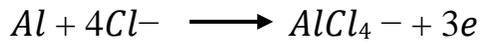


Fig.28 Processus de la corrosion en milieu marin de l'aluminium



Fig.29 Coque en aluminium d'une vedette du lamanage corrodée

5 - PROTECTION

5.1 - Définition

Protection dérivée du latin « **protectio** ou **protectum** » qui désigne l'action de protéger, de défendre, contre une menace.

Les phénomènes de corrosion impactent les activités maritimes à plusieurs niveaux, mettant en jeu la sécurité, mais également la longévité des matériaux et des installations. Une protection efficace contre la corrosion permettra un renouvellement moins fréquent des matériaux, générant ainsi une économie sensible. Plusieurs approches de protection sont envisageables : revêtements anticorrosion, protection cathodique, traitements thermomécaniques, inhibiteurs de corrosion, etc.,

La résistance à la corrosion n'est pas une propriété intrinsèque d'un métal donné. Elle dépend du milieu environnant ; ce milieu est défini par un ensemble de paramètres. De plus, le comportement de la corrosion dépend de l'état de surface et plus précisément de l'interface matériau-milieu. La résistance à la corrosion est donc celle d'un système matériau-surface milieu, soumis à des sollicitations diverses, physicochimiques, thermiques et mécaniques.

Les technologies de protection sont :

- La protection par revêtement
- Protection chimique
- Protection électrochimique
- Protection géométrique
- Protection Electro Anti-fouling

5.2 - Types de protection contre la corrosion

5.2.1- La protection par revêtement

La protection par revêtement a pour but d'isoler électriquement le métal, afin d'éliminer le contact du métal avec le milieu corrosif et aussi d'empêcher la fixation des micro-organismes (les biofouling en milieu marin).

Pour ce fait, il existe deux grands types de revêtement : revêtements organiques, revêtements métalliques.

5.2.1.1- Revêtement organique :

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

- Peintures :

Pour les peintures, plus l'adhérence est bonne, plus ces conditions sont remplies. L'importance économique des peintures dépasse de loin celle des autres méthodes de protection contre la corrosion. La plupart des métaux sont protégés par des peintures. Il est nécessaire d'appliquer deux ou plusieurs couches. Certaines peintures contiennent des pigments qui agissent comme primaires anti-corrosion. Les principaux constituants d'une peinture sont :

- Le liant : C'est le composant le plus important d'une peinture, il assure la cohésion du film et son adhérence au substrat (PVA, PVC, époxydes, etc.).
- Le solvant : permet d'appliquer la peinture à l'état liquide (l'huile de lin, solvants organiques) une fois la peinture appliquée, l'eau s'évapore et le liant qui possède normalement une masse moléculaire élevée, forme un film compact par coagulation.
- Les pigments : sont des composés que l'on ajoute aux peintures pour donner la couleur, les plus connus sont Pb_3O_4 , $ZnCrO_4$. Ils sont toxiques.
- Les additifs et les charges : sont destinés à modifier certaines propriétés des peintures comme la viscosité, la résistance à l'oxydation ou la tension de surface. Les charges, substances bon marché, telles que l'oxyde de titane ou le carbonate de calcium augmentent la masse et le volume des peintures. Elles peuvent également améliorer certaines propriétés de films comme la résistance à l'abrasion.

- Matières plastiques :

L'utilisation des revêtements plastiques pour les métaux, s'accommode bien pour la protection contre la corrosion. Ils présentent beaucoup d'avantages par rapport aux peintures, tels que l'épaisseur de la couche (100 à 500 μm), en même temps, il joue le rôle d'isolateur. L'inconvénient des plastiques, réside dans la faible résistance à la température et leur instabilité dans plusieurs solvants organiques.

Les revêtements plastiques utilisés sont :

- Les thermoplastes (polyéthylène, polypropylène, PVC,).
- Les caoutchoucs (naturels ou synthétiques).
- Les thermodurcissables (polyuréthanes, époxydes, polyesters).

5.2.1.2 - Revêtement métallique

Le revêtement métallique consiste à appliquer à la surface d'un métal une couche métallique par un procédé chimique ou thermique.

Les revêtements métalliques, outre leur effet anti-corrosion, remplissent souvent une fonction décorative. On les utilise aussi comme protection contre l'usure.

Il existe deux types de revêtements métalliques ceux plus nobles que le substrat cathodique et ceux moins nobles que le substrat anodique.

- **Revêtement anodique :**

Dans le cas des aciers, le zinc, le cadmium et l'aluminium forment des revêtements moins nobles que l'acier (voir échelle galvanique).

Dans le cas d'un revêtement de zinc par exemple, l'acier constitue la cathode de la pile, c'est donc le zinc qui est attaqué. L'acier est protégé cathodiquement par le zinc qui est moins noble que lui (protection cathodique).

- **Revêtement cathodique :**

Dans le cas d'un revêtement de plomb, d'étain, de nickel, de cuivre, d'argent, d'or, de rhodium ou de platine, on dit qu'ils forment des revêtements plus nobles, donc constituent la cathode et

l'acier est considéré comme l'anode. Dans le cas du revêtement de l'acier par le nickel, l'acier constitue l'anode de la pile et le nickel la cathode. La moindre fissure dans le revêtement entraînera l'attaque de l'acier, il est donc nécessaire que le revêtement soit parfaitement continu et ne contienne aucun défaut.

5.2.3 Protection chimique

La protection chimique est une protection par inhibiteurs de corrosion

Un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui, ajouté en petite quantité au réactif corrosif, permet de diminuer la vitesse de corrosion ou d'annuler son agressivité vis-à-vis du métal. Il ne modifie donc pratiquement pas la nature, ni la concentration du milieu. Les inhibiteurs de corrosion agissent en créant une barrière entre le métal et le réactif. Ils viennent se fixer à la surface du métal sous une forme qui dépend de leur nature.

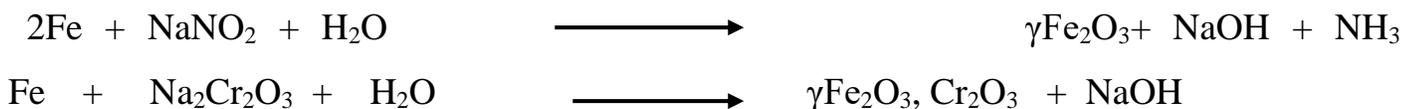
Il existe des inhibiteurs pour milieux aqueux, pour milieux acides, employés pour éviter une attaque chimique de l'acier lors du décapage ou au fluide de forages, pour milieu neutres. Ils servent surtout à protéger des circuits d'eau de refroidissement.

Les inhibiteurs sont classés en deux groupes : **Anodique et cathodique.**

- **Inhibiteur anodique :**

L'anion de l'inhibiteur forme sur les anodes locales avec les cations provenant de l'oxydation du métal, un composé insoluble. Ainsi le phosphore de sodium est un inhibiteur de la corrosion de fer par une solution aqueuse de chlorure de sodium grâce à la formation de phosphate de fer sur les anodes.

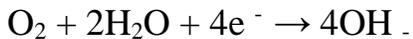
Les produits les plus connus sont les nitrites et les chromates. Ils réagissent à l'anode pour former des films protecteurs selon les processus globaux suivants :



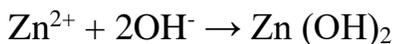
Ce sont des inhibiteurs passivant. La formation de la couche passive ne nécessite pas la présence d'oxygène dissous. Celui-ci est apporté par l'inhibiteur lui-même. De par leur mode d'action, ces inhibiteurs doivent être utilisés en dosage suffisant, de l'ordre de gramme par litre d'eau [H]. L'exemple de l'hydrazine (N₂H₄) utilisé pour les circuits de refroidissement eau de mer.

- **Inhibiteur cathodique :**

Le mode d'action des inhibiteurs cathodiques est basé sur une précipitation à la surface cathodique d'un sel ou d'un hydroxyde, sous l'action des ions OH⁻, produits par réduction de l'oxygène dissous lors de la réaction cathodique de corrosion. Cette précipitation a pour effet de stopper la réaction cathodique et la corrosion. Ainsi, les ions bicarbonate d'eau peuvent être considérés comme des inhibiteurs cathodiques si l'alcalinisation au voisinage de la cathode par production d'ions OH⁻ permet la précipitation de carbonate de calcium et la formation d'une couche protectrice fine et bien cristallisée selon les réactions :



Cependant, en pratique, cette réaction est difficile à contrôler et on préfère l'emploi d'un inhibiteur. L'inhibiteur cathodique le plus utilisé est l'ion zinc, introduit généralement sous forme d'un sel de ce métal. La précipitation cathodique se fait sous forme d'un hydroxyde plus ou moins complexe :



Les inhibiteurs cathodiques du fait de leur mode d'action, sont considérés comme plus sûrs que les inhibiteurs anodiques, car ils ne risquent pas de favoriser la corrosion localisée, même si, en cas de sous dosage, la densité du courant de corrosion cathodique augmente. Il y aura corrosion bien entendu, mais pas plus qu'en absence d'inhibiteur.

En pratique, les sels de zinc ne sont pas utilisés seuls, mais en association avec d'autres inhibiteurs de corrosion et d'entartrage.

5.2.4 Protection électrochimique

La corrosion électrochimique d'un métal est le résultat du passage d'un courant anodique dans les piles locales. Pour supprimer le phénomène de corrosion, il faut porter le métal à un potentiel pour lequel l'intensité de la réaction élémentaire anodique est nulle ou très faible.

Deux types de protection électrochimiques peuvent être envisagés :

- Protection cathodique.
- Protection anodique.

5.2.4.1 Protection cathodique

La corrosion d'une pièce métallique peut être empêchée par la protection cathodique. Elle a été déjà employée avant le développement de la science de l'électrochimie. **HUMPHREY DAVY** a utilisé la protection cathodique en 1824 pour protéger un bateau de guerre britannique contre la corrosion.

Elle est surtout utilisée pour la protection des canalisations métalliques (tuyauteries) souterraines ou les constructions se trouvant en contact avec l'eau, tels que les câbles, les réservoirs, les pipelines, etc.

La protection cathodique est économiquement avantageuse car elle a une utilisation pratiquement illimitée.

La protection cathodique a obtenu aussi une grande importance dans l'application dans le domaine navale, du pétrole et gaz.

Le principe de la protection cathodique consiste à abaisser la tension métal-milieu de manière à l'emmener dans sa zone d'immunité (Voir fig.30 Diagrammes de POURBAIX du fer). Pour une tension inférieure à $-0,6$ v, le fer est dans sa zone d'immunité.

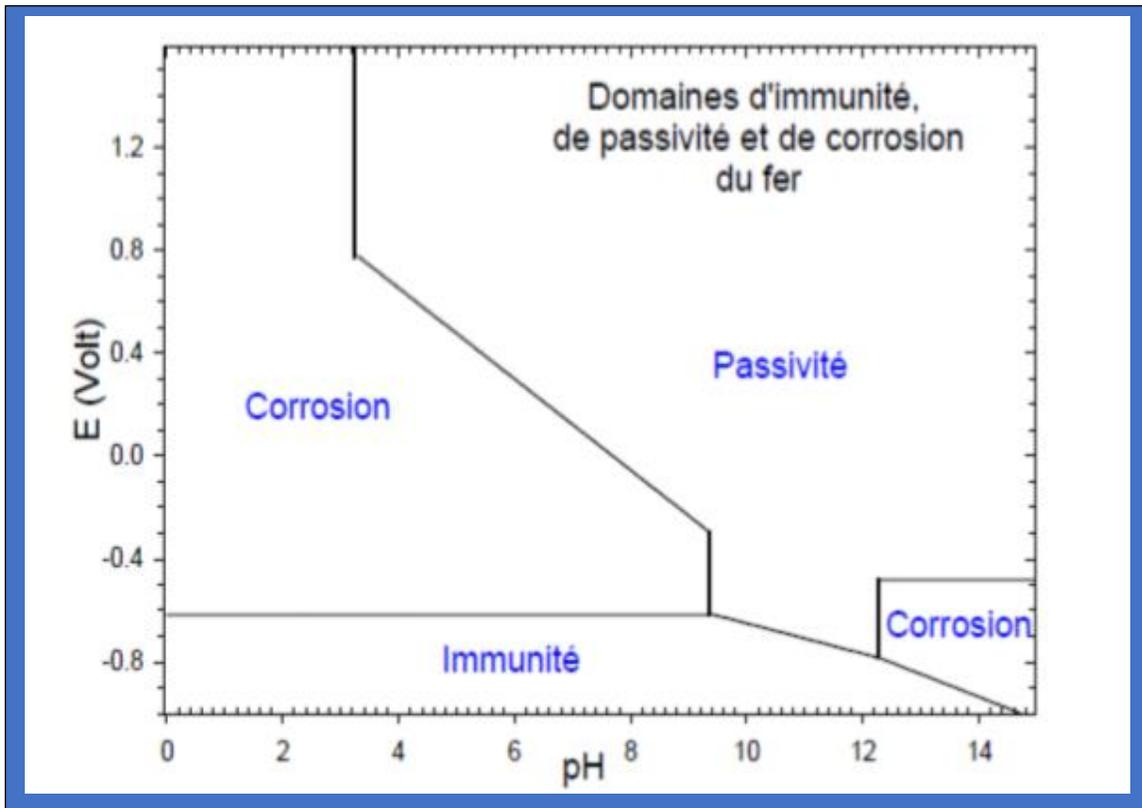


Fig.30 Diagramme de POURBAIX

Pour abaisser le potentiel jusqu'à la zone d'immunité il faut appliquer une tension de protection E_{pro} . Cette tension est produite soit par :

- Anode réactive ou sacrificielle.

Dans ce cas, la force électromotrice (f-é-m) nécessaire, est obtenue à partir de la différence entre la tension moyenne du couple de corrosion et la tension propre (plus négative) d'une anode dite sacrificielle.

- Un courant imposé, en utilisant un générateur extérieur de f-é-m, réglable et une anode auxiliaire.

5.2.4.2 Protection cathodique par anode sacrificielle (PCAS)

Le métal à protéger est relié électriquement à une électrode constituée par un métal moins noble que lui, et qui joue le rôle d'anode sacrificielle. L'anode sacrificielle forme une pile électrochimique avec le métal à protéger qui joue le rôle de cathode. Si le potentiel que prend

le métal à protéger est suffisamment négatif, celui-ci n'est plus attaqué car la réaction élémentaire anodique ne peut plus se produire.

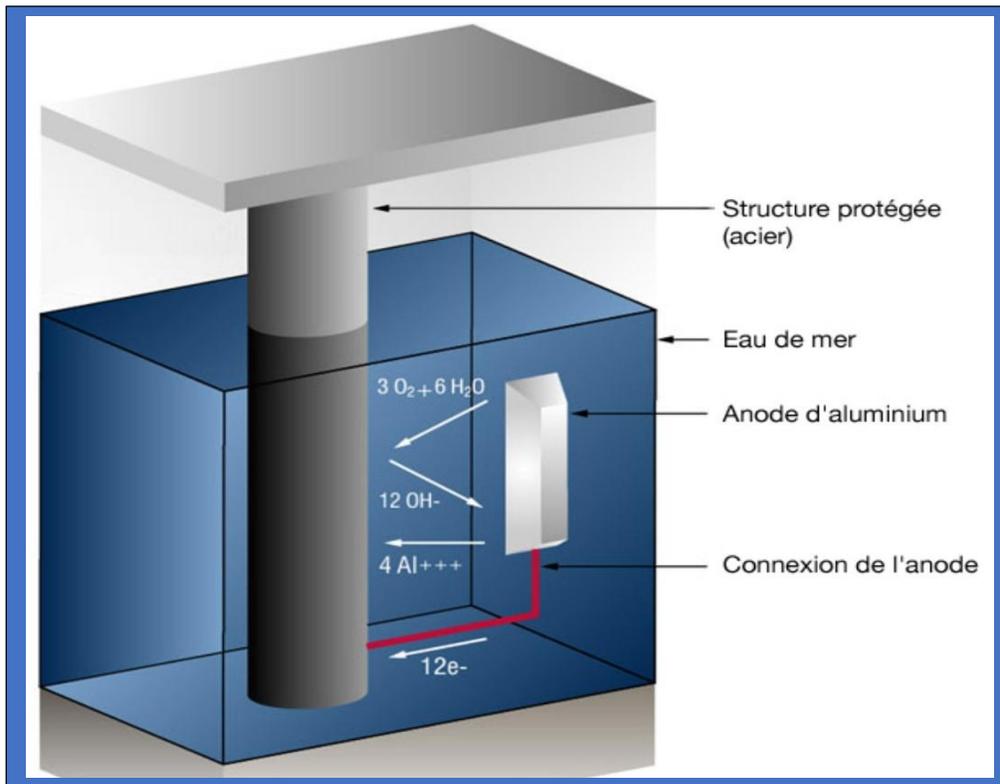
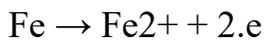


Fig.31 Protection d'une structure immergée en eau de mer par anodes sacrificielles

Interprétation électrochimique : Prenons l'exemple de la protection du fer par le zinc. Si le fer est seul, il prend par rapport à la solution un potentiel E_{Fe} , et une intensité de corrosion i_{Fe} . Le zinc seul, prend par rapport à la solution le potentiel E_{Zn} . Si l'on réunit les deux métaux, ils prennent un potentiel E_m . Le fer n'est plus attaqué, jusqu'à ce potentiel, la réaction :



ne peut pas se produire. Par contre, le zinc est attaqué et le courant anodique i_m est plus élevé que le courant de corrosion i_{Zn} relatif au Zn isolé. Pratiquement, on admet que pour protéger le fer dans l'eau il faut le porter à un potentiel de - 0,8 V/E.C.S. Les diverses anodes sacrificielles utilisées pour la protection des métaux usuels tels que

le fer et le cuivre sont à base de magnésium (G-A6Z3), à base d'aluminium (AZ6, AZ6HgO, O4) et à base de zinc (ZHgO, 15).

