



La corrosion des structures métalliques en mer: types et zones de dégradations

Brahim Benaïssa

*Dr ingénieur, Chef adjoint de département
des Ports Maritimes et des Voies Navigables au CETMEF*

Résumé:

L'objectif de cette note est de présenter les types de corrosion qui existent dans des zones différentes le long des structures métalliques en site maritime. Les effets de la corrosion sont généralement détectés dans des zones caractéristiques réparties verticalement. Les observations concernent les palplanches ou les pieux non protégés et les investigations concernent les zones caractéristiques et celles des connections entre rideaux et tirants d'ancrages. Les mesures de pertes d'épaisseur par ultra-son reposent sur une méthode qui permet de restituer d'une manière représentative la distribution des pertes d'épaisseur.

Abstract:

The objectives of this report are to present a form of corrosion which has been recognised to exist around the areas along the length of metallic structures in a maritime environment. The effects of uniformly corrosive influences are seen generally to fall into a characteristic pattern based on a vertical corrosion zone template. Observations are based on unprotected steel piles or tubes and examinations were carried out on vertical location along structures and on the connections between structure and anchors. The ultra-sonic thickness measurements were operated with method which occurs a representative distribution of thickness losses.

Mots-clés : structures, milieu, corrosion, mesures us, bactéries.

1.Introduction

Les désordres observés sur les structures métalliques des infrastructures portuaires, fluviales et en bordure de mer sont principalement occasionnés par la corrosion qui se manifeste différemment sur les parties métalliques en fonction des zones d'exposition (éclaboussures, marnage, immersion ou en fiche).

D'une manière générale, le calcul de la durée de vie d'une structure métallique en site aquatique prend en compte une perte d'épaisseur due à la corrosion uniforme de l'ordre de 0,1 mm/an, or des vitesses de corrosion localisées de l'ordre du cm/an ont été enregistrées sur certains sites. Les zones réputées être le siège de ces dégradations méritent une attention particulière et une protection bien adaptée au milieu et aux conditions de fonctionnement de la structure.

Dans ce qui suit nous décrirons successivement les structures rencontrées dans les sites portuaires, le type de dégradations observées et le mécanisme de corrosion le plus probable à se développer au regard des conditions d'exposition et de milieu. Les informations sont collectées auprès des autorités des ports de Boulogne-Sur-Mer, du Havre, de Nantes-Saint-Nazaire et de Brest [1].

2. Les structures métalliques en site aquatique

En bordure de mer, d'estuaire, de canal ou de rivière des infrastructures sont réalisées pour le chargement ou le déchargement de marchandises, l'embarquement ou le débarquement de personnes et l'accostage. Des structures métalliques constituent l'ossature, le soutènement ou le support principal. Elles sont en contact avec le milieu terrestre et le milieu aquatique. Les pathologies enregistrées sur ces structures proviennent de la dégradation des métaux occasionnée par la corrosion sous forme de perte de matière, de perforations et autres fissures et déchirures.

2.1. Constitution des structures métalliques :

Elles sont constituées principalement de pieux et de palplanches en acier au carbone. L'assemblage des différentes parties peut nécessiter des soudures, un boulonnage ou une liaison articulées (portes et vannes). Les surfaces métalliques sont le plus souvent exposées aux embruns et à l'eau sur une face et au sol sur l'autre face. Différentes formes de structures sont employées séparément ou combinées pour assurer la stabilité de l'ouvrage.

2.1.1. Les structures avec pieux métalliques :

Un pieu métallique est un tube ou une virole en acier enfoncé dans un terrain et destiné à permettre l'appui ou l'ancrage des fondations d'un ouvrage lorsque ce dernier est séparé de la surface par une couche trop importante de terre insuffisamment résistante.

Les quais sur pieux sont constitués par une plate-forme supportée par des pieux (figure 1). Ils assurent les fonctions suivantes :

- ◆ reprise des efforts verticaux (charges d'outillage, charges d'exploitation) par le système de pieux liaisonnés par des poutres et une dalle en béton armé,
- ◆ reprise des efforts horizontaux des navires (accostage, amarrage) ou du milieu naturel (houle ou clapotis, courant, vent),
- ◆ soutènement des terres par empiètements du talus (cas des quais).



