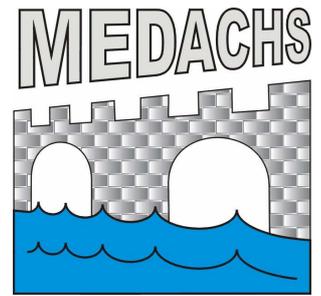




ESPAÑA ESPACIO ATLÁNTICO
FRANCE ESPACE ATLANTIQUE
IRELAND ATLANTIC AREA
PORTUGAL ESPAÇO ATLÂNTICO
U.K. ATLANTIC AREA



MEDACHS - Interreg IIB Atlantic Space - Project N°197

Techniques de prévention des pathologies de corrosion des structures métalliques

Report n°1-1

Steel in marine environment

*SCHOEFS Franck, ANDRE Mathieu, BAZIN Julien,
FOUACHE Cédric, PAYRAUDEAU Hugues
franck.schoefs@physique.univ-nantes.fr*

*ARC'ANTIQUE – 26 rue de la haute forêt – 44300 NANTES
GeM – 1 rue de la Noe – 44300 Nantes*



Projet MEDACHS

Marine Environment Damage to Atlantic Coast Historical and transport works or Structures:
methods of diagnosis, repair and of maintenance.

L'Espace Atlantique, comme toute côte, abrite des infrastructures portuaires, de communication (ponts), ou touristiques. Ces infrastructures sont nécessaires à la vie économique de la région. Elles peuvent être immergées, en zone de marnage, en zone exposée à la houle, ou en zone exposée uniquement aux embruns. Des pathologies communes (comme la corrosion, les attaques biologiques (bactéries, moisissures), la lixiviation...) à ces quatre cas coexistent avec certaines propres à chaque situation, les plus graves étant celles en zones immergées ou de marnage, les moins graves celles en zones terrestres mais exposées aux embruns. Ces pathologies peuvent induire une dégradation structurale, fonctionnelle ou esthétique de l'ouvrage, le taux de détérioration étant fonction de l'emplacement. Une telle dégradation peut avoir comme conséquence une perte de valeur ou de qualité de service de l'ouvrage à un niveau élémentaire ou global.

Les gestionnaires de tels ouvrages sont donc confrontés à des questions du type : quand lancer les opérations d'entretien/réhabilitation ? ou jusqu'à quel degré ou niveau réhabiliter ?. La conséquence principale étant le coût de la réparation. Pour répondre correctement à ces questionnements, les gestionnaires d'ouvrage doivent disposer d'outils les aidant établir un diagnostic, à prévoir l'évolution du dommage avec le temps, afin d'optimiser leurs dépenses d'entretien ou de réhabilitation. Un tel outil doit également pouvoir évaluer des périodes optimales d'intervention