Les anodes sacrificielles possèdent différentes formes telles que tiges, blocs, anneaux, (voir fig.32.)



Fig.32 Format d'anodes sacrificielles

5.2.4.3-Protection cathodique par courant imposé (PCCI)

Le Principe de protection est : par utilisation d'une source d'énergie électrique en courant continu qui débite dans un circuit comprenant.

- Masse anodique ou (un déversoir).
- L'électrolyte (sol ou eau).
- La structure à protéger.

Le pôle positif de la source est relié au déversoir alors que le pôle négatif est relié à la structure à protéger.

Comme le montre la Fig.33, le courant venant du déversoir traverse l'électrolyte, puis entre dans la structure créant ainsi un abaissement de potentiel recherché correspondant à l'immunité du métal.

Par exemple, pour de l'acier dans un sol type, la différence de potentiel (ddp) entre l'électrode de référence au sulfate de cuivre saturé est inférieure à $-0,850$ V en tous points de la structure.

En général, la valeur limite inférieure que l'on cherche à atteindre est d'environ -1 V.

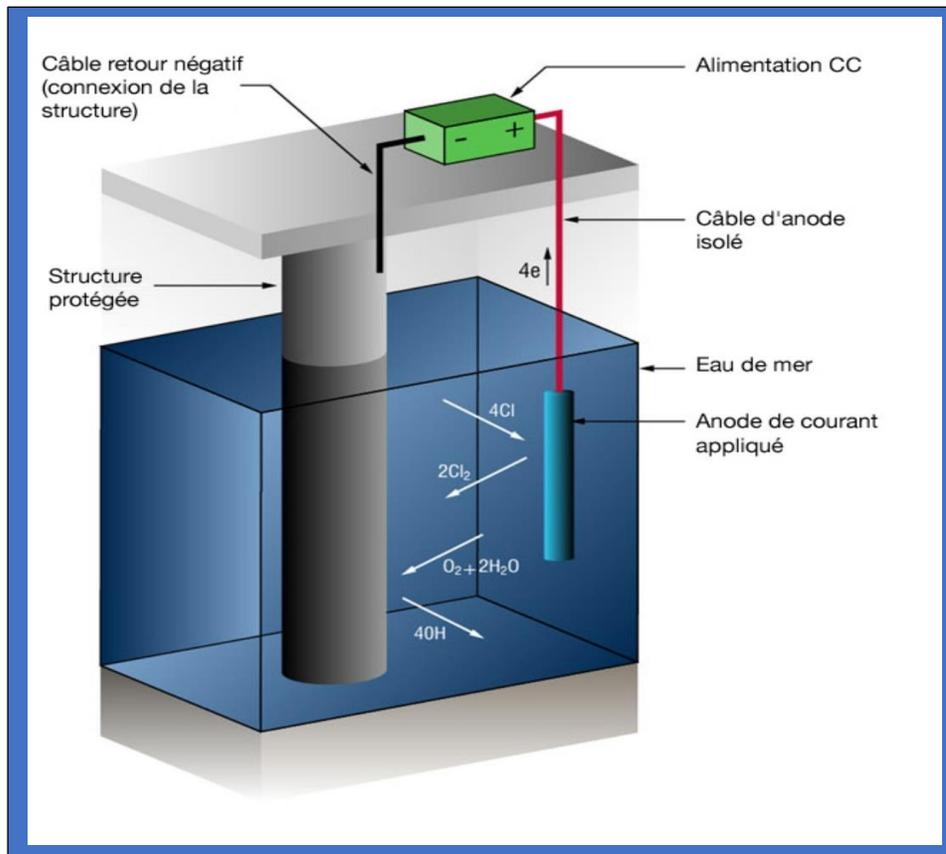


Fig.33 Structure métallique sous protection à courant imposé

5.2.5- Protection anodique

Cette protection consiste à appliquer et d'augmenter la tension à un certains PH du milieu pour atteindre la zone de passivation du métal à protéger. (Voir diagramme de POURBAIX). Elle est réalisée de la même façon que celle de la protection cathodique à courant imposé, la

différence est que cette fois-ci on injecte du courant pour augmenter le potentiel métal- milieu. Dans la pratique cette méthode est difficile à appliquer.

5.2.6 Protection géométrique

Cette protection consiste à concevoir les pièces et les montages mécaniques de telle sorte à limiter les risques de corrosion. Par exemple, il convient de :

Réaliser des courbes de collecteurs permettant un écoulement de fluide non turbulent (les turbulences étant en partie responsables des corrosions par cavitation et par érosion).

De disposer les anodes sacrificielles sur les zones critiques au développement de la corrosion.

Concevoir des récipients et des réservoirs ne favorisant pas la stagnation de l'eau

I.5.2.7 PROTECTION ELECTRO ANTI – FOULING

Ce type de protection consiste à libérer des ondes électriques, ou des ions à fort pouvoir antifouling autour de la structure à protéger. Pour empêcher la fixation des salissures marines.

Ce type de protection est plus utilisé sur la prise d'aspiration d'eau de mer et sur les faisceaux de réfrigérant immergé en eau de mer pour éviter la fixation des coquillages.

CONCLUSION DU CHAPITRE 1

De cette étude plusieurs points importants sont à retenir :

La corrosion des métaux peut se développer de diverses manières et prendre plusieurs formes. Elle devient plus complexe dans le milieu marin car plusieurs facteurs peuvent intervenir dans le processus.

Les installations marines du fait, de leurs matériaux de construction qui est majoritairement en acier sont sujet à diverses formes de corrosion. Ce qui permet un impact économique et environnemental si la corrosion n'est pas traitée efficacement.

Les moyens de lutte et de prévention sont nombreux. Ils concernent la protection par revêtement, par inhibiteurs chimique et par protection cathodique.

Pour mieux appliquer ces moyens de lutte à l'échelle de la coque d'un navire nous sommes amenés à faire une étude d'impact de la corrosion sur le remorqueur VB IMPALA.

CHAPITRE II : APPROCHE METHODOLOGIQUE

1 DEFINITION DU CADRE DE REFERENCE

Pour cette étude, le cadre de référence est le remorqueur VB IMPALA de la SOCIETE IRES filiale de BOLUDA France, dont les travaux en cale sèche ont inspiré la phase pratique de cette Etude sur la protection contre la corrosion des installations marines.

1.1 Présentation de la société IRES

Anciennement connue sous le nom de URA (Union des remorqueurs d'Abidjan) la compagnie IRES (Ivoirienne de remorquage et de sauvetage) est située dans les locaux de la capitainerie du port d'Abidjan. IRES est la compagnie de remorquage du port d'Abidjan et de San Pédro suite à l'autorisation de l'exploitation de la concession renouvelée en Avril 2012 pour 15 ans soit 2027. Elle est une filiale de BOLUDA France sise 10 place de Joliette les Docks Atrium 10. S 6^{ème} étage 13002 Marseille France. BOLUDA France est l'un des tous premiers operateurs portuaires présents dans les plus importants ports et terminaux de France, au Maroc, en Mauritanie, sur les côtes africaines et dans l'Océan Indien.

En effet, afin de soutenir son orientation stratégique de développement international, le groupe BOLUDA France met en œuvre un système de management de la qualité, de la santé, de la sécurité et de l'environnement sur l'ensemble de ses sites opérationnels. Cette démarche repose sur cinq engagements fondamentaux de la compagnie envers ses clients et s'articule autour de cinq axes stratégiques qui demeurent les lignes directrices qui doivent guider en permanence l'action de ses collaborateurs. Le groupe BOLUDA assure en plus du remorquage, le transport de conteneurs, la construction et la réparation navale.

“IRES”, représentant de BOLUDA en Côte d'Ivoire exploite plusieurs remorqueurs, vedettes d'amarrage et surfer sur les bassins portuaires d'Abidjan et de San Pédro.

C'est une société anonyme de droit ivoirien responsable de la gestion de la sécurité et de la protection de l'environnement selon les exigences du code ISM. L'IRES intervient dans le remorquage, le sauvetage, l'assistance dans les deux ports, la veille sécurité des navires

pétroliers à la SIR I et SIRII lors des opérations de chargement et de déchargement des produits pétroliers.

IRES intervient également dans l'affrètement des remorqueurs et de surfer pour des navires à ravitailler en eau, en vivre, en combustible, pour le débarquement et l'embarquement des équipements ou du matériel et assure d'autres prestations telles que le remorquage en haute mer, la prévention et la lutte contre l'incendie, la pollution ou tous autres sinistres. Comme toute compagnie bien organisée, IRES est dotée d'un plan hiérarchique bien structuré et qui bat le plein. (Voir annexe 01)

1.2 Description du remorqueur VB impala

Le VB IMPALA est un remorqueur de type ASD (Astern System Drive), il a été construit en 2001 au chantier naval DAMEN en Hollande, c'est un 3211 c'est-à-dire 32 m de long et 11 m de large.

Il a été conçu pour être un offshore TUG (remorqueur offshore). Il est propulsé par deux propulseurs Azimutaux Z- drive. Ces propulseurs sont entraînés par deux moteurs diesel de 9 cylindres en ligne de puissance chacune de 2030 KW.

Il était connu sous le nom de M/V KIANDA, il a été rebaptisé du nom de VB IMPALA par l'IRES après son achat avec le Groupe BOURBON en Février 2019. Le VB IMPALA bat pavillon SAINT VINCENT et GRENADINE (SVG)

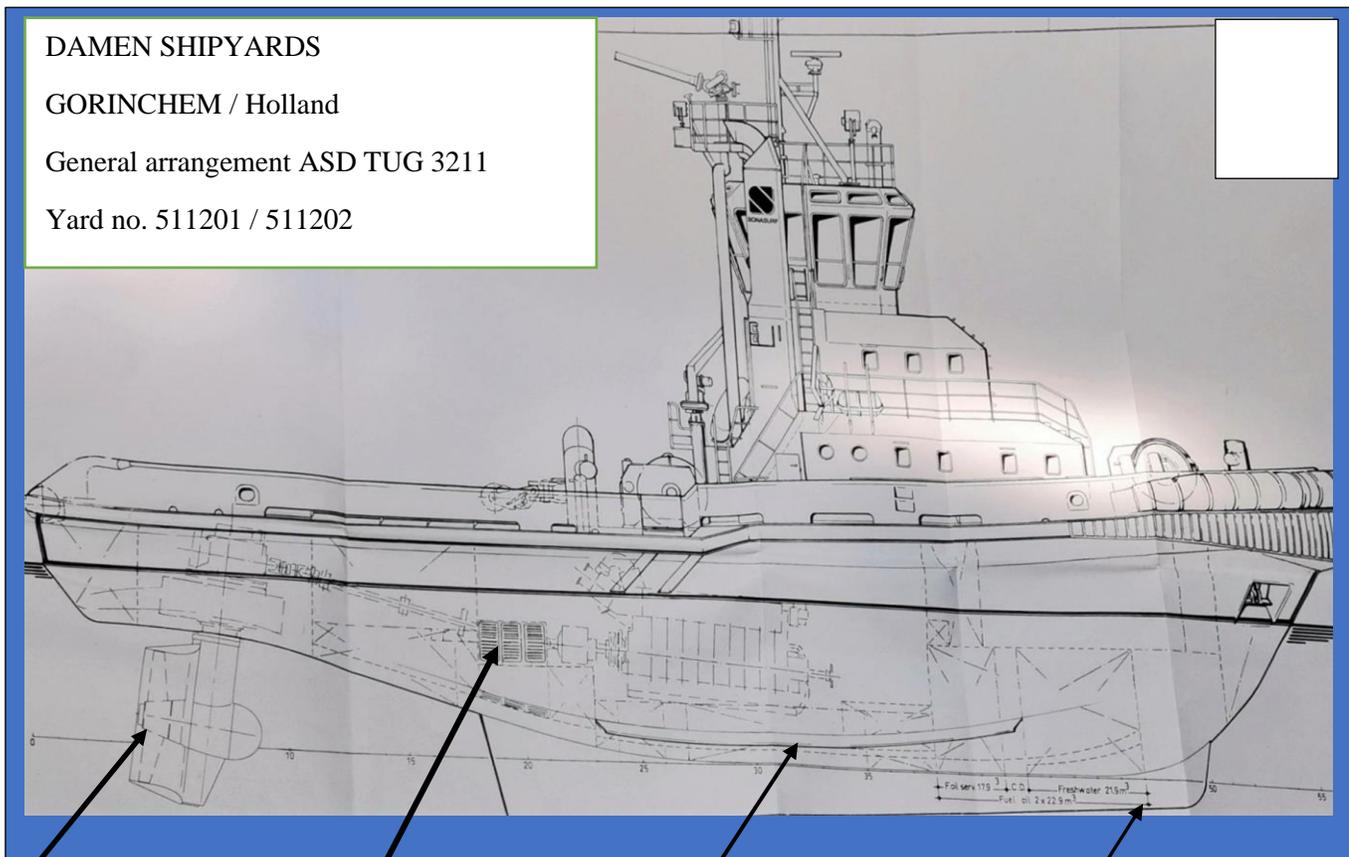


Fig.34 : REMORQUEUR VB IMPALA

1.2.1 Description des œuvres vives du VB IMPALA

Les œuvres vives d'un navire désignent l'ensemble des parties immergées, commençant par le dessus de la quille jusqu'à la ligne de flottaison.

Les œuvres vives du VB IMPALA sont constituées, d'une coque, de deux propulseurs azimuthaux Z-drive, des BOXCOOLER (voir fig. 36)



Propulseur

Boxcooler

Quille de roulis

Quille principale

Fig.35 Plan générale arrangement

- **La coque**

La coque d'un navire est l'ensemble des structures, généralement métalliques, qui répondent aux quatre fonctions suivantes : matérialiser la carène ; résister aux efforts en service (les éléments correspondants constituent la charpente) ; assurer la sécurité contre un envahissement

par l'eau et contre la propagation d'un incendie (les éléments correspondants constituent le compartimentage de sécurité) ; loger les appareils, équipements et installations nécessaires pour satisfaire au programme de navigation en sécurité. [I]

La coque du VB IMPALA est une coque en V modifié (coques ayant un fond plat à l'arrière qui prend progressivement la forme d'un V vers l'avant).

Elle comprend une quille principale et deux quilles de roulis.

Elle est en acier, elle représente la plus grande surface des œuvres vives.

Les tôles de bordé de fond et de bordé de muraille ont une épaisseur initiale de 14mm.

- **Propulseurs azimutaux z-drive**

C'est un propulseur capable de tourner sur lui-même soit 360°, la transmission de l'arbre est sous une forme en Z d'où le nom de Z-drive.

Les propulseurs du VB IMPALA sont constitués d'une hélice à pas fixe en bronze et une tuyère en acier destiné à augmenter la force propulsive.



Fig. 36 PROPULSEUR ASD

- **Boxcooler**

Un BOXCOOLER est un système de réfrigérant par des serpentins de cuivre plongés dans l'eau de mer ; Il est situé sur la coque au niveau des bordé de muraille Arrière. La réfrigération a lieu lorsque le navire est en déplacement : l'eau de mer entre par les prises d'eau inférieure du BOXCOOLER et ressort par les prises d'eau supérieure du BOXCOOLER en captant la chaleur du réfrigérant par conduction.