Figure 1 : Photo du quai MCT6 du port du Havre.

2.1.2. Les structures avec palplanches

Les palplanches présentent un profil en U, Z ou plates (schémas ci dessous)

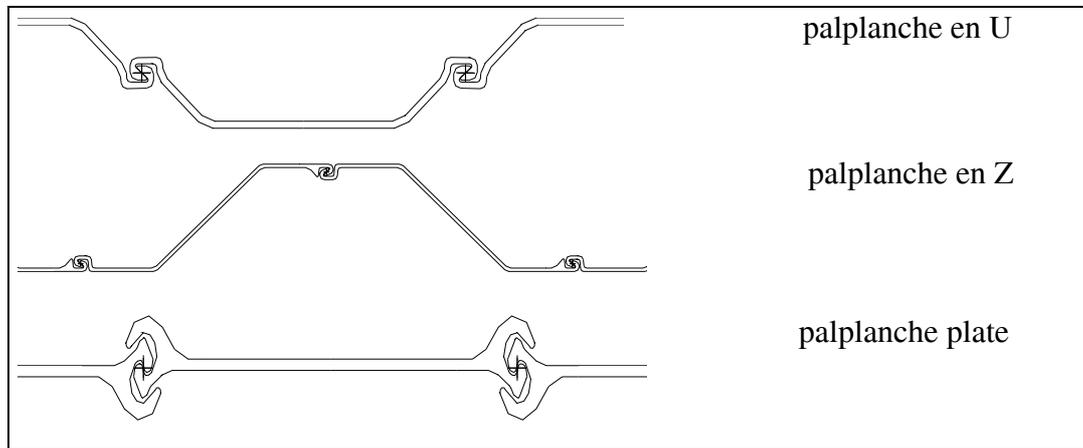


Figure 2: Différentes structures de soutènement obtenues par assemblage des palplanches en rideaux, en caissons ou en gabions.

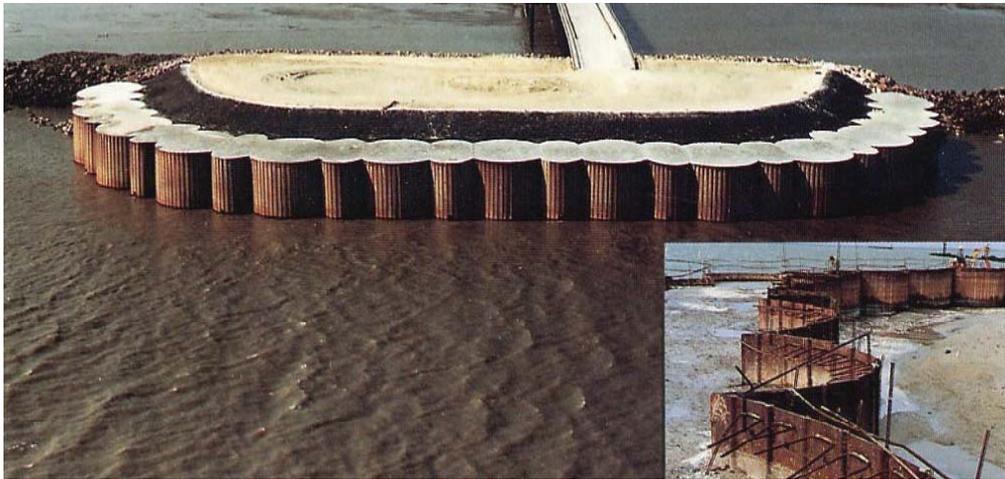


Figure 3: Gabions en palplanches en construction

2.2. Structures métalliques et contact avec le milieu marin

Les pieux et les palplanches sont fichés dans le sol pour un soutènement (accolé à un terrain et en contact avec l'eau) ou pour un support d'une plate-forme (quai, ponton etc.) Ces structures métalliques se trouvent selon les configurations du site en contact avec différents milieux : air, embruns, eau, sol. La figure 4 schématise ces différents milieux rencontrés.