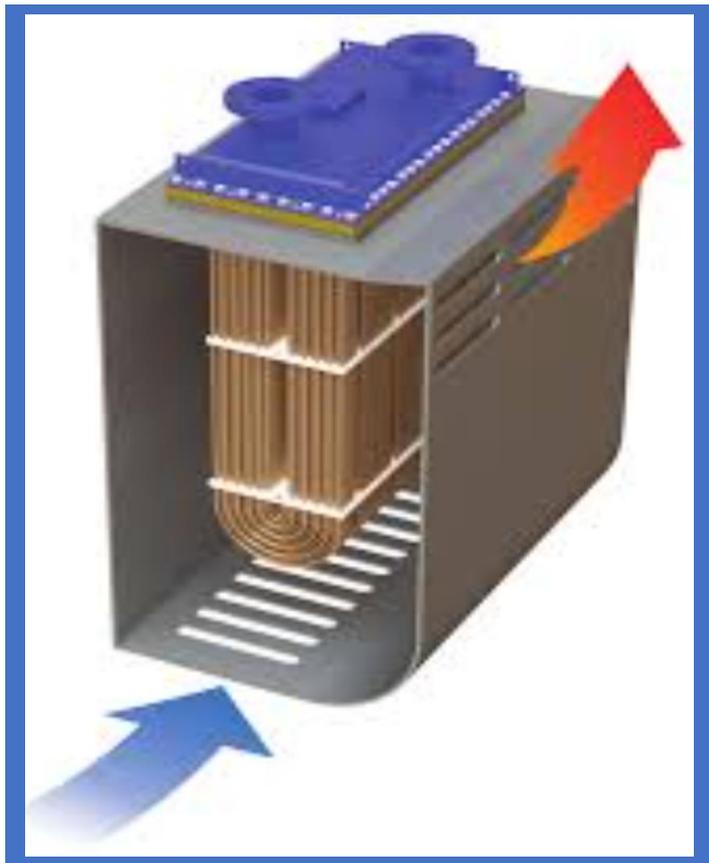


Fig.37 BOXCOOLER

1.2.2 Protection initiale chantier naval

Le VB IMPALA a été construit au chantier naval de DAMEN d'hollande.

Avec une coque en acier d'une épaisseur 14 mm, les protections mis en place à la construction sont :

- **Géométrique**
- **Cathodique :**

La protection cathodique utilisée est par anode sacrificielle de ZINC avec une répartition de 38 anodes de 12 Kg sur la coque et une répartition de 84 anodes de 10 Kg au niveau des propulseurs (voir Annex plan Anodes)

- **Par revêtement :**

Le revêtement utilisé est un revêtement organique avec application de quatre (4) couches de peinture différente (voir Annex Certificat Antifouling).

- **D'un système Electro Antifouling (ICAF) :**

Ce système a pour but de protéger les faisceaux du BOXCOOLER contre les salissures marines en polarisant des anodes en cuivre par un courant continu. Les anodes en cuivre ainsi polarisées libèrent des ions Cu^{2+} qui ont un très bon pouvoir antifouling. (Voir fig.38)

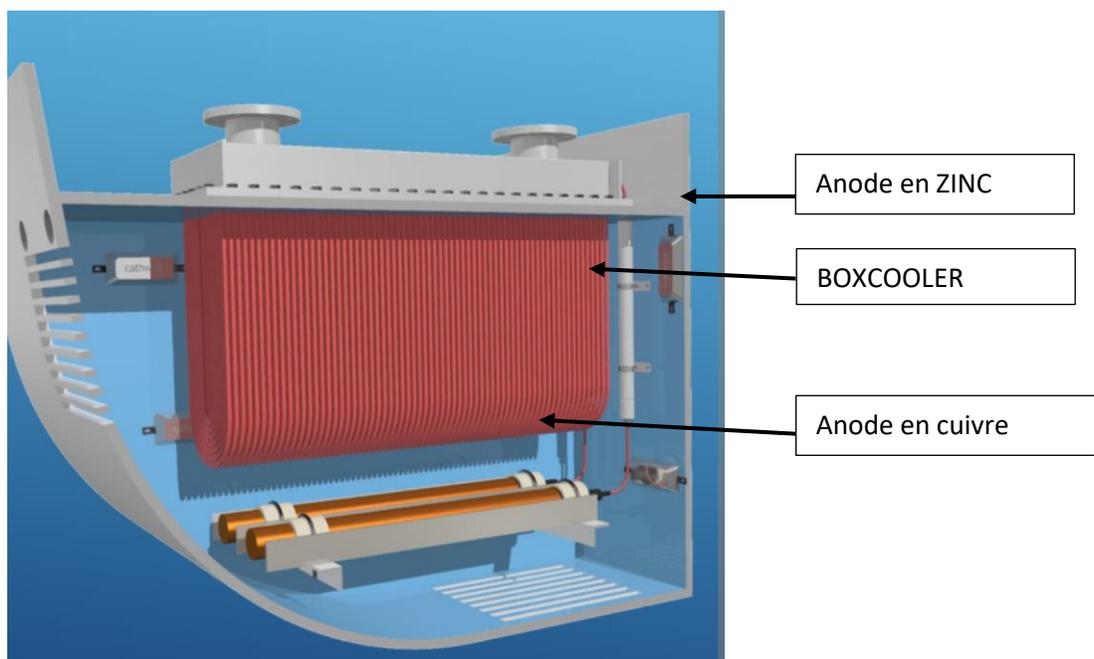


Fig.38 système antifouling par courant imposé de type ICAF

2-IMPACT DE LA CORROSION SUR LE VB IMPALA

Comme tous autres navires, le VB IMPALA est exposé aux phénomènes de la corrosion marine. Les impacts de la corrosion seront étudiés sur la coque du VB IMPALA particulièrement sur la carène qui est l'ensemble des œuvres vives.

Lors de l'inspection de la coque durant le dernier dry dock de Novembre 2020 à la CARENA, nous avons constaté les impacts de corrosion suivants :

- Présence de micro – organismes (salissures marines) sur toutes la coques.
- Corrosion par piqures avec perforations de bordé de fond à l'avant bâbord sur la tôle du tank à gasoil N°3.
- Une destruction presque totale des anodes sacrificielles
- Une destruction presque totale des anodes en cuivre du système electro antifouling
- Perforation par piqures des tôles des BOXCOOLER Td et Bd
- Cavitation au niveau des pâles des propulseurs Bd et Td.

Pour mieux illustrer ces dégâts, la présentation des photos suivie d'une interprétation est nécessaire.

2.1 Salissures marines



Fig.39 Vue d'ensemble de la coque

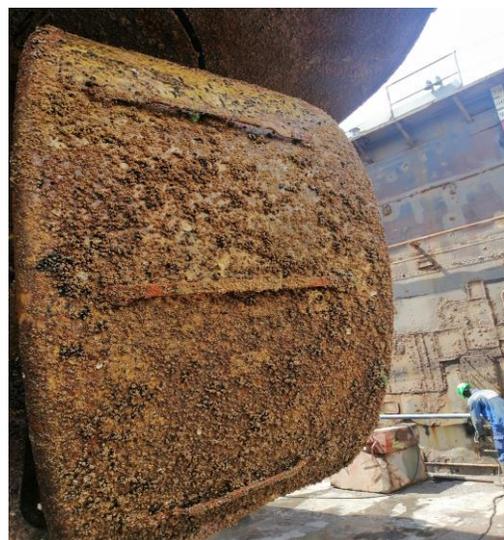


Fig.40 Tuyère de propulseur recouverte par les salissures marines



Fig.41 Faisceaux BOXCOOLER recouverts de coquillages



Fig.42 Propulseur recouvert de salissures marines

Commentaire : Fixation de salissures marines sur tout l'ensemble de la coque, sur les propulseurs et les faisceaux de BOXCOOLER. Ce qui a pour conséquences de favoriser :

- La bio corrosion,
- D'augmenter le poids du navire ce qui entraine la consommation en carburant.
- La diminution d'échanges thermiques au niveau des BOXCOOLER impliquant un mauvais refroidissement des MPX
- Une obstruction des prises d'eau de mer des pompes incendies causant un risque de réduction de l'efficacité des Pompes FIFI.

La fixation des salissures marines est causée par une perte de pouvoir de la peinture antifouling et aussi par une défaillance du système antifouling par courant imposé : Cela peut être dû à un non-respect des délais du temps de services de la protection Anti-fouling.

2.2 Piqure et perforation de coque



Fig.43 Piqures sur tôle de bordé de fond Avant Bd



Fig.44 Perforation de la coque avec fuite de gasoil

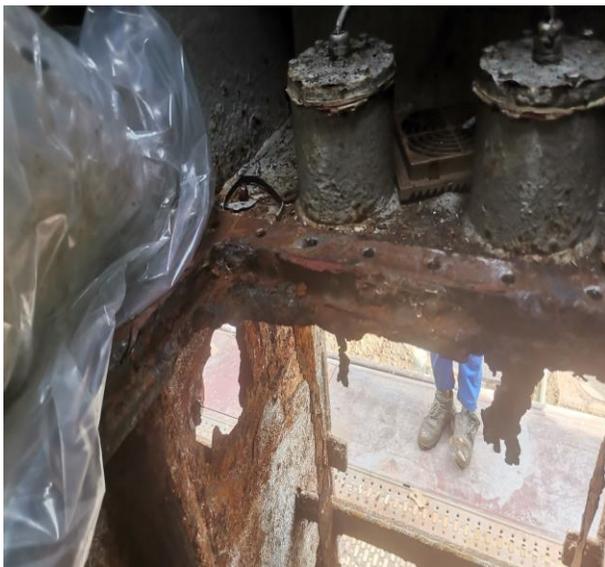


Fig.45 Perforation de la tôle d'au niveau des caissons BOXCOOLER



Fig.46 Piqures et présence de cavité sur la tôle des caissons des BOXCOOLER

Commentaires : C'est la forme de corrosion la plus dangereuse elle cause des voies d'eau et des risques de pollution marine. C'est une corrosion localisée (voir chapitre I page 17). Cette forme de corrosion peut -être dûe à un défaut métallurgique de l'acier, à une fuite de courant provenant du système ICAF ou par un effet de surprotection cathodique.

2.3 Erosion / Cavitation



Fig.47 Cavitation au niveau des bordures des pâles de l'hélice



Fig.48 Cavitation sur arbre Intermédiaire de transmission latérale du propulseur

Commentaire : La corrosion par cavitation et par érosion est la forme de corrosion la plus développée au niveau des propulseurs et des zones d'écoulement d'eau sous le navire.

La conséquence de la cavitation des propulseurs est ressentie par la vibration au niveau des propulseurs.

2.4 Surconsommation des anodes de protection



Fig.49 Anode sacrificielle en zinc consommée
Totalemt



Fig.50 Les anodes en cuivre du système
de courant imposée antifouling
totalement consommer

Commentaires : Les anodes en zinc et en cuivre du système antifouling par courant imposé sont totalement consommées cela peut se traduire à une forte demande en courant de protection causée par un défaut de peinture ou par des courants vagabonds (voir chapitre 1 Page 28). Elle peut être due à un non-respect du temps de services des anodes
Ce qui a pour conséquence les impacts présentés plus haut.

BILAN DU CHAPITRE 2

Les différents constats des impacts de la corrosion sur la coque du VB IMPALA à travers l'inspection de la coque lors du dernier Dry-dock de Novembre 2020. Il s'avère que, les impacts de la corrosion sur la coque du VB IMPALA sont très énormes et touchent différentes parties du navire, ceci a un coût de maintenance très élevé.

Les causes de cette corrosion peuvent être dues :

- Au non-respect des durées de vie des systèmes de protection (temps de carénage)
- À une défaillance du système de protection Electro antifouling ICAF.
- Par une fuite de courant électrique, dû à un défaut d'isolement, une interférence électrique avec d'autres navires (corrosion par courant vagabond)

Ces impacts de la corrosion sur le VB IMPALA suscitent une étude approfondie, pour comprendre et proposer une procédure de surveillance, de lutte et de prévention contre la corrosion sur la coque du VB IMPALA.

Cette procédure sera fondée sur les normes internationales de lutte contre la corrosion.

CHAPITRE III : APPROCHE TECHNOLOGIQUE

1 INTRODUCTION

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

Pour ce faire nous allons exposer des technologies de lutte et de prévention données par les normes internationales sur la protection des structures immergées en milieu marin : « La coque ».

Et proposer une méthode de mesure du potentiel de protection contre la corrosion afin d'optimiser la prévention de la corrosion sur la coque du VB IMPALA.

A cet effet les normes sur laquelle nous nous baseront pour faire des propositions sont:

- La norme ISO 12473 second Edition 2017 Principes généraux de la protection cathodique en eau de mer.
- La norme canadienne sur les peintures et les revêtements
18-080-000-SG-003 (anciennement MPO/5884 et TP 12445F)
Deuxième édition – mars 1999 Révisé – 06 juin 2002.

Ces normes définissent le type de protection adapté contre la corrosion des coques des navires à savoir la protection cathodique et la protection par revêtements organiques.

2 PROTECTION D'UNE COQUE CONTRE LA CORROSION

2.1 Protection cathodique (PC)

La norme ISO 12473 définit la protection cathodique comme : Une technique de « protection active » contre la corrosion d'un matériau métallique au contact d'un électrolyte (milieu aqueux

conducteur ionique comme les eaux, les sols, le béton). Il s'agit d'un système de prévention électrochimique basé sur la diminution du potentiel de corrosion jusqu'à un niveau où la vitesse de corrosion du métal est réduite de manière significative. La protection cathodique est obtenue par l'application d'une tension capable de fournir un courant cathodique suffisant à la surface métallique pour diminuer son potentiel à un niveau correspondant à une vitesse de corrosion résiduelle suffisamment faible pour l'application concernée.

Cette méthode est réalisée par des anodes sacrificielles, par courant imposé ou par protection hydride (combinaison de protection par anodes sacrificielles et courant imposé).

Le choix du type de protection dépend du potentiel à atteindre sur la surface du métal que l'on veut protéger. Dans les milieux électrolytiques naturels comme les sols ou les eaux, une protection cathodique est efficace si le potentiel réel de l'acier au carbone (hors chute ohmique dans l'électrolyte entre la position de l'électrode de référence et la surface du métal) est plus négatif que -850 mV par rapport à une électrode au cuivre/sulfate de cuivre saturé, ce qui équivaut à -780 mV (généralement arrondi à -800 mV) par rapport à une électrode Ag/AgCl/eau de mer.

Pour la protection à anodes sacrificielles le choix se fait selon le type d'anodes.

Pour le système à courant imposé, elle est mise en place par un générateur de courant continu et des Anodes d'injection.

2.1.2 Critères de la protection cathodique par anodes sacrificielles (PCAS)

- **CHOIX D'ANODES SACRIFICIELLES**

Il existe plusieurs types d'anodes dont les caractéristiques et les applications sont différentes. Le tableau 3 résume les principales caractéristiques (valeurs typiques) des anodes les plus utilisées, avec les avantages et inconvénients de chacune.

Dans le cas de la protection de l'acier, les anodes utilisées sont à base de zinc, d'aluminium ou de magnésium.

- Le zinc a été le premier métal à être utilisé régulièrement pour la protection cathodique, sous forme d'alliage. De récents efforts ont été fait pour le rendre plus efficace et il reste l'alliage

le plus utilisé par les marines, que ce soit militaire ou marchande. Ses performances dépendent surtout du milieu dans lequel l'anode sacrificielle va travailler ainsi que le pourcentage d'impuretés qu'elle comporte.

- Le magnésium est léger et possède une consommation volumique élevée, le rendant moins attractif que les 2 autres. Cependant il possède un potentiel de corrosion en eau de mer plus électro-négatif qui permet une polarisation rapide des structures pour une durée de vie faible (1 à 2 ans). Ce potentiel très négatif peut par contre provoquer des décollements de revêtements de surfaces, ce qui exclut son utilisation en eau de mer. Il reste utilisable en eau douce et donc pour la marine fluviale.

- L'aluminium peut avoir des rendements relativement pauvres.

Des recherches ont conduit à l'allier à d'autres espèces pour augmenter ce rendement. Des alliages avec de l'indium existent pour dépasser l'alliage formé qui naturellement se passive en haut de mer et donc ne se corrode pas bien (ce qui est répréhensible pour une anode sacrificielle). Ses principaux avantages sont alors un faible coût et une masse volumique intéressante ainsi qu'une distribution de courant résultante uniforme. Les navires de marine marchande sont souvent munis de ce genre d'anodes, ainsi que les plateformes offshore, les pipelines.