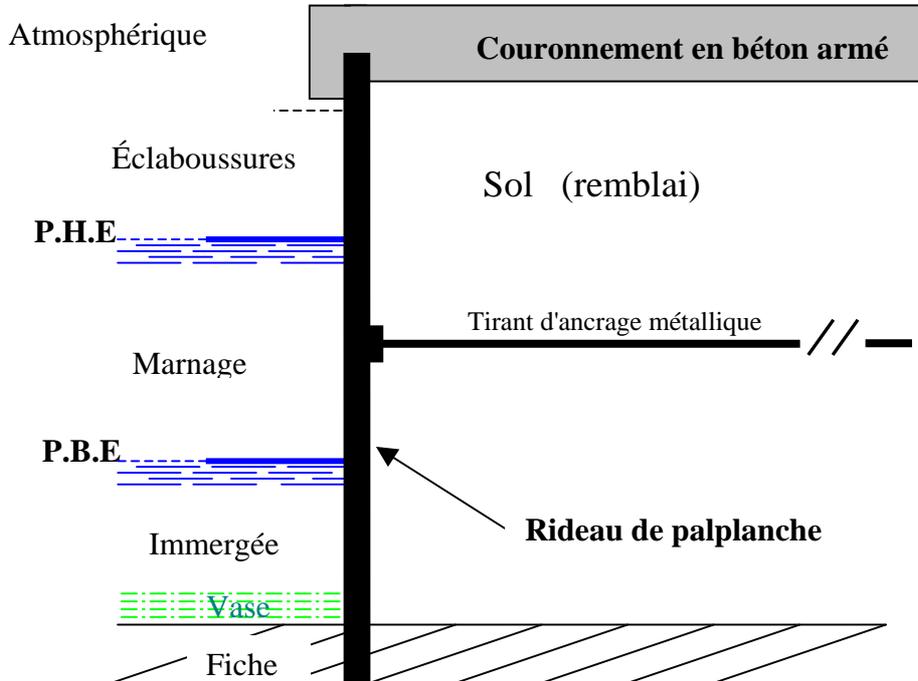


Figure 4: Schémas d'une structure métallique en contact avec le milieu marin.

Nous remarquons que selon les milieux en contact avec la structure métallique, nous pouvons voir se développer différents mécanismes de corrosion (atmosphérique, aération différentielle, acide ou bactériologique) par le fait que nous sommes toujours en présence du système sol/structure métallique/milieu avec électrolyte (eau de mer).

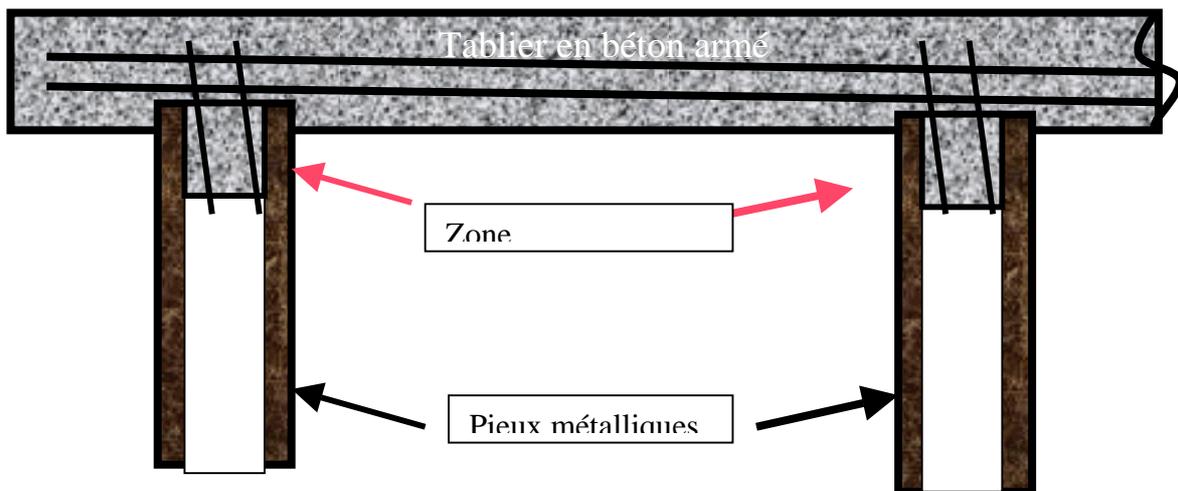


Figure 5: Schémas d'un quai sur pieux (liaison béton armé et pieux)

3. Mécanismes de la corrosion en milieu marin :

Selon les zones d'exposition, le milieu et les conditions de contacts les mécanismes de la corrosion peuvent être de différents types et présenter des aspects de dégradations (généralisés ou localisés) très caractéristiques [4].

3.1.Zone atmosphérique: Corrosion généralisée

La corrosion généralisée se manifeste par une couche d'oxyde sur toute la surface de métal. Elle est due à l'existence simultanée de deux zones à l'interface entre le métal et l'eau. Dans l'une des zones, le métal (acier) se dissout (zone anodique) en ions ferreux (Fe^{2+}) Dans l'autre il se produit une réaction dite cathodique qui peut former soit de l'hydrogène (H_2), soit des ions hydroxydes (OH^-) Ces zones changent de position au cours du temps. La dissolution est ainsi statistiquement uniformément répartie, ce qui traduit une corrosion généralisée ou uniforme.

3.2.Zone d'embruns: Corrosion localisée

La corrosion localisée se manifeste par des zones fortement décapées (crevasses, cratères, perforations). Cette corrosion sévère que subit l'acier dans la zone des éclaboussures s'explique par la juxtaposition d'un ensemble de facteurs défavorables :

- ♦ la présence quasi permanente d'un mince film d'eau de mer dû à l'aspersion des vagues ou à l'humidité toujours supérieure à 95 % qui règne dans cette zone,
- ♦ la saturation continue du film d'eau par l'oxygène de l'air cause un abondant excès de dépolarisant,
- ♦ les périodes de séchage, surtout côté ensoleillé, provoquent une concentration en sels et des écarts de température jouant sur la dilatation des écailles de rouille,
- ♦ les piles d'aération différentielle locales dues à des différences de recouvrement par les écailles de rouille,
- ♦ les piles entre les oxydes (cathodiques) et l'acier sous-jacent (anodique).

3.3.Zone de marnage : Combinaison de mécanismes

Le marnage exprime la différence de niveau de la mer entre une basse mer (BM) et une pleine mer (PM) consécutives. Pour chaque marée, en fonction du marnage généré, on exprime un coefficient en centièmes entre 20 et 120. Les amplitudes varient d'un port à un autre.

La corrosion modérée dans la zone de marnage serait en fait une corrosion atmosphérique partielle (temps des zones découvertes trop court) ainsi qu'une polarisation cathodique par rapport aux couches d'eaux superficielles (le film d'eau déposé par les marées est très oxygéné, tandis que la solubilité de l'oxygène dans l'eau est réduite) On notera que cette interprétation ne considère pas l'éventuelle corrosion par piqûres provoquée par des particules en suspension. Dans cette zone on peut rencontrer :

- ♦ de l'érosion par l'action des vagues, exacerbée pendant les périodes de grosse mer,
- ♦ de l'abrasion sous l'action des débris flottants, des armatures et des navires à l'accostage,
- ♦ de la prolifération de salissures marines et en particulier de balanes sous l'action de la lumière qui accentue le caractère hétérogène de la corrosion par formation de piles d'aération différentielle,
- ♦ de la contamination éventuelle de l'eau par des films d'huile qui peuvent être favorables à la corrosion dans certains cas.

3.4.Zone des plus basses eaux : Corrosion par aération différentielle

Cette zone qui se trouve juste en dessous du niveau correspondant à la moyenne des plus basses eaux est une zone de corrosion par aération différentielle. La zone de marnage est oxygénée et constitue une cathode, la zone immergée juste en dessous constitue une anode soumise à une corrosion accélérée. Une pile d'aération différentielle est une pile de différence de concentration due au fait que l'oxygène de l'air se dissout dans l'eau et se trouve plus concentré dans les couches supérieures que celles de profondeur.