	Anode à base de zinc	Anode à base d'aluminium à l'indium	Anode à base de magnésium
Potentiel en charge (V)	-1 à -1,05 en eau de mer -1,10V à terre	-1,05	-1,4 à -1,5 (type standard) -1,6 à -1,7 (type haut potentiel)
Capacité pratique (Ah/Kg)	780 en eau de mer 740 à terre	2600	1100 (type standard) 1230 (type HP)
Consommation pratique (Kg/A.an)	11,2 en eau de mer 11,9 en terre	3,4	6.5 à 8
Rendement électrochimique (%)	95 en eau de mer 90 à terre	87	55
Application	Conduites enterrées de faible longueur Ouvrages immergés Capacités métalliques (intérieur ou extérieur) Réservoirs sous talus	Plates-formes offshore ▪ Conduite offshore chaude ▪ Capacité métalliques (intérieur)	Conduites enterrées sur de faibles longueurs ▪ Conduites offshore sur plusieurs Km à partir des plates-formes ▪ Pré polarisation d'ouvrages offshore permettant de réduire la quantité d'anodes d'aluminium devant prendre le relais ▪ Réservoirs sous talus
Avantages	Potentiel bien adapté à la protection des structures compactes en eau de mer ▪ Comportement sûr dans les conditions diverses de fonctionnement (sol, eau de mer, vase, milieux confinés) ▪ Excellent rendement ▪ Peu sensibles aux salissures marines	Coût de l'A/an le plus faible (forte capacité pratique) ▪ Potentiel bien adapté à la protection des structures complexes en eau de mer ▪ Utilisation possible dans les citernes des tankers (pas d'étincelle en cas de chute) ▪ Reste active aux températures élevées avec toutefois une chute du rendement	Protection des structures compactes en eau de mer ▪ Comportement sûr dans les conditions diverses de fonctionnement (sol, eau de mer, vase, milieux confinés) ▪ Excellent rendement ▪ Peu sensibles aux salissures marines ▪ Coût de l'A/an le plus faible (forte capacité pratique) ▪ Potentiel bien adapté à la protection des structures complexes en eau de mer ▪ Utilisation possible dans les citernes des tankers (pas d'étincelle en cas de chute) ▪ Reste active aux températures élevées avec toutefois une chute du rendement ▪ Portée élevée (fort potentiel) ▪ Polarisation rapide de la structure (précipitation du dépôt calco-magnésien en eau de mer) ▪ Faible poids spécifique
Inconvénients	Portée limitée (faible potentiel) ▪ Température d'utilisation limitée à 60 °C ▪ Coût A/an ▪ Poids spécifique élevé	Moins adaptée dans les milieux faiblement renouvelés (chute de rendement en cas d'acidification du milieu) ▪ Vulnérable aux salissures marines ▪ Déconseillé pour la protection des ouvrages entièrement peints car il y a risque de passivation si l'anode n'est que faiblement sollicitée.	Force électromotrice parfois surabondante pour la protection en eau salée (surconsommation, risque de cloquage de la peinture) ▪ Faible durée de vie (remplacement fréquents nécessaires) ▪ Rendement médiocre en eau de mer ▪ Coût de l'A/an le plus élevé

Tableau 3 Avantages et inconvénients des différentes Anodes [J]

Pour protéger efficacement une structure et à fortiori un navire, il faut pouvoir calculer un nombre adéquat d'anodes sacrificielles à répartir. Ce nombre permet de déterminer la durée de vie du système de protection PCAS.

La durée de vie est donnée par la formule :

$$t = \frac{Pu}{C.I} \quad [M]$$

t : durée de vie de l'anode en année

P : poids net de l'anode en kg

C : consommation massique pratique en kg/A. Année

I : débit nominal de l'anode

u : coefficient d'utilisation en % (en pratique u est 90%)

La valeur de I est déterminée par la densité du courant du milieu en fonction de la surface en m² (voir tableau 6)

Milieu électrolytique	Densité de courant
Sols :	
a) sol sec	10 mA/m ²
b) sol humide agressif	jusqu'à 30 mA/m ²
Acier enrobé de béton :	0,1 mA/m ² (prévention)
a) béton de bonne qualité	1 mA/m ²
b) béton dégradé	10 mA/m ² (curatif)
Eaux douces :	
a) eau froide en mouvement	150 mA/m ²
b) eau chaude aérée	50 mA/m ²
Eau de mer	60 à 220 mA/m ²
Fonds marins	25 mA/m ² (initial) 20 mA/m ² (maintien)

Tableau 4 Dimensionnement des densités de courant en pratique [J]

2.1.2 Critères de la protection cathodique à courant imposé (PCCI)

- **Principes d'installations d'un système à courant imposé (PCCI) sur la coque d'un navire**

Pour réaliser de telles protections, il faut disposer de matériaux qui ne s'oxydent pas naturellement dans l'eau de mer ou par couplage galvanique.

Le matériau de ces anodes doit donc avoir un potentiel de corrosion élevé. Le platine qui a un potentiel de corrosion de 0,2 V dans l'eau de mer. Ce matériau est fréquemment utilisé pour réaliser de telles anodes mais il est également possible de prendre du carbone, de l'argent, de l'or (qui a cependant tendance à ternir) ... Les anodes en platine sont souvent proposées sous forme de tige dans le domaine naval, mais il est possible de l'utiliser sous d'autres formes, par exemple en grille.

Son implantation dans le cas d'un navire est relativement simple, il suffit de disposer à l'intérieur de la structure un générateur de courant continu, dont la borne négative doit être reliée à l'acier de la coque susceptible d'être mise à nu, la borne positive étant reliée à l'anode active (également connectée à la coque en acier et non pas à la peinture comme pourrait le faire croire la figure suivante). Un navire en possède quelques paires, souvent trois ou quatre, chaque électrode possédant sa propre alimentation pouvant délivrer des courants différents. En effet, selon la zone d'application, la quantité de courant à fournir n'est pas la même : la partie arrière du navire a besoin de beaucoup de courant car les hélices de propulsion en collecte beaucoup. Le fonctionnement d'une anode active peut être schématisé de la façon

Suivante : (voir figure 53)

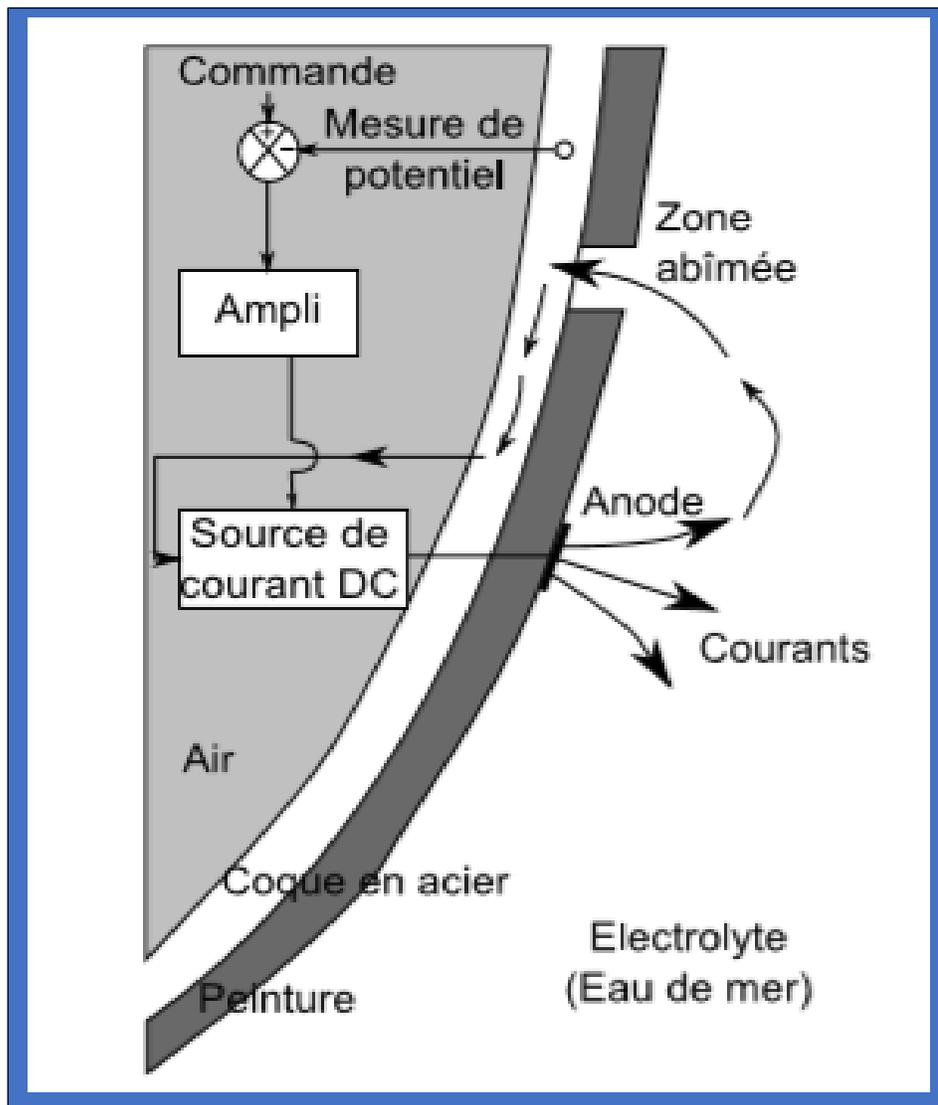


Fig.51 PCCI SUR UN NAVIRE [D]

Un courant sera injecté de ces dernières comme présenté dans la figure 53. La quantité de courant injectée sera proportionnée en fonction des potentiels mesurés régulièrement le long de la carène via des électrodes de mesure couplées à des électrodes de référence en argent, le plus souvent. L'idée est de Maintenir l'acier de carène à une valeur comprise entre $-0,75$ VECS et -1 VECS et autre matériau sous polarisation cathodique. Dans ces Conditions les réactions prédominantes sont cathodiques et le processus de Corrosion est fortement ralenti.

2.1.3 Choix de système à protection cathodique

Quoique l'utilisation d'un système de protection cathodique est toujours bénéfique, la sélection du système à adopter demeure généralement assujetti à des conditions environnementales,

énergétiques et économiques. À cet égard, une étude comparative doit être établie afin de mettre en relief les avantages et les inconvénients de chacun des systèmes de protection. A ce titre le tableau 7 nous donne un aperçu sur les éléments comparatifs en question.

	ANODE SACRIFICIELLE	SYSTEME A COURANT IMPOSE
Complexité de l'installation	Simple	Complexe
Source d'énergie	Non nécessaire	Nécessaire
Distribution du courant sur la structure	Homogène	Parfois hétérogène
Poids de la structure	Importante surcharge en poids pour une longue durée de vie	Peu d'accroissement
Influence de la résistivité du milieu	Non envisageable si la résistivité du milieu est trop grande	Pas de difficulté
Débit par anode	Faible	Elevé
Nombres d'anodes	Important	Faible
Facilite d'adapter le courant consommé en fonction de la demande	Adaptation possible à travers une liaison résistante	Adaptation facile
Risque de surprotection	Pratiquement aucun	Possible
Interférence avec d'autres structures	Non	Possible
Risques humains	Non	Possible
Surveillance	Aisée occasionnelle	Surveillance fréquente requise par un spécialiste
Domaine d'emplois	Ouvrages immergés (navire, bouée etc. ...) Conduite à faible distance Capacité métalliques (ballaste d'eau de mer)	Navires Plateforme offshore Conduite offshore chaude Structure immergée ou complexe située en profondeur

Tableau 5 comparaison de système de protection cathodique

2.1.4 – Inconvénients et facteurs influençant la Protection cathodique

Bien qu'efficaces, ces techniques de protection cathodiques sont cependant

énergivores et coûteuses en maintenance. Effectivement, les anodes sacrificielles demandent un renouvellement plus ou moins rapide selon les conditions environnementales. Concernant La PCCI, si elle n'est pas correctement appliquée, outre la consommation d'énergie, elle peut endommager la peinture par sur-polarisation. La norme ISO 12473, fixe pour le potentiel de la Carène une valeur comprise entre -0,75 VECS et - 1 VECS pour garantir une protection suffisante. Au-delà de -1 VECS, la réaction de réduction de l'eau devient prédominante. Par conséquent un risque de fragilisation des peintures par délamination peut être rencontré, avec la libération de dihydrogène entre la peinture et l'acier de carène.

L'efficacité d'un système de protection cathodique appliquée sur la coque d'un navire donnée peut-être réduite par certains facteurs mécaniques, physiques et environnementaux qui se manifestent sous différentes formes :

- Insuffisance de continuité électrique.
- Perte d'adhérence des revêtements sur la conduite à protéger.
- Influence des structures adjacentes.
- Influence des courants vagabonds (courant continu et courant alternatif)

2.2 Critères de la protection par revêtement organique

On applique de la peinture dans le but de protéger et de décorer les surfaces. Le succès de toute application de peinture dépend d'un certain nombre de paramètres, notamment la préparation de la surface, l'épaisseur du feuillet, les conditions pendant l'application et les méthodes d'application. Une bonne peinture doit être respectueuse de l'environnement.

La norme canadienne sur les peintures et les revêtements 18-080-000-SG-003 (anciennement MPO/5884 et TP 12445F) Deuxième édition – mars 1999 Révisé – 06 juin 2002 ; la présente norme a été préparée par la Garde côtière canadienne, Pêches et Océans Canada, Ottawa.

Nous fournir des spécifications de base sur l'utilisation des peintures et des revêtements sur les navires.

A cet effet elle nous indique :

- Les technologies de nettoyage de surface métallique à peindre
- Le système de revêtement à appliquer, l'ordre d'application de la peinture et le nombre de couches en fonction de structures à peindre (nouveau navire ; d'ancien navire)
- Compatibilité de la peinture au système de protection cathodique
- Les conditions environnementales d'applications.

2.2.1- Préparation de surface

La préparation d'une surface dépendra de l'état souhaité de la surface du métal à peindre (présence de salissures marine, degré de corrosion, état de l'ancienne peinture). Elle consiste à rendre une surface selon des étalons internationaux (voir tableau 8) Pour ce faire nous avons :

- **Le nettoyage, le décapage au jet hydraulique :**

Ce procédé consiste à nettoyer ou à décaper la surface de la coque avec de l'eau à moyenne pression (68 à 680 bars) à haute pression (680 à 1700 bars) et très haute pression (2000 à 2500 bars). Ce procédé est plus utilisé pour nettoyer les salissures marines sur la coque, la contamination de la coque (huile, poussière, sel ...). Décaper la rouille et l'ancienne peinture. Le décapage à jet hydraulique est la méthode la plus utilisée dans le chantier naval à ciel ouvert.

- **Le décapage au jet abrasif**

Le décapage au jet abrasif consiste à décaper la surface de la coque avec un jet de sable (sablage) soit avec de la grenaille (grenailages : particules de cuivre ou de fer etc. ...). Ce jet abrasif est projeté sur la surface à décaper par systèmes d'air comprimé haute pression bien sec et exempt d'huile.

En fonction du type de décapage nous pouvons avoir :

- Un balayage léger : Un décapage rapide au jet balayant nettoiera la surface de toute contamination ou des revêtements non adhérents. Il peut servir à mordancer la surface d'un revêtement dur et résistant afin d'améliorer l'adhérence de la couche suivante. Une corrosion

superficielle, comme celle qu'on retrouve sur l'acier apprêté en usine qui a vieilli, répond également bien à ce type de traitement, mais la corrosion ancrée plus profondément n'est pas enlevée. Lorsque cette corrosion est présente, un « décapage au jet complet » selon l'étalon Sa2½ est le plus approprié lorsque la surface de peinture à traiter ne doit pas être détruite [grenailles ou grains de sable compris entre 0,2 et 0,5 mm

- Un balayage lourd : L'ancien revêtement doit être enlevé jusqu'à la peinture primaire d'atelier ou jusqu'à l'acier nu. Le degré de préparation de surface de l'acier exposé peut varier mais tous les degrés sont quand même acceptables à condition que la rouille ait été enlevée. Les considérations relatives à la grosseur des particules sont les mêmes que dans les sections ci-dessus portant sur le décapage et sur le grenailage.

- **Nettoyage manuel et mécanique :**

Ce procédé est plus utilisé pour la préparation de petite surface, elle consiste à gratter une surface par des grattoirs, ou à poncer avec des brosses rotatives ou par des ciseaux mécaniques.

SYSTÈME	AMÉRICAINS	SUÉDOIS	JAPONAIS
Nettoyage au solvant	SSPC-SP1		
Ponçage manuel	SSPC-SP2	St2 (approx.)	
Ponçage mécanique	SSPC-SP3	St3	PT2
Nettoyage à la flamme (acier neuf)	SSPC-SP4		
Décapage au jet blanc	SSPC-SP5	Sa3	Sd3 et Sh3
Sablage commercial	SSPC-SP6	Sa2	Sd1 et Sh1
Décapage au jet effleurant	SSPC-SP7	Sa1	Ss
Dérochage	SSPC-SP8		
Décapage au jet à demi-blanc	SSPC-SP10	Sa2½	Sd2 et Sh3
Ponçage mécanique à blanc	SSPC-SP11		PT3

Tableau 6 étalons de préparation des surfaces [K]

2.2.2 Types de revêtements recommandés

Le types et le choix du revêtement dépendra de la surface à peindre (œuvres vives ou œuvres mortes), la nature du métal (acier, Aluminium etc. ...) ; de la zone navigation (océan glaciale, océan tropicale etc. ...) voir annexe 5 et 6

Pour une coque en Acier pour tout type de navire qui navigue en océan tropical cette norme nous recommande les peintures suivantes :

- **1ere couche (primaire) :**

RREPHRA : Revêtement Aux Résines Epoxydiques Pures À Haute Résistance À L'abrasion.

RARVASG : Revêtement Anticorrosion Aux Résines Vinyliques Et À L'aluminium, Sans Goudron.

RRÉP : Revêtement Aux Résines Époxydiques Pures

- **2^{eme} couche (Intermédiaire) :**

RREMV : Revêtement Aux Résines Epoxydiques Modifie Au Vinyle,

- **3^{eme} couche et 4^{eme} (Finition) :**

PAPDC : Peinture Antisalissure (anti – fouling) De Type Polymère À Déplétion Contrôlée (Sans TBT)

2.2.3 Choix de revêtement en fonctions du type de protection cathodique

L'un des effets secondaires de l'association d'un revêtement à un système de protection cathodique est la formation d'alcalis sur la surface cathodique. Ce phénomène se produit dans des conditions normales de protection cathodique et est accentué lorsqu'il y a une surprotection (c.-à-d. des potentiels plus négatifs que 900 mV). Lorsque le système de peinture est inadéquat ou que le potentiel est trop élevé, les alcalis causent une saponification et une dégradation des revêtements. Un cloquage par électro-osmose est alors fréquent.