3.5.Zone de transition partie immergée / enterrée : Risque de corrosion bactérienne

La corrosion peut également se développer dans la zone de transition partie immergée/partie enterrée de la structure métallique. Elle peut s'expliquer par :

- ♦ l'existence d'une pile d'aération différentielle entre l'acier exposé en eau de mer plus aérée (cathode) et l'acier dans la vase qui se sacrifie (anode).
- ♦ l'effet abrasif du sable sous l'action des courants de fond. La partie juste au-dessus de la ligne de vase est alors plus corrodée,
- ♦ le développement de bactéries sulfatoréductrices (BSR) et thiosulfatoréductrices (BTR) dans la vase en milieu anaérobie. La teneur en O_2 est très faible ou nulle et la teneur en matières organiques est élevée.

Si la teneur en H_2S passe par un maximum prononcé à ce niveau, nous pouvons confirmer que la corrosion est principalement d'origine bactérienne. La bactérie *Desulfovibrio desulfuricans* se développe en présence de matières organiques ou de sulfates (présents dans l'eau de mer) quand la teneur en O_2 devient négligeable et que le pH est voisin de la neutralité. La bactérie réduit l'ion sulfate en sulfure par l'intermédiaire de l'hydrogène produit par la corrosion et sous l'action d'une enzyme, la déshydrogénase [4].

3.6.Zone de consolidation d'une structure métallique : Corrosion galvanique

Pour consolider une structure, il faut réaliser un assemblage de métaux qui peut se faire :

- ♦ en mettant une plaque métallique pour renforcer une zone,
- ♦ en utilisant des boulons, des écrous, ... pour assembler deux pièces,
- ♦ en fixant des tirants d'ancrage afin de tenir une structure verticale,
- ♦ en pratiquant des soudures avec apport de métal.

Il est très rare que les métaux de consolidation soient de même composition chimique que la structure métallique. De ce fait, lorsque pour des dispositions constructives, l'on est obligé de mettre en contact, en milieu immergé, deux matériaux différents, il y a création d'une pile galvanique.

Le matériau de potentiel électrochimique le plus électronégatif qui est mis en position anodique par rapport à l'autre.

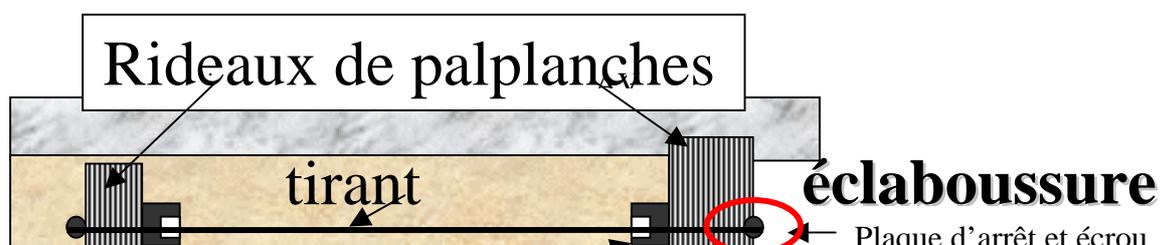


Figure 6: Schémas de structures avec tirants d'ancrage.

4. Mesures des effets de la corrosion :

Les effets de la corrosion se traduisent par une modification de l'état de surface et une perte de métal de la surface en contact avec le milieu électrolytique, ils se mesurent en perte d'épaisseur et s'évaluent visuellement par des états de surfaces dégradées pouvant aller jusqu'à la perforation du pieu ou la déchirure de la palplanche.

Les articulations reposent souvent sur des états de surfaces très précis et adaptés aux jeux dynamiques requis. La modification de ces états de surface par la corrosion peut provoquer le grippage ou l'usure des paliers et autres articulations des ouvrages mobiles.