Il est donc essentiel d'être sélectif dans le choix du revêtement. Les différents systèmes disponibles sont énumérés ci-dessous ainsi que leurs applications possibles. Il faut se rappeler que des endroits comme la bande de flottaison et la partie inférieure des hauts peuvent être affectés par la protection cathodique, tout comme le fond.

<ul style="list-style-type: none"> ▪ Peintures à base de résines alkydes, d'ester époxydique, d'oléorésines et de résines similaires 	<p>Ces revêtements contiennent des huiles ou des acides gras qui sont saponifiables (c.-à-d. qui peuvent se combiner aux alcalis). Pour cette raison, ils ne sont pas recommandés sur la bande de flottaison, sur la partie inférieure des hauts ou sur les fonds, quel que soit le type de protection cathodique.</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Revêtements à l'aluminium bitumineux, au caoutchouc chloré, aux résines vinyliques avec goudron et aux résines vinyliques 	<p>Ces revêtements sont parfaitement compatibles avec les systèmes à anode de zinc et d'aluminium, ainsi qu'avec la protection cathodique à courant appliqué (sauf à proximité de l'anode de courant appliqué), à condition que l'épaisseur du feuil sec appliqué soit suffisante. Avec les anodes au magnésium, un système aux résines époxydiques avec goudron de houille est recommandé.</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Systèmes aux résines époxydiques ordinaires, modifiées aux hydrocarbures ou combinées au goudron de houille 	<p>Ces systèmes ont probablement la plus haute résistance à la protection cathodique et sont parfaitement compatibles avec les systèmes à courant appliqué et à anodes sacrificielles.</p>

Tableau 7 choix de revêtement en fonction du système de protection cathodique [K]

2.2.4 Conditions environnementales d'application

L'application d'une bonne peinture dépend aussi des conditions suivantes :

Humidité de la surface, température de la surface, température de l'air, du degré hygrométrique. La meilleure condition pour réaliser est avec un degré hygrométrique inférieur à 70 %.

3- MISE EN PLACE D'UN SYSTEME DE MESURE DE POTENTIEL DE PROTECTION

3.1 INTRODUCTION

Les fuites de courant de quai, les mauvais isolements à bord, l'interférence électrique entre d'autres structures métalliques le cas d'un navire remorqué qui présente un défaut d'isolement. Influence d'une manière négative la protection contre la corrosion (combinaison d'une protection par revêtement et d'une protection par anode sacrificiel) du VB IMPALA.

Cette influence entraîne :

- Une surconsommation des anodes sacrificielles.
- Un décollage de revêtement par phénomènes de surprotection.

Elle aura pour conséquence de détruire plus rapidement la protection dans un délai inférieur à la durée de vie du système de protection définie par les constructeurs.

La surveillance dans le temps du système de protection nous permettrons d'anticiper les dégâts importants de la corrosion sur le VB IMPALA.

Cette surveillance sera réalisée par la mise en place d'un système de mesure de potentiel de protection qui consiste à choisir le matériel adapté pour la mesure d'un potentiel de protection et analyser les résultats avec les potentiels de protection donnée par la norme ISO 12473.

3.2- Présentation d'influences électriques d'une protection cathodique

➤ Influence d'un courant de fuite (cas d'une liaison prise de terre commune)

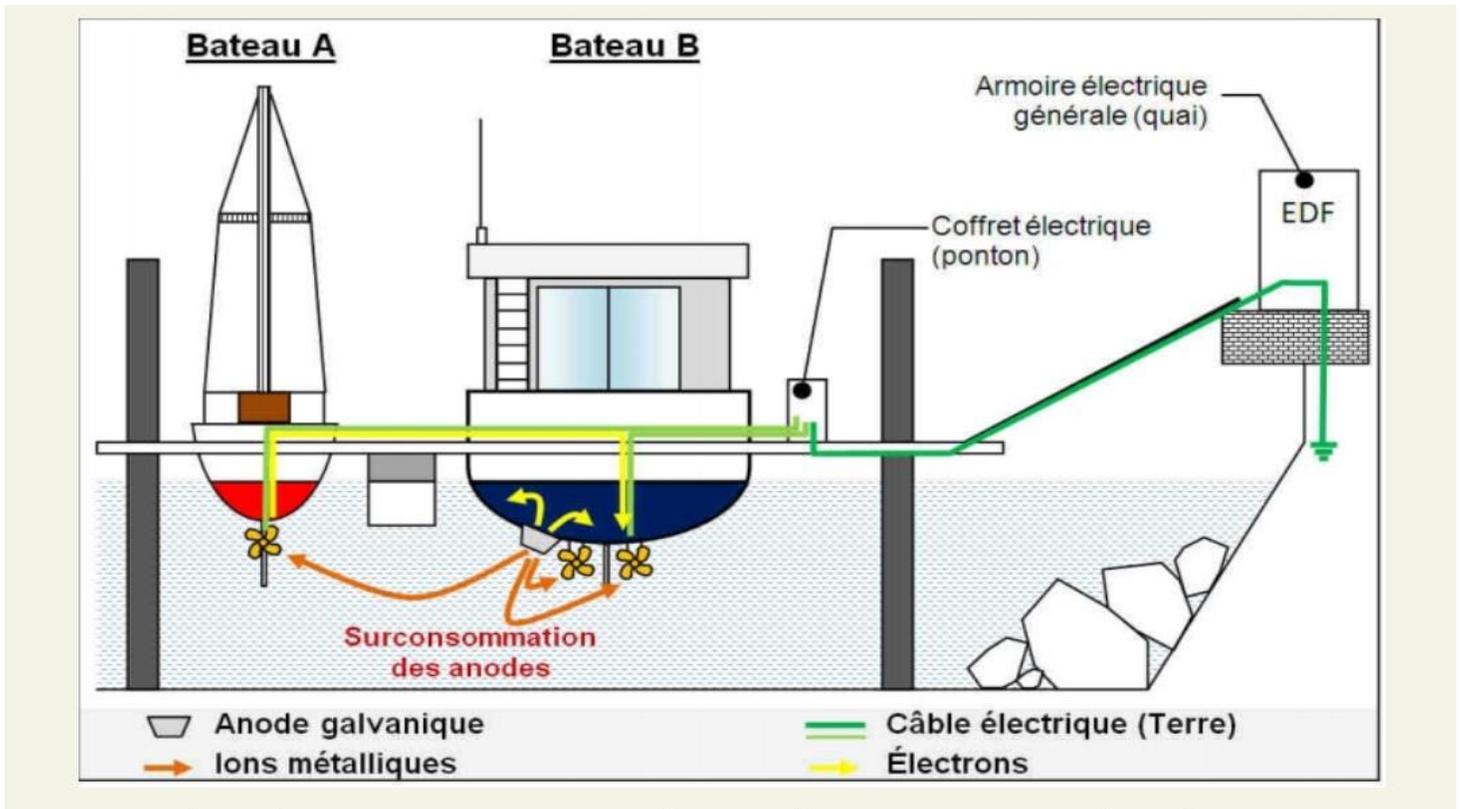


Fig. 52

Interprétation : La prise de terre commune à tout le ponton protège les usagers de port de l'électrocution mais en contrepartie relie chaque bateau à son voisin. Le bateau le mieux protégé du ponton (Bateau B) protège les autres bateaux et voit donc une surconsommation des anodes.

➤ Influence d'un courant de fuite (cas de d'un navire qui propage un courant de fuite)

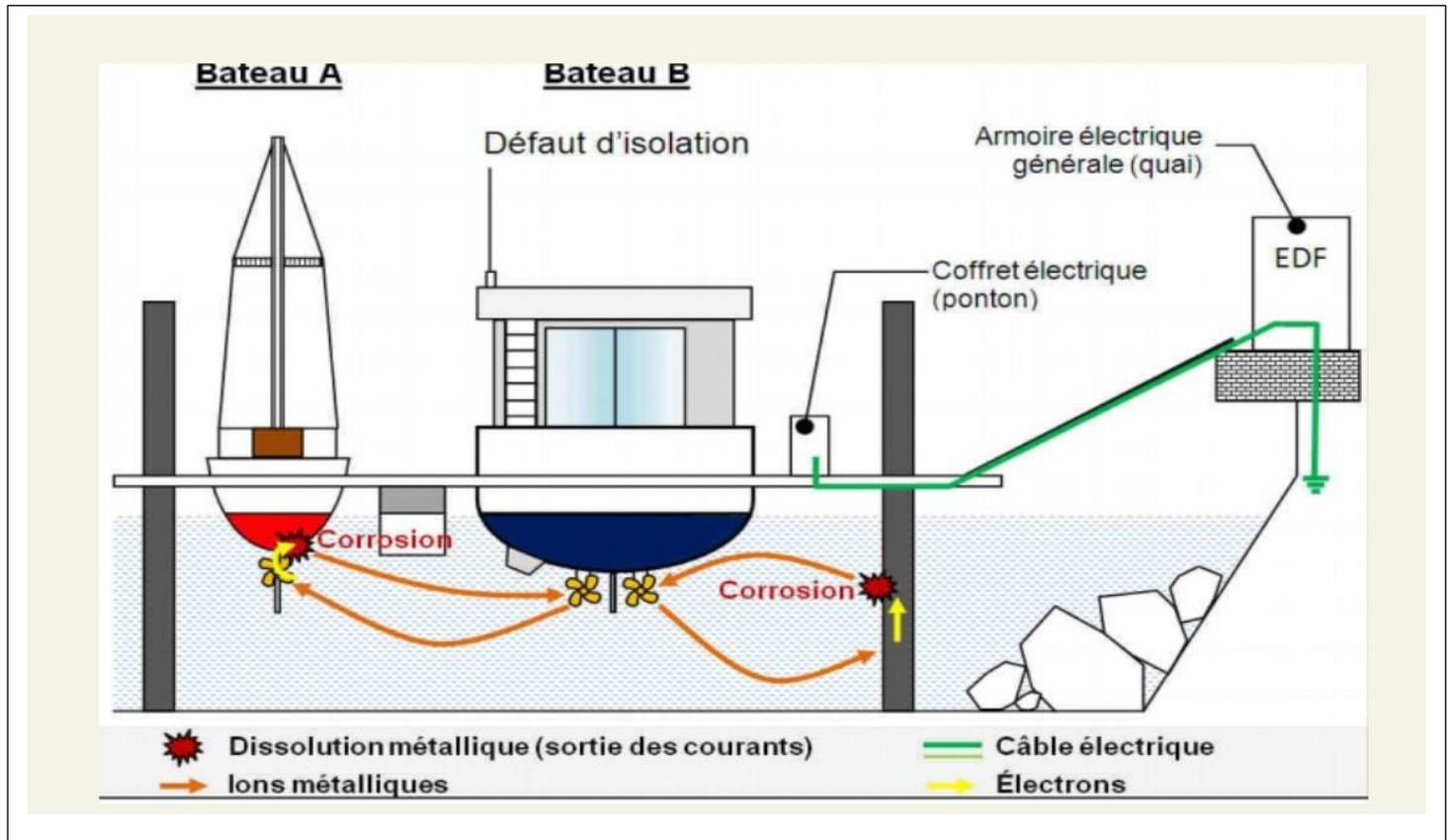


Fig.53

Interprétation : Le courant de fuite continu est causé par un défaut d'isolation du bateau B, ce qui provoque la circulation d'un courant parasite dans l'eau de mer puis dans le bateau A et ou dans une structure métallique du port : une corrosion anormale se produit alors là où sortent les courants

Ce cas peut être observé lorsque a minima l'un des bateaux est isolé électriquement du ponton
Ce cas peut être aussi observé lors des opérations de remorquage d'un remorqueur d'IRES et d'un navire à service.

Si ce navire présente un défaut d'isolement avec propagation de courant de fuite dans l'eau de mer ;

Cette fuite influencera la protection du remorqueur en agissant sur le potentiel de protection.

3.3 DEFINITION POTENTIEL DE PROTECTION

Lorsqu'on mesure le potentiel d'un métal qui se corrode (s'oxyde) on obtient une valeur **E_{corr}** appelée potentiel de corrosion.

Quand il y'a plus de corrosion (équilibre) le potentiel mesuré **E_{eq}** appelé potentiel d'équilibre. En effet ce potentiel d'équilibre est un potentiel de protection appelé **E_{pro}**.

Il est défini par l'équation de **NERNST** : **E_{pro} = E° + $\frac{RT}{nF} \ln.10^{-6} \text{ (mol/l)}$** à 25°C

E° : Potentiel standard donnée par l'électrode d'hydrogène

R : constante de gaz

T : température en Kelvin

F : Nombres de faraday

n : Nombres d'électrons qui participent dans la réaction.

L'équation de **NERNST** s'applique à une réaction d'électrode à l'équilibre. Elle sert à calculer son potentiel standard en fonction des activités et de la température.

Cette loi permet aussi de tracer le diagramme pH – Tension appelée diagrammes de **POURBAIX**.

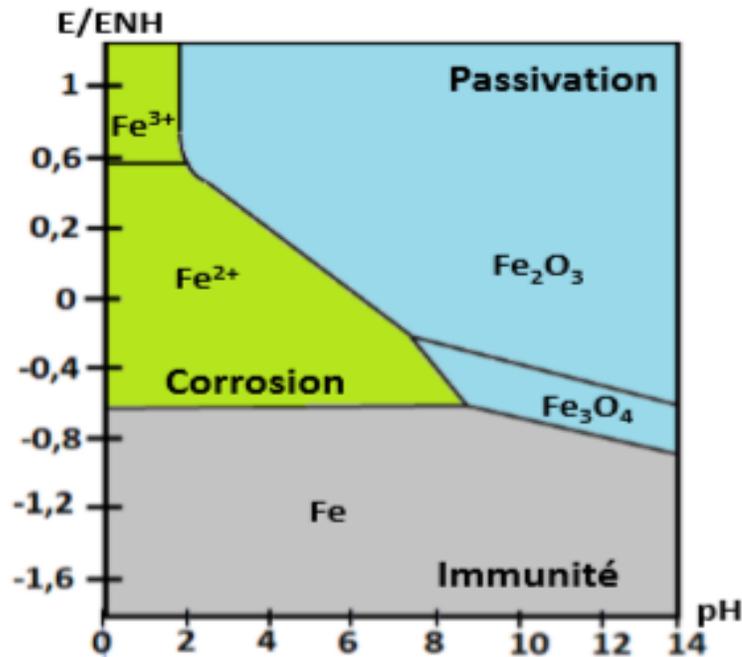


Fig.54 : DIAGRAMMES DE POURBAIX Fe / H₂O à 25°C

D'après ce diagramme le potentiel de protection du fer pour une électrode référence d'hydrogène est **E_{pro} ≤ - 0.67 V**

Le potentiel de corrosion est **E_{corr} ≥ -0.67 V** pour un PH compris entre 1 et 8

Cette valeur de potentiel d'équilibre 0.67 V varie en fonction du milieu (terre, eau de mer ...) et de l'électrode de référence.

Dans la pratique si **E_{pro}** est très importante on parle de surprotection, elle aura pour conséquences de décoller la peinture dans le cas d'une protection par revêtement.

La norme ISO 12473 nous donne des valeurs de potentiel de potentiel en fonction des Électrodes de référence usuelle (Ag /AgCl⁻ en de mer ; Cu/Cu-SO₄ sol).

METAL		POTENTIEL DE PROTECTION E_{pro} EN FONCTION DU MILIEU	
		Dans le sol Electrode (Cu/Cu-SO ₄)	En eau de mer Electrode (Ag/AgCl ⁻)
Acier carbone	Milieu aérobie	E _{pro} ≤ - 0.85 V	E _{pro} ≤ -0.80 V
	Milieu anaérobie	E _{pro} ≤ -0.95 V	E _{pro} ≤ -0.90 V
Aluminium		-0.95 V ≤ E _{pro} ≤ - 1.20 V	- 0.90 V ≤ E _{pro} ≤ -1.15 V
Plomb		-0.60 V ≤ E _{pro} ≤ - 1.50V	-0.55V ≤ E _{pro} ≤ - 1.45 V

TABLEAU 8 : POTENTIEL DE PROTECTION DE METAUX EN FONCTION DES ELECTRODES (Cu/Cu-SO₄) ET (Ag/AgCl⁻) [L]

3.4 Principes et méthodes

➤ Principes

Le principe consiste à mesurer le potentiel de protection E d'une structure immergée sous protection cathodique à anodes sacrificielle.

Pour évaluer la protection de la structure :

Protéger : si $E = E_{pro}$

Sous – protection : si $E \geq E_{pro}$

Surprotection : si $E \leq E_{pro}$

E_{pro} : potentiel de protection donner par les normes ISO 12473

($-0.8V \leq E_{pro} \leq -1$) électrode Ag/AgCl Pour l'acier

L'interprétation de ce résultat nous permettra de prendre ces décisions indiquées dans le tableau 9

➤ **Méthodes**

La méthode consiste à mesurer le potentiel de protection à l'aide d'une électrode d'Ag/AgCl et d'un multimètre. En procédant :

- Disposer d'une électrode de référence, et d'un multimètre
- Connecter la borne + du multimètre sur la structure à mesurer.
- Connecter la borne – du multimètre sur l'ectrode de référence.
- Régler le multimètre au bon calibre (2Vcc) et faire la lecture

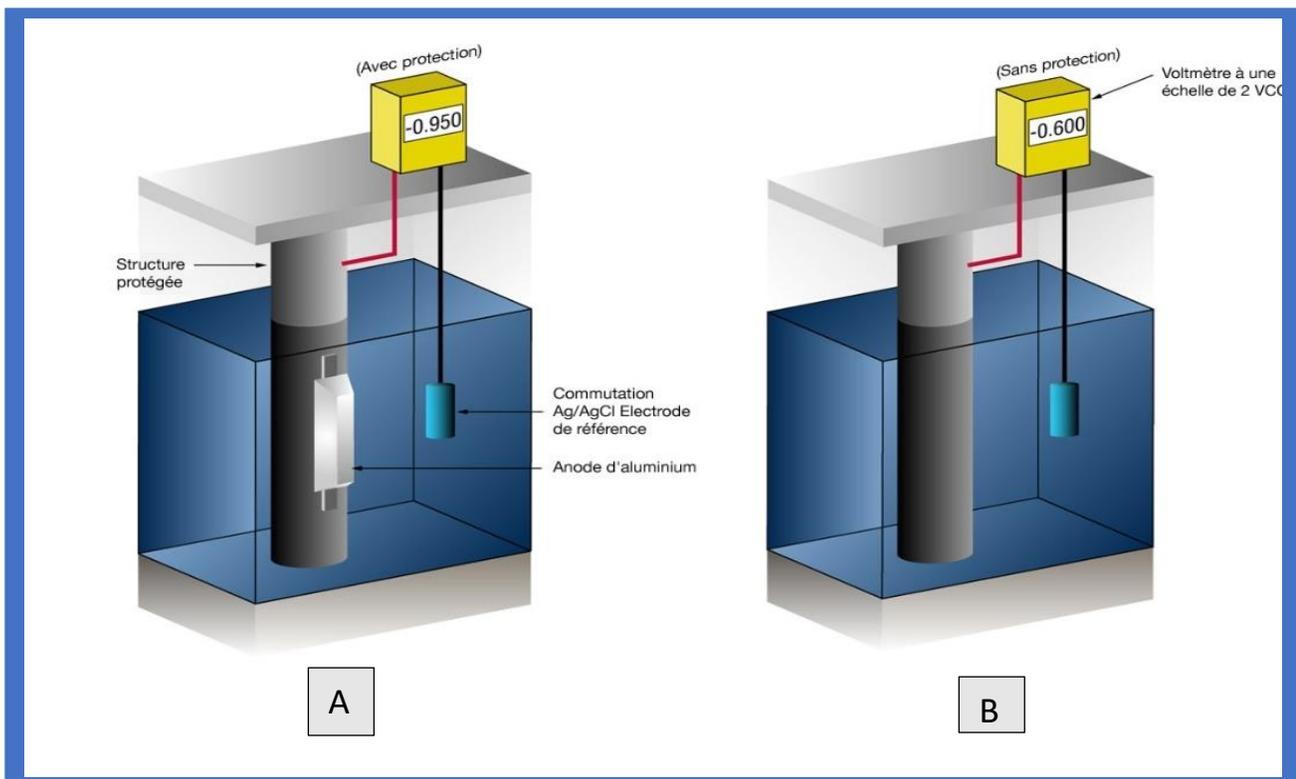


Fig. 55. Méthode de mesure de potentiel de protection.

**TABLEAU RECAPITULATIF D'INTERPRETATION DE MESURE DE POTENTIEL
D'UNE COQUE EN ACIER AVEC PROTECTION PCAS**

RESULTAT	EFFETS ET CONSEQUENCES	ACTIONS A MENES
$E \geq -0.8 \text{ V}$	<p>SOUS – PROTECTION :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Corrosion de la coque -Surconsommation des anodes 	<ul style="list-style-type: none"> -Effectuer une opération d'inspection sous-marine de la coque -Contrôler et corriger les défauts d'isolement - Remplacer des anodes surconsommées -Planifier en avance le prochain cale sèche (dry-dock)
$-0.8 \text{ V} \leq E \leq - 1 \text{ V}$	<p>PROTEGER :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Protéger -Consommation normale des anodes sacrificielle 	Néant
$E \leq - 1 \text{ V}$	<p>SURPROTECTION :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Décollage et fragilisation de la peinture 	<ul style="list-style-type: none"> -Contrôler et corriger les défauts d'isolement <p><i>(Le phénomène de surprotection est plus observé sur les systèmes de protection PCCI Dans ce cas faire appel à un spécialiste pour le paramétrage de la valeur consignes de protection .)</i></p>

Tableau 9

Remarque : les premières mesures devront s'effectuer à la fin d'un carénage (navire à flot).
Les mesures doivent s'effectuer chaque six (6) mois.

Elles seront relevées sur 6 zones de la coque du remorqueur (Avant Td et Bd, Milieu Td et Bd et Arrière Td et Bd).

Ces mesures s'effectueront en au moins deux endroits différents (à quai ou au large) et répertoriées les valeurs de la mesure (cela permettra d'identifier l'origine de l'influence).

3.5 MATERIEL

- Electrode de référence : Ag/AgCl [M]



Types	770 portables
Application	<ul style="list-style-type: none"> - Mesure de potentiel de structure immergée en l'eau de mer, en eau saumâtre. - Utilisé à des températures allant de 0° à 45.8°c - Installations à des profondeur allant jusqu'à 15 mètres
Caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> - Longueur : 254 mm - Diamètre : 25.4 mm - Poids : Environ 910 g - Connexion disponible 15 m - Section : 2.5 m²

- Multimètre numérique type CA55200G [W]

(Voir Annex)

CONCLUSION CHAPITRE 3

La technologie de lutte contre la corrosion de la coque du VB IMPALA sera la combinaison d'une protection cathodique à anode sacrificielle de zinc et d'une protection par revêtement organique.

Cependant l'efficacité de cette technologie dépendra :

- Du respect du poids, de la répartition, de la durée de vie de l'anode en zinc.
- Du choix du revêtement adapter à la protection cathodique à anode de zinc, de l'épaisseur des couches de peinture, à la bonne application du revêtement dans de bonne condition environnementale.

Le but de la combinaison de ces deux types de protection, est d'abord d'isoler la coque électriquement, d'empêcher la fixation des salissures marines ; et ensuite assurer une protection cathodique de la coque en cas de défauts de revêtement sur certaine zone, en évitant une corrosion galvanique entre celui – ci avec le bronze de l'hélice ou soit avec le cuivre des **BOXCOOLER**.

Bien qu'efficace, ce système de protection est influencé par des phénomènes de courant fuite (courant vagabond) soit par interférence avec d'autres structures métalliques (pendant les opérations de remorquages interférence avec les navires remorqués), soit par défaut d'isolement à bord du navire ou soit par les coffrets de prise du quai.

Pour optimiser la protection de la coque du VB IMPALA, la surveillance par mesure de potentiel de protection est nécessaire. Ces valeurs mesurées et bien interprétées permettront de prendre des décisions rigoureuses pour assurer une protection efficace de sa coque.

CONCLUSION GENERALE

La corrosion est un phénomène de dégradation des métaux. Les causes sont multiples et complexes et elles résultent d'interactions chimiques et ou physiques entre le matériau et son environnement. La corrosion jusqu'à ce jour n'est pas complètement éclairée et cela s'explique par des essais de laboratoire qui ne permettent pas de prévoir avec certitude le comportement d'un métal ou d'un alliage donné lorsqu'il est exposé à la corrosion surtout en milieu marin.

La corrosion impacte plusieurs secteurs industriels, par ricochet les installations métalliques en milieu maritime plus précisément la coque des navires dont le phénomène est encore plus complexe.

Cependant, ils existent plusieurs moyens de lutte et de prévention. Mais dans le cas de la protection d'une coque les moyens de protection les plus efficaces consistent à combiner une protection cathodique et une protection par association de plusieurs couches de peinture anti-corrosion (revêtement époxydique).

Les retours d'expériences : le cas de la coque du VB IMPALA nous amené à mettre en place une méthode de mesure de potentiel de protection. Pour permettre d'évaluer le dispositif de protection périodiquement et par zone d'influence ; surtout pour la protection à anodes sacrificielles afin de prendre de bonnes décisions pour une lutte et une prévention efficace contre la corrosion des coques de navires.

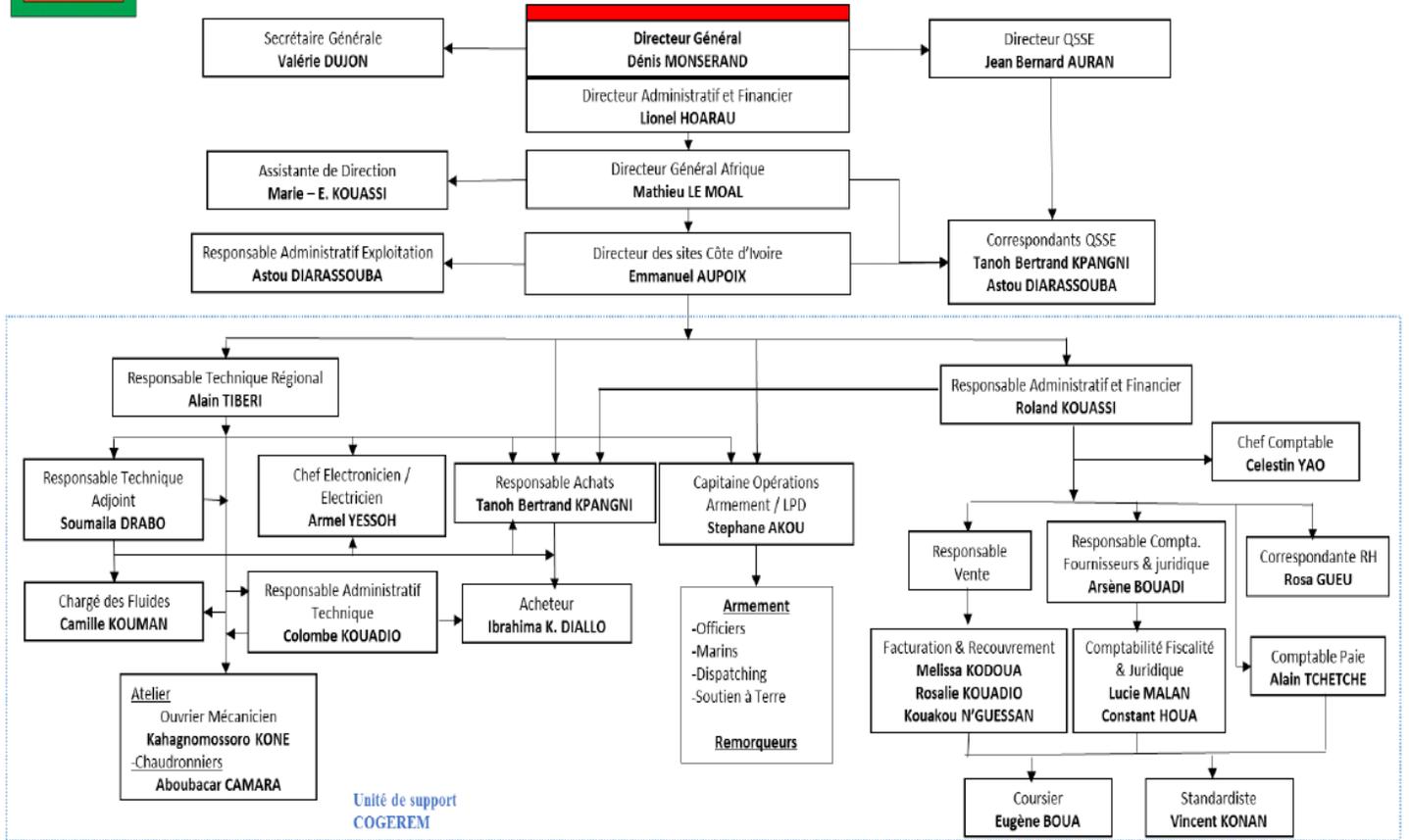
ANNEXES

ANNEXE 01 : ORGANIGRAMME BOLUDA FRANCE



IVOIRIENNE DE REMORQUAGE ET DE SAUVETAGE

COMITE EXECUTIF BOLUDA FRANCE



Unité de support
COGEREM

Finance Administration Informatique	Juridique	QSSE	Technique/Achats	Ressources Humaines	Opérations	Commercial/Projets	Services Généraux
-------------------------------------	-----------	------	------------------	---------------------	------------	--------------------	-------------------

Direction Générale
07/12/2022

9.2.17.1

ANNEXE 2 : CERTIFICAT ANTI - FOULING CHANTIER NAVALE DU VB IMPALA

8. MAR. 2004 15:40

INT-PEINTURE

N° 752

P. 2/2

Certificate No: MINDE/2002/1177



RECOGNISED ANTI-FOULING PAINTS

in compliance with the IMO International Convention on the Control of Harmful Anti-fouling Systems on Ships

This certificate is issued to the company named below. The anti-fouling paint described has been recognised in accordance with the IMO International Convention on the Control of Harmful Anti-fouling Systems on Ships adopted in October 2001. This recognition is subject to Lloyd's Register being informed of any changes in and modifications to the product's formulation or specification. Lloyd's Register reserves the right to withdraw or re-issue this certificate upon any future amendments of the IMO Convention.

Manufacturer: International Coating Ltd, Akzo Nobel.

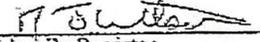
Product name: Interspeed 340

Product codes: BQA 341 Brown
BQA 342 Blue
BQA 343 Green
BQA 344 Plum
BQA 347 Red
BQA 349 Black

The certificate will be valid until the date shown below.

Date of expiry: 1 July 2005

Date of issue: 1 July 2002


Lloyd's Register

THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO THE TERMS AND CONDITIONS OVERLEAF



This is to certify that
“Kianda”
IMO 9236391

was coated with

**Interspeed 340 (BQA341Brown, BQA347Red), a TBT Free
Controlled Depletion Polymer Antifouling coating**

in compliance with the IMO Antifouling Systems Convention of 2001
(AFS/CONF/26) at the drydocking in the Walvis Bay Synchrolift,
Republic of South Africa, in October, 2004

Interspeed 340 (BQA341 Brown, BQA347 Red) is manufactured by
International Paint Ltd. and contains the following active ingredients

Cuprous Oxide (CAS Number 1317-39-1)
Zinc Ethylene bis-dithiocarbamate (CAS Number 12122-67-7)

The underwater-hull was fully prepared at this drydocking and a new
anticorrosive scheme was applied prior to the antifouling.

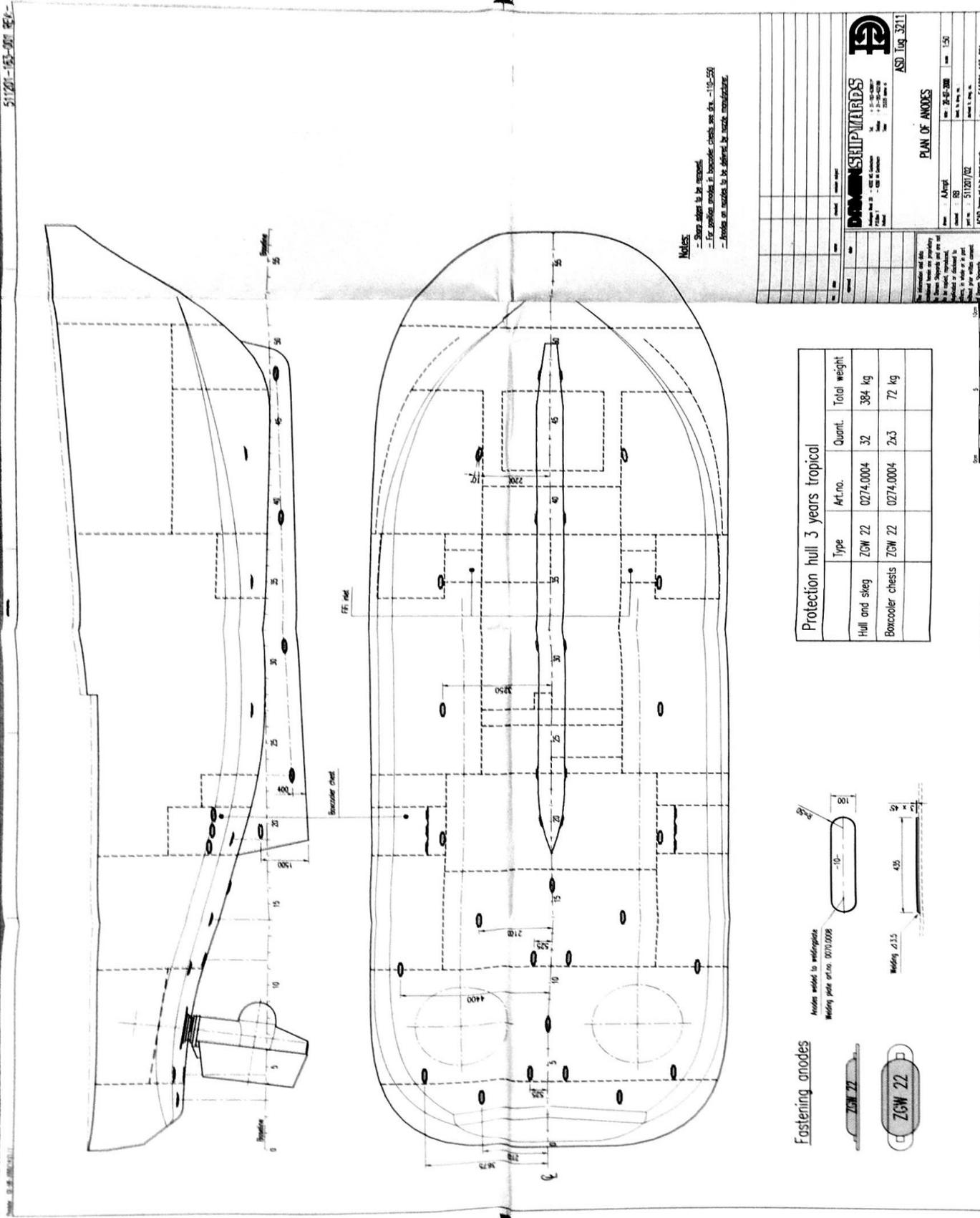
A handwritten signature in black ink, appearing to read "P. Sinclair", written over a horizontal line.