4.1. Etat de surface de la partie d'ouvrage à inspecter : contrôle visuel

Lors des mesures de pertes d'épaisseurs, il est indispensable de réaliser une inspection visuelle préliminaire afin de fournir un rapport, des photos, une vidéo et tout autre support décrivant :

- ♦ l'état général des surfaces (produits de corrosion, organismes, pollution) ;
- ♦ les désordres (nature, localisation et ampleur) ;
- ♦ le relevé précis des réparations réalisées antérieurement,
- ♦ les déformations constatées.

4.2. Contrôle des épaisseurs résiduelles : mesures par ultrasons

L'intérêt des mesures par ultrasons [2] est d'utiliser une méthode non destructive pour mesurer l'épaisseur résiduelle d'un matériau sans en compromettre son usage et sans modifier ses dimensions ou son état de surface.

L'appareil à ultrasons permet de mesurer le temps de propagation (ou de réflexion) d'un train d'onde de fréquence ultrasonique dans le métal. La vitesse de propagation étant connue, on en déduit l'épaisseur de métal traversée à l'aide de la relation : $E_p = \text{Vitesse de propagation} \times \text{Temps de réflexion}$

4.3. Nettoyage et localisation des surfaces de mesures (échantillonnage)

Les zones délimitées sont nettoyées et débarrassées des produits de corrosion et de toutes les salissures recouvrant le métal afin de pouvoir réaliser un bon contact avec le palpeur de l'appareil de mesures.. L'outil de décapage doit être adapté au type de corrosion et à l'état de dégradation de l'ouvrage (brosse rotative, marteau à aiguilles, raclette ...).

Que ce soit pour les palplanches ou pour les pieux métalliques, on définit pour chaque point de mesure une zone réduite de trois positions de la sonde pour déterminer avec une moyenne arithmétique la valeur de l'épaisseur.

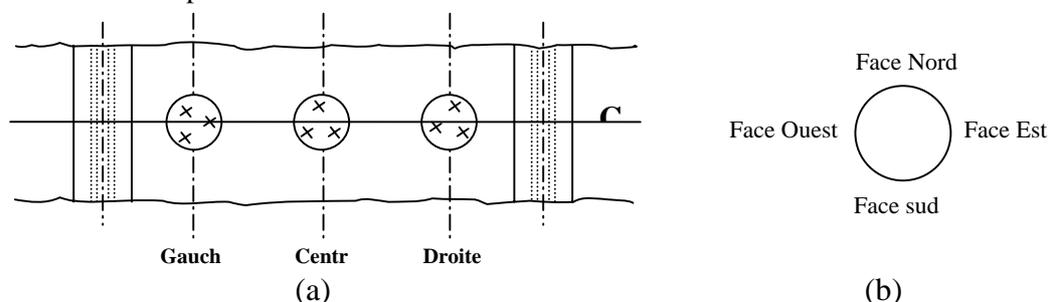


Figure 5: Points de mesures sur une palplanche (a) et sur un pieu (b).

4.4.Résultat d'une campagne de mesure d'épaisseur

Le moyen d'investigation et de reconnaissance de l'état de surface pratiqués est la mesure de perte d'épaisseur, pour cela, des campagnes de mesures par ultra-son sont réalisées sur des surfaces métalliques exposées dans certains ports. Ces mesures ne peuvent porter que sur des surfaces limitées et se réaliser à des périodes espacées compte tenu des coûts de mise en œuvre, ce qui nécessite un échantillonnage représentatif de l'ensemble de la structure. Pour une structure avec des palplanche de 9,50 mm à l'origine le tableau ci dessous présente les épaisseurs résiduelles

Zone	cote (m CM)	Ep. résiduelle moy (mm)	perte épaisseur (mm)
Atmosphérique	7,50	9,40	0,10
Eclaboussure	6,50	9,25	0,25
	5,75	9,24	0,26
marnage	5,00	9,37	0,13
	4,25	9,30	
	3,50	9,24	0,26
	2,75	9,24	0,26
	2,00	8,85	0,65
basses eaux	1,50	8,35	1,15
	1,00	7,18	2,32
	0,50	7,58	1,92
immersion	0,00	8,01	1,49
	-0,50	8,03	1,47
	-1,00	8,06	1,44
	-1,50	8,08	1,42
	-2,00	8,00	1,50
	-2,75	7,89	1,61
	-3,50	8,04	1,46
	-4,25	8,02	1,48
-5,00	8,70	0,80	

La structure présente dans son ensemble des pertes d'épaisseur inférieure à la perte prévue et compensée par l'épaisseur sacrificielle (1,65 mm pour 30 ans). Le seul inconvénient provient de la concentration des fortes pertes aux zone limitées des basses eaux ($0,00 < CM < 1,00$).

5. Différentes dégradations relevées

La forme de dégradation qui apparaît sur une structure dépend de la zone de manifestation et peut induire un désordre en relation avec le départ du matériau retenue (tassement et affaissement), avec la stabilité de l'ouvrage supporté (déformation, fissuration et éclatement) ou avec le fonctionnement de la partie mobile (grippage, rupture et descellement)

5.1. Corrosions dans les basses eaux

L'affaissement d'un quai est souvent provoqué par le départ de matériaux de remblais retenus par le rideau de palplanche ou le gabion. Une déchirure ou perforation apparaît en basses eaux, cet état de dégradation est l'effet de la corrosion très avancée qui n'a pas été décelée et corrigée à temps.



Ce type de désordre est lié à la corrosion accélérée en basses eaux qui se manifeste dans les sites à grande hauteur de marnage. Le mécanisme de corrosion pouvant se développer dans ces conditions est celui de l'aération différentielle avec un rapport de surfaces en contact élevé. La surface cathodique correspond à la surface aérée et mouillée (zone de marnage) et la zone anodique correspond à celle moins aérée et immergée (zone immergée adjacente à la zone aérée)

5.2. Corrosion des têtes de pieux

Les pieux qui supportent un tablier sont souvent corrodés au niveau de la liaison sabot-tête de pieu. Cette corrosion provoque des perforations qui mettent à nu le béton armé du sabot et la corrosion des armatures fragilise cette liaison.

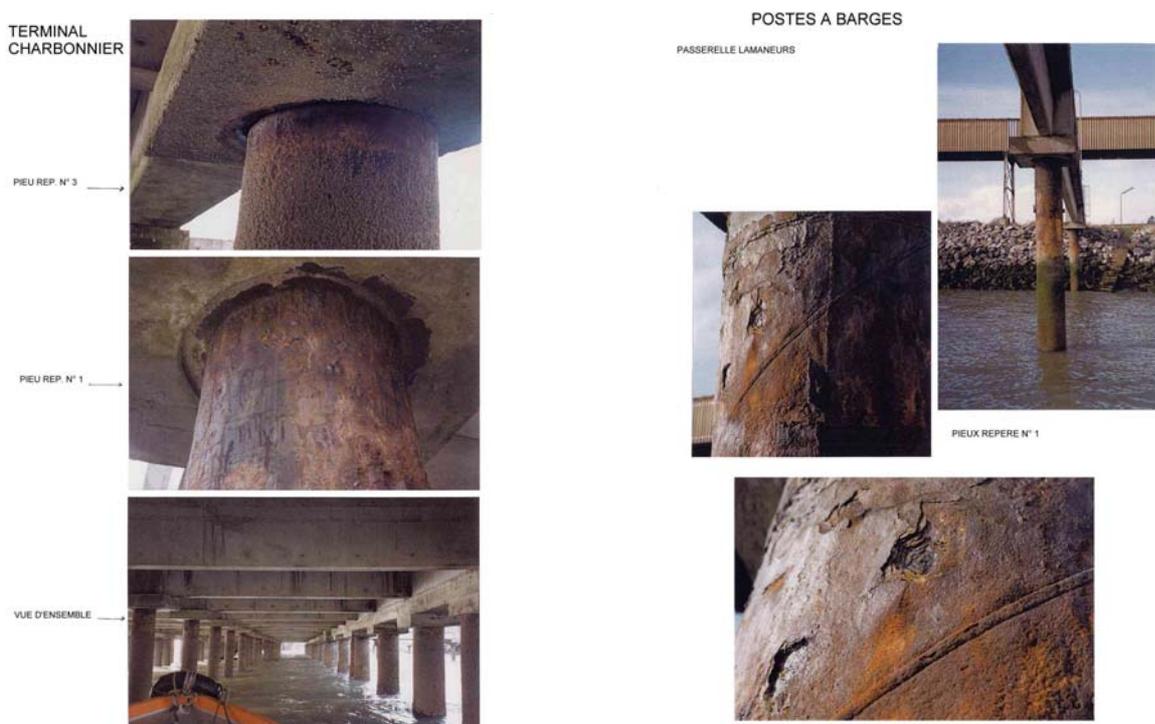


Figure 7: Corrosion des têtes de pieux dans la zone d'éclaboussure.

Dans cette zone la surface anodique est la partie soumise aux éclaboussures et la surface cathodique est constituée par celle en zone de marnage. Le sel déposé par évaporation et humidifié par condensation améliore la conductivité et ainsi se développe une corrosion localisée provoquée par la pile créée.

5.3. Corrosion des liaisons tirants-palplanches

Les rideaux de palplanches de soutènement sont liaisonnés par des nappes de tirants à l'arrière. La liaison par lierne ou non met en contact des matériaux de nuances différentes dans un milieu électrolytique. Lorsque des dispositions constructives ne sont pas correctement adoptées des corrosions par piles galvaniques prennent naissance aux endroits de liaison tirant- lierne-palplanche et se soldent par une ovalisation du passage dans la palplanche et une rupture de la liaison.

6. Conclusion

La corrosion des structures métalliques en mer se manifeste sous différentes formes qui résultent de plusieurs mécanismes. Chaque mécanisme de corrosion (aération différentielle, couplage galvanique, bio corrosion ou corrosion acide) peut être favorisé par les conditions du milieu ambiant en contact avec la structure tel que la salinité, la teneur en oxygène dissous, les salissures et le PH. Les observations relevées sur différentes structures mettent en évidence des zones préférentielles de développement de la corrosion. La zone des basses eaux avec des dégradations aboutissant à des perforations ou des déchirures des palplanches ou tubes en acier est le siège de corrosion par aération différentielle qui souvent se combine à

une activité bactérienne localisée sur des surfaces réduites. Dans la zone des éclaboussures la perforation des têtes de pieux peut entraîner des dommages sévères atteignant les armatures du béton de la structure portée.

Le choix du système de protection repose sur le principe d'une parfaite isolation de la structure (film de peinture) ou celui d'une protection active (protection cathodique). Le système de peinture pour les zones accessibles et hors d'eau, doit remplir la double fonction de protection passive (couches primaires riches en métal) et de séparation du métal et de l'électrolyte (imperméabilité et continuité du film de peinture). Pour les zones immergées seule une protection cathodique correctement dimensionnée [5] peut arrêter la corrosion et éviter le développement d'activités bactériennes.

Pour éviter les formations de couples galvaniques par assemblage bimétallique, des dispositions constructives ou une parfaite isolation de la jointure reste la meilleure protection à adopter.

L'amorçage, la cinétique et la distribution surfacique des zones de corrosion dépendent de plusieurs facteurs qui méritent un examen particulier pour la compréhension du mécanisme de dégradation. Ceci permettra de mieux cibler et adapter les opérations préventives et curatives.

7.Références

1.Dossiers de diagnostics des ouvrages des ports du Havre, Boulogne-sur-mer, Nantes-Saint-Nazaire et Brest.

2.B.Benaïssa, BB, C.Chamboredon, CC, et D.Jaquemain, DJ - Notice STC.QG N° 95.04 : mesures d'épaisseurs résiduelles par us (septembre 1995).

3.B.Benaïssa, BB – La corrosion des structures métalliques dans les ports maritimes chap.17 du livre Bio détérioration des matériaux (EDP-Sciences) page199 année 1998.

4.I.Dupont, ID et B.Benaïssa, BB –Plaquette informative sur la corrosion des structures métalliques portuaires (CETMEF-CRITT) année 2000.

5.Normes EN 12 473 et EN 12 495 : Protection cathodique.