P. Sinclair

Technical Support Manager – European Marine.



ANNEXE 4: PLAN D'ANODE DE LA COQUE DU VB IMPALA



ANNEXE 5 : PLAN D'ANODE PROPULSEUR VB IMPALA

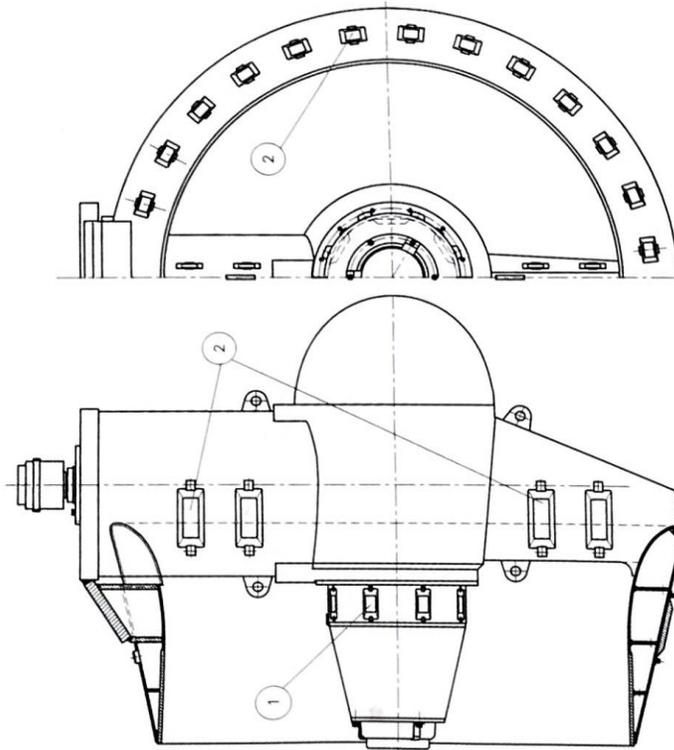
Parts Manual
Work No.: 514-4192
Serial Nos.: 61165, 61166

Aquamaster
AZIMUTH THRUSTERS

Draw. no.:
5153441-0-000

Draw. name:
Mounting of zinc anodes

PART	ORDER CODE	ZINC ANODE	PART NAME AND INFORMATION	PCS /UNIT
1	A 8112168	ZINC ANODE		8
2	K 5352301-A-000	MOUNTING OF ZINC ANODES		34



Parts Manual
Work No.: 514-4192
Serial Nos.: 61165, 61166

Aquamaster
AZIMUTH THRUSTERS

45

4.11.2000 Rev. 1.0

24.11.2000 Rev. 1.0

44

ANNEXE 6 : NORME PEINTURE CARENAGE

NORME SUR LES PEINTURES ET REVÊTEMENTS

18-080-000-SG-003

Feuilles de spécifications des peintures et revêtements

SURFACES EXTÉRIEURES : ÉLÉMENTS IMMERGÉS					
TYPE DE NAVIRE / CARACTÉRISTIQUES :			TYPE DE SPÉCIFICATION :		
<ul style="list-style-type: none"> • NAVIRES QUI, EN SERVICE NORMAL, N'ONT PAS À NAVIGUER DANS LA GLACE, MAIS REQUIÉRENT UN REVÊTEMENT ÉPOXYDIQUE RÉSISTANT À L'ABRASION. 			<ul style="list-style-type: none"> • ENTRETIEN À BORD • RADOUB 		
PARTIE IMMERGÉE DE LA COQUE ET GOUVERNAIL			SYSTÈME : REVÊTEMENT AUX RÉSINES ÉPOXYDIQUES PURES RÉSISTANT À L'ABRASION (ANTIALISSURE FACULTATIF)		
Préparation des surfaces :		LAVER À L'EAU DOUCE SOUS HAUTE PRESSION. ENLEVER L'HUILE ET LA GRAISSE. LES SURFACES ENDOMMAGÉES ET À NU DOIVENT ÊTRE GRENAILLÉES ² SELON L'ÉTALON SA2½. LES BORDS NON SAINS DU REVÊTEMENT EXISTANT DOIVENT ÊTRE AMINCIS PAR DÉCAPAGE AU JET SOIGNÉ SUR UNE DISTANCE DE 6-8 PO (15-20 CM) JUSQU'À LA SURFACE SAINTE.			
	PRODUIT	COULEUR	NBRE DE COUCHES COMPLÈTES / RETOUCHES	ÉPAISSEUR DU FEUIL SEC, µ	COMMENTAIRES
A	RRÉPRA ⁸ RRÉPRA ⁸		1 RETOUCHE 1 RETOUCHE	125 125	
SI UN ANTIALISSURE EST REQUIS :					
B	RRÉPRA ⁸ RRÉMV ⁶ PAPDC		1 RETOUCHE 1 RETOUCHE 2 COMPLÈTES	125 125 75 CHACUNE	MEILLEUR CHOIX POUR UNE BONNE RÉPARTITION DU REVÊTEMENT
OU :					
	PAPDC		1 COMPLÈTE	150	
REMARQUE(S) :		<ul style="list-style-type: none"> • SI LA PREMIÈRE COUCHE DE PEINTURE ANTIALISSURE PEUT ÊTRE APPLIQUÉE À LA COUCHE DE REVÊTEMENT ÉPOXYDIQUE LORSQUE CETTE DERNIÈRE EST ENCORE « COLLANTE », LE SYSTÈME À PEUT ÊTRE UTILISÉ. • LA DURÉE DE SERVICE PRÉVUE DU SYSTÈME ANTIALISSURE PRESCRIT EST DE 24 MOIS. • LA NOUVELLE PEINTURE ANTIALISSURE DOIT ÊTRE COMPATIBLE AVEC L'ANCIENNE. 			
Définition(s) :		<ol style="list-style-type: none"> 1. LE LAVAGE À L'EAU DOUCE SOUS HAUTE PRESSION DEVIENDRAIT ÊTRE EFFECTUÉ À L'AIDE D'UNE LANCE À JET EN ÉVENTAIL DONT LA PRESSON À LA BUSE EST D'ENVIRON 3 000 LB/PO² (68 BARS / 210 KG/CM²). UN VOLUME D'EAU SUFFISANT DOIT ÊTRE PRÉVU. (VOIR LES REMARQUES SUR LE DÉCAPAGE AU JET HYDRAULIQUE SOUS PRÉPARATION DES SURFACES.) 2. DANS LE PRÉSENT MANUEL, LE GRENAILLAGE DÉSIGNÉ LE DÉCAPAGE AU JET AVEC DIFFÉRENTS TYPES DE GRENAILLES, Y COMPRIS CELLES À BASE DE LAITIER DE CUIVRE, DE NICKEL OU DE CHARBON. RESPECTER LES ÉTALONS RELATIFS AUX MATÉRIAUX DE DÉCAPAGE AU JET. (VOIR LES REMARQUES SOUS PRÉPARATION DES SURFACES/DÉCAPAGE AU JET D'ABRASIF.) 3. LES RRÉPRA (REVÊTEMENTS AUX RÉSINES ÉPOXYDIQUES PURES À HAUTE RÉSISTANCE À L'ABRASION) NE DEVRAIENT PAS SUBIR UNE PERTE SUPÉRIEURE À 65-70 MG LORSQUE DÉTERMINÉE À L'AIDE D'UN ABRASIMÈTRE TABER ÉQUIPÉ D'UN DISQUE CS10, PENDANT 1 000 CYCLES, AVEC UN POIDS DE 1 000 G. UNE HAUTE RÉSISTANCE À LA TRACTION, UNE BONNE EXTENSIBILITÉ ET UNE FORTE RÉSISTANCE AUX CHOCS SONT ÉGALEMENT IMPORTANTES. VOIR LE TABLEAU DONNÉES TECHNIQUES COMPARATIVES – REVÊTEMENTS RÉSISTANTS À L'ABRASION. 4. LES RFCF (REVÊTEMENTS À FAIBLE COEFFICIENT DE FROTTEMENT) DEVRAIENT AVOIR UN TRÈS FAIBLE COEFFICIENT DE FROTTEMENT DYNAMIQUE AVEC LA GLACE, TYPIQUEMENT ENTRE 0,030 ET 0,013. 5. TOUTS LES REVÊTEMENTS ANTICORROSION IMMERGÉS DOIVENT ÊTRE COMPATIBLES AVEC LA PROTECTION CATHODIQUE. 6. UNE COUCHE D'ACCROCHAGE AUX RRÉMV (RÉSINES ÉPOXYDIQUES MODIFIÉES AU VINYLE) PROLONGE LE DÉLAI DE RECOUVREMENT ENTRE LES REVÊTEMENTS AUX RÉSINES ÉPOXYDIQUES PURES ET LA PEINTURE ANTIALISSURE. DANS CERTAINS SYSTÈMES, ELLE PEUT FAIRE PARTIE DU SYSTÈME DE PEINTURE ANTICORROSION. 7. CERTAINS FABRICANTS DE REVÊTEMENTS IMPOSENT UNE SÉQUENCE DE REVÊTEMENT SPÉCIFIQUE. VEILLER À UTILISER LE BON PRODUIT POUR LES PREMIÈRE ET DEUXIÈME COUCHES. 8. LES RRÉPRA (REVÊTEMENTS AUX RÉSINES ÉPOXYDIQUES PURES RÉSISTANTS À L'ABRASION) NE DEVRAIENT PAS SUBIR UNE PERTE SUPÉRIEURE À 80-90 MG LORSQUE DÉTERMINÉE À L'AIDE D'UN ABRASIMÈTRE TABER ÉQUIPÉ D'UN DISQUE CS10, PENDANT 1 000 CYCLES, AVEC UN POIDS DE 1 000 G. UNE HAUTE RÉSISTANCE À LA TRACTION, UNE BONNE EXTENSIBILITÉ ET UNE FORTE RÉSISTANCE AUX CHOCS SONT ÉGALEMENT IMPORTANTES. VOIR LE TABLEAU DONNÉES TECHNIQUES COMPARATIVES – REVÊTEMENTS RÉSISTANTS À L'ABRASION. 9. LE PONÇAGE MÉCANIQUE AVEC DES BROSSES MÉTALLIQUES N'EST GÉNÉRALEMENT PAS RECOMMANDÉ. CETTE MÉTHODE POLIT LA SURFACE ET NUIT DONC À LA BONNE ADHÉRENCE DES REVÊTEMENTS. LORSQUE DES PISTOLETS À AIGUILLES SONT UTILISÉS, ILS PRODUISENT SOUVENT UN PROFIL DE SURFACE TRÈS RUGUEUX. IL EST DONC CONSEILLÉ D'EFFECTUER UN LÉGER MEULAGE MÉCANIQUE SUR LES SURFACES DÉCAPÉES AVEC CES PISTOLETS AVANT L'APPLICATION DU REVÊTEMENT. 10. LES FP (FINIS AU POLYURÉTHANE) PEUVENT ÊTRE DU TYPE MONOCOMPOSANT À DURCISSEMENT À L'HUMIDITÉ OU DU TYPE À DEUX COMPOSANTS. TOUTEFOIS, IL FAUT ÉVITER DE MÉLANGER CES DEUX TYPES DANS UN MÊME SYSTÈME. S'ASSURER QUE LE PRODUIT CHOISI EST RECOUVRABLE ET A UN DÉLAI DE RECOUVREMENT INDÉFINI. NE PAS CONFONDRE CES PRODUITS AVEC LES REVÊTEMENTS MONOCOMPOSANTS AUX RÉSINES ALKYLDES MODIFIÉES AU POLYURÉTHANE. 			
ABRÉVIATION(S) :		RRÉPRA = REVÊTEMENT AUX RÉSINES ÉPOXYDIQUES PURES RÉSISTANT À L'ABRASION RRÉMV = REVÊTEMENT AUX RÉSINES ÉPOXYDIQUES MODIFIÉES AU VINYLE PAPDC = PEINTURE ANTIALISSURE DE TYPE POLYMÈRE À DÉPLÉTION CONTRÔLÉE (SANS TBT)			

ANNEXE 7: NORME APPLICATION DE PEINTURE NOUVELLE CONSTRUCTION / GRAND CARENAGE

18-080-000-SG-003

NORME SUR LES PEINTURES ET REVÊTEMENTS
Feuilles de spécifications des peintures et revêtements

SURFACES EXTÉRIEURES : ÉLÉMENTS IMMERGÉS					
TYPE DE NAVIRE / CARACTÉRISTIQUES :			TYPE DE SPÉCIFICATION :		
<ul style="list-style-type: none"> • NAVIRES QUI, EN SERVICE NORMAL, N'ONT PAS À NAVIGUER DANS LA GLACE, MAIS OÙ UN REVÊTEMENT VINYLIQUE ANTICORROSION EST DÉSIRÉ. 			<ul style="list-style-type: none"> • GRAND CARÈNAGE / DÉCAPAGE COMPLET • NOUVELLES CONSTRUCTIONS 		
PARTIE IMMERGÉE DE LA COQUE ET GOUVERNAIL			SYSTÈME : SYSTÈME DE REVÊTEMENT VINYLIQUE ANTICORROSION, SANS GOUDRON, AVEC ANTISALISSURE		
Préparation des surfaces :		DÉCAPAGE COMPLET : LAVÉ À L'EAU DOUCE SOUS HAUTE PRESSION ¹ . ENLEVER L'HUILE ET LA GRAISSE. GRENAILLER ² SELON L'ÉTALON SA2½. NOUVELLES CONSTRUCTIONS : ENLEVER LES SELS DE ZINC (ROUILLE BLANCHE), LE CAS ÉCHÉANT, PAR UN GRENAILLAGE OU UN GRATTEGE LÉGER SUIVI D'UN LAVAGE. LES SURFACES OÙ LA PEINTURE PRIMAIRE D'ATELIER EST ENDOMMAGÉE DEVRAIENT ÊTRE DÉCAPÉES AU JET SELON L'ÉTALON SA2½ OU PONCÉES MÉCANIQUEMENT ⁹ SELON L'ÉTALON PT3.			
	PRODUIT	COULEUR	NBRE DE COUCHES COMPLÈTES / RETOUCHES	ÉPAISSEUR DU FEUIL SEC, µ	COMMENTAIRES
	RARARVAG ⁷		1 COMPLÈTE	100	3 COUCHES DE 75 µ CHACUNE DONNENT UNE MEILLEURE RÉPARTITION DU REVÊTEMENT
	RARVAG ⁷ PAPDC		1 COMPLÈTE 2 COMPLÈTES	125 75 CHACUNE	MEILLEUR CHOIX POUR UNE BONNE RÉPARTITION DU REVÊTEMENT
ou :					
	PAPDC		1 COMPLÈTE	150	
REMARQUE(S) :		<ul style="list-style-type: none"> • LORSQU'ILS SONT APPLIQUÉS À L'ÉPAISSEUR DE FEUIL APPROPRIÉE, LES REVÊTEMENTS ANTICORROSION AUX RÉSINES VINYLIQUES SONT CONSIDÉRÉS TRÈS EFFICACES. LEUR CAPACITÉ D'APPLICATION À BASSE TEMPÉRATURE LES A RENDU POPULAIRES DANS LES CLIMATS FROIDS. TOUTEFOIS, SUITE À L'ADOPTION DE RÈGLEMENTS SUR LES COV, CES PRODUITS SERONT DORÉNAVANT REMPLACÉS PAR DES PRODUITS CONFORMES AUX EXIGENCES D'ÉMISSION DE COV. • LA DURÉE DE SERVICE PRÉVUE DU SYSTÈME ANTISALISSURE PRESCRIT EST DE 24 MOIS. 			
DÉFINITION(S) :		<ol style="list-style-type: none"> 1. LE LAVAGE À L'EAU DOUCE SOUS HAUTE PRESSION DEVRAIT ÊTRE EFFECTUÉ À L'AIDE D'UNE LANCE À JET EN ÉVENTAIL DONT LA PRESSION À LA BUSE EST D'ENVIRON 3 000 LB/PO² (68 BARS / 210 KG/CM²). UN VOLUME D'EAU SUFFISANT DOIT ÊTRE PRÉVU. (VOIR LES REMARQUES SUR LE DÉCAPAGE AU JET HYDRAULIQUE SOUS PRÉPARATION DES SURFACES.) 2. DANS LE PRÉSENT MANUEL, LE GRENAILLAGE DÉSIGNÉ LE DÉCAPAGE AU JET AVEC DIFFÉRENTS TYPES DE GRENAILLES, Y COMPRIS CELLES À BASE DE LAITIÈRE DE CUIVRE, DE NICKEL OU DE CHARBON. RESPECTER LES ÉTALONS RELATIFS AUX MATÉRIAUX DE DÉCAPAGE AU JET. (VOIR LES REMARQUES SOUS PRÉPARATION DES SURFACES/DÉCAPAGE AU JET D'ABRASIF.) 3. LES RRÉPHRA (REVÊTEMENTS AUX RÉSINES ÉPOXYDIQUES PURES À HAUTE RÉSISTANCE À L'ABRASION) NE DEVRAIENT PAS SUBIR UNE PERTE SUPÉRIEURE À 65-70 MG LORSQUE DÉTERMINÉE À L'AIDE D'UN ABRASIMÈTRE TABER ÉQUIPÉ D'UN DISQUE CS10, PENDANT 1 000 CYCLES, AVEC UN POIDS DE 1 000 G. UNE HAUTE RÉSISTANCE À LA TRACTION, UNE BONNE EXTENSIBILITÉ ET UNE FORTE RÉSISTANCE AUX CHOC SONT ÉGALEMENT IMPORTANTES. VOIR LE TABLEAU DONNÉES TECHNIQUES COMPARATIVES – REVÊTEMENTS RÉSISTANTS À L'ABRASION. 4. LES RFCF (REVÊTEMENTS À FAIBLE COEFFICIENT DE FROTTEMENT) DEVRAIENT AVOIR UN TRÈS FAIBLE COEFFICIENT DE FROTTEMENT DYNAMIQUE AVEC LA GLACE, TYPIQUEMENT ENTRE 0,030 ET 0,013. 5. TOUTS LES REVÊTEMENTS ANTICORROSION IMMERGÉS DOIVENT ÊTRE COMPATIBLES AVEC LA PROTECTION CATHODIQUE. 6. UNE COUCHE D'ACCROCHAGE AUX RRÉMV (RÉSINES ÉPOXYDIQUES MODIFIÉES AU VINYLE) PROLONGE LE DÉLAI DE RECouvreMENT ENTRE LES REVÊTEMENTS AUX RÉSINES ÉPOXYDIQUES PURES ET LA PEINTURE ANTISALISSURE. DANS CERTAINS SYSTÈMES, ELLE PEUT FAIRE PARTIE DU SYSTÈME DE PEINTURE ANTICORROSION. 7. CERTAINS FABRICANTS DE REVÊTEMENTS IMPOSENT UNE SÉQUENCE DE REVÊTEMENT SPÉCIFIQUE. VEILLER À UTILISER LE BON PRODUIT POUR LES PREMIÈRE ET DEUXIÈME COUCHES. 8. LES RRÉPRA (REVÊTEMENTS AUX RÉSINES ÉPOXYDIQUES PURES RÉSISTANTS À L'ABRASION) NE DEVRAIENT PAS SUBIR UNE PERTE SUPÉRIEURE À 80-90 MG LORSQUE DÉTERMINÉE À L'AIDE D'UN ABRASIMÈTRE TABER ÉQUIPÉ D'UN DISQUE CS10, PENDANT 1 000 CYCLES, AVEC UN POIDS DE 1 000 G. UNE HAUTE RÉSISTANCE À LA TRACTION, UNE BONNE EXTENSIBILITÉ ET UNE FORTE RÉSISTANCE AUX CHOC SONT ÉGALEMENT IMPORTANTES. VOIR LE TABLEAU DONNÉES TECHNIQUES COMPARATIVES – REVÊTEMENTS RÉSISTANTS À L'ABRASION. 9. LE PONÇAGE MÉCANIQUE AVEC DES BROSSES MÉTALLIQUES N'EST GÉNÉRALEMENT PAS RECOMMANDÉ. CETTE MÉTHODE POLIT LA SURFACE ET NUIT DONC À LA BONNE ADHÉRENCE DES REVÊTEMENTS. LORSQUE DES PISTOLETS À AIGUILLES SONT UTILISÉS, ILS PRODUISENT SOUVENT UN PROFIL DE SURFACE TRÈS RUGUEUX. IL EST DONC CONSEILLÉ D'EFFECTUER UN LÉGER MEULAGE MÉCANIQUE SUR LES SURFACES DÉCAPÉES AVEC CES PISTOLETS AVANT L'APPLICATION DU REVÊTEMENT. 10. LES FP (FINIS AU POLYURÉTHANE) PEUVENT ÊTRE DU TYPE MONOCOMPOSANT À DURCISSEMENT À L'HUMIDITÉ OU DU TYPE À DEUX COMPOSANTS. TOUTEFOIS, IL FAUT ÉVITER DE MÉLANGER CES DEUX TYPES DANS UN MÊME SYSTÈME. S'ASSURER QUE LE PRODUIT CHOISI EST RECouvreRABLE ET A UN DÉLAI DE RECouvreMENT INDÉFINI. NE PAS CONFONDRE CES PRODUITS AVEC LES REVÊTEMENTS MONOCOMPOSANTS AUX RÉSINES ALKYLDES MODIFIÉES AU POLYURÉTHANE. 			
ABRÉVIATION(S) :		RARVAG = REVÊTEMENT ANTICORROSION AUX RÉSINES VINYLIQUES ET À L'ALUMINIUM, SANS GOUDRON PAPDC = PEINTURE ANTISALISSURE DE TYPE POLYMÈRE À DÉPLÉTION CONTRÔLÉE (SANS TBT)			

ANNEXE 8 : MULTIMETRE NUMERIQUE CA5220G

MULTIMETRE NUMERIQUE CA5220G

GARANTIE 3 ANS

Très complet pour un diagnostic électrique efficace



Le C.A 5220G est un multimètre numérique 4000 points + bargraph tout automatique de terrain.

Riche de toutes les mesures et de nombreuses fonctions de confort (rétroéclairage, hold, Min/Max,...), il deviendra vite l'allié de tous les diagnostics.

- tension AC/DC : 400mV à 600V (5 cal.)
- bande passante : 40Hz-500Hz sauf cal.400mV (100Hz)
- préc. typ. de 1%+/-1pt en continu, 1.5%+/-1pt en alternatif
- intensité AC/DC 40mA à 10A (3 cal.)
- préc. typ. de 1.5%+/-1pt en continu, 2%+/-2pt en alternatif
- fréquence 1-100Hz à 200kHz (5 cal.)
- résistance : 400Ω à 40MΩ (6 cal.)
- test sonore de continuité ($R < 40\Omega$)
- précision typique : 1%. Impédance : 10MΩ (basse impédance Velec de 270kΩ)
- afficheur 4000 pts (digits de 10mm)rétroéclairé
- bargraph 40 segments
- fonction HOLD / Range / Min. Max.
- test diode
- capacité : 4 à 40μF (5 cal.).
- gaine antichoc multi-usage
- sécurité électrique : IEC 1010-1 600V Cat III
- dimensions : 177 x 64 x 42 mm - masse : 350g

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES
ET
WEBOGRAPHIQUES**

[A] <http://www.aste-tsm.fr>.

[B] Le colloque International CEFRACOR 74 constitue la 78ème manifestation de la Fédération Européenne de Corrosion. Corrosion marine moyens de protection du 4-7 Juin 1974 LA BAULE.

[C] Arnaud Guibert. Diagnostic de corrosion et prédiction de signature électromagnétique de structures sous-marines sous protection cathodique. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2009. Français. NNT : Tel-00440258

[D] Thèse : Étude des mécanismes de corrosion et protection contre la corrosion pour la minimisation de la signature électrique des bâtiments de la marine. UNIVERSITE GRENOBLE ALPES, le 28 janvier 2022.

[E] Mémoire de fin d'études étude d'un dispositif de protection cathodique des pipeline d'ambatovy alimenté par énergie solaire photovoltaïque Présenté par : Mr Lovaniaina Sylvain RAKOTONDRAIBE
UNIVERSITE D'ANTANANARIVO ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE année 2009

[F] Zoulikha Khiati. Inhibition de la corrosion du cuivre en milieux chlorure et sulfate neutres par une nouvelle molécule dérivée de 1,2,4-triazole.. Autre. Université Paris 6 - Pierre et Marie Curie ; Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (Algérie), 2013. Français. NNT : .tel-01376746

[G] Thèse : Inhibition de la corrosion d'alliages d'aluminium par des molécules organiques : approches théorique et expérimentale soutenue par Eléa VERNACK Le 10 Juillet 2019 ; université PSL PARIS

[H] Support de cours CORROSION ET PROTECTIONS DES METAUX Dr K.BOUHRIA , Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF année 2021/2022.

[I] Construction des Navires fait par le Dr ERROUANE Lahouaria Université Des sciences et de la Technologie MB d'Oran Faculté de Génie Mécanique Département de Génie Maritime septembre 2016

[J] BADORIS - Document de synthèse relatif à une barrière technique de sécurité (BTS) Protection cathodique Version 1.1 – janvier 2008.

[K] La norme canadienne sur les peintures et les revêtements 18-080-000-SG-003 (anciennement MPO/5884 et TP 12445F) Deuxième édition – mars 1999 Révisé – 06 juin 2002.

[L] <http://www.protectioncathodique.net/>.

[M] Catalogue Protection cathodique SERE MAINTENANCE 25 avenue de la VERTONNE . Site web : www.sere-sa.fr

RESUME

L'intérêt de ce travail est d'optimiser la protection cathodique à bord des remorqueurs de la société IRES.

La protection de ces remorqueurs est la combinaison de revêtement organique avec peinture anti fouling et de protection cathodique à anode sacrificielle.

La période de renouvellement de cette protection est déjà préétablie par les différents constructeurs sans tenir compte des différentes influences sur l'efficacité du système de protection. A savoir : les courants de fuite provenant d'un coffret de quai, d'un navire mal isolé électriquement. Ces influences impactent négativement l'exploitation de ces remorqueurs pour cause d'avarie important (voire d'eau ...etc.).

Pour faire face à ce problème, il est indispensable de contrôler les valeurs de potentiel de protection deux fois par an, et prendre pour référence les valeurs du potentiel de protection donné par la norme ISO 12473 pour une électrode Ag/AgCl (eau de mer).

Afin de prendre de bonne décision dans la planification des cales sèches pour mieux optimiser la prévention et la lutte contre la corrosion.

Mots clé : Corrosion, protection cathodique, coque, potentiel de protection

ABSTRACT

The main of this work is to optimize cathodic protection on board IRES tugboats.

The protection of these tugboats is due to the combination of marine coating with anti-fouling paint and sacrificial anode cathodic protection.

The period of renewal of this protection is already pre-established by the various manufactures without taking into consideration the different influences on the protection system .

Such as the leakage currents coming from quay electric sockets from a ship poorly insulated electrically . These influences impact the operation of these tugs and may cause significant damage .

To contain this problem , it is essential to control the protection potential values, twice a year and takes as a reference the values of protection potentiel given by ISO 12473 for an electrode Ag/AgCl^- (sea water).

To ensure good decisions in the planning of dry docks and the maintenance of corrosion protection system , to better optimize corrosion prevention and control.

Keys Words : Corrosion , cathodic protection , hull, potentiel protection .

TABLES DES MATIERES

REMERCIEMENTS	02
DEDICACE	03
AVANT - PROPOS	04
GLOSSAIRE	05
LISTE DES ABREVIATIONS ET DE SYMBOLES	07
INTRODUCTION GENERALE	10
CHAPITRE I : DEFINITION DES TERMES DE REFERENCE :	13
1- INTRODUCTION.....	13
2- GENERALITES SUR LA CORROSION.....	13
2.1 Définition de la corrosion.....	13
2.2 Types de corrosion.....	14
2.2.1 Corrosion chimique	14
2.2.2 Corrosion microbiologique.....	15
2.2.3 Corrosion électrochimique.....	15
2.3 Formes de corrosion	16
2.3.1 Corrosion généralisée.....	16
2.3.2 Corrosion localisée	17
2.3.2.1 Corrosion galvanique.....	18
2.3.2.2 Corrosion piquûre.....	19
2.3.2.3 Corrosion intergranulaire.....	20
2.3.2.4 Corrosion sous contrainte.....	21
2.3.2.5 Corrosion érosion / cavitation.....	21
2.3.2.6 Corrosion caverneuse.....	23
2.3.2.7 Corrosion par fragilisation d'hydrogène.....	24
2.3.2.8 Corrosion par aération différentielle.....	25
2.3.2.9 Corrosion par courant vagabond	26

3- CORROSION EN MILIEU MARIN.....	28
3.1 Définition du milieu marin.....	28
3.2 Corrosion microbiologique.....	29
3.3 Corrosion électrochimique en milieu marin.....	30
4- INSTALLATIONS MARINES.....	32
4.1 Définition.....	32
4.2 Principaux types d'installations marines.....	32
4.2.1 Plateforme pétrolière.....	32
4.2.2 Navire.....	33
4.2.3 Dock.....	33
4.2.4 Bouée.....	34
4.2.5 Centrale thermique flottante.....	35
4.3 Principaux matériaux de construction.....	35
4.3.1 Acier.....	35
4.3.2 Cuivre.....	37
4.3.3 Aluminium.....	39
5- LA PROTECTION.....	43
5.1 Définition.....	43
5.2 Les types de protection contre la corrosion.....	43
5.2.1 Protection par revêtement.....	43
5.2.1.1 Revêtement organique.....	44
5.2.1.2 Revêtement métallique.....	45
5.2.3 Protection chimique.....	46
5.2.4 Protection électrochimique.....	48
5.2.4 Protection cathodique.....	48
5.2.4.1 Protection cathodique Anode sacrificielle (PCAS).....	49
5.2.4.2 Protection cathodique Courant imposée PCCI.....	51

5.2.5 Protection anodique.....	52
5.2.5 Protection géométrique.....	53
5.2.6 Protection électro antifouling.....	53
CONCLUSION DU CHAPITRE 1.....	54
CHAPITRE II : APPROCHE METHODOLOGIQUE	55
1 DEFINITION DU CADRE DE REFERENCE :	55
1.1 Présentation de la société IRES.....	55
1.2 Description du remorqueur VB impala.....	56
1.2.1 Description des œuvres vives.....	57
1.2.2 Protection initiale chantier naval.....	59
2 - IMPACT DE LA CORROSION SUR LE VB IMPALA	61
2.1 Salissure marine.....	61
2.2 Piqûre et perforation de coque	63
2.3 Erosion / cavitation.....	64
2.4 Surconsommation des anodes de protection.....	65
CONCLUSION CHAPITRE 2.....	66
CHAPITRE III : APPROCHE TECHNOLOGIQUE.....	67
1- INTRODUCTION.....	67
2- PROTECTION D'UNE COQUE CONTRE LA CORROSION.....	67
2.1 Protection cathodique (pc).....	67
2.1.1 Critères de la protection cathodique par anodes sacrificielles (PCAS).....	68
2.1.2 Critères de la protection cathodique courant impose (PCCI).....	71
2.1.3 Choix de type de protection cathodique.....	73
2.1.4 Inconvénients et facteurs influençant la protection cathodique	74
2.2 Critères de la protection par revêtement organique	75

2.2.1 Préparation de surface.....	76
2.2.2 Types de revêtements recommandés	77
2.2.3 Choix de revêtement en fonction de la protection cathodique.....	78
2.2.4 Condition environnemental d'application d'un revêtement.....	79
3- MISE EN PLACE D'UN SYSTEME DE MESURE DE POTENTIEL	
DE PROTECTION.....	80
3.1 Introduction.....	80
3.2 Présentation d'influences électriques d'une protection cathodique	81
3.3 Définition potentiel de protection.....	83
3.4 Principes et méthodes	84
3.5 Matériel.....	87
CONCLUSION DU CHAPITRE 3.....	88
CONCLUSION GENERALE	89
LISTE DES ANNEXES.....	90
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES.....	99
RESUME.....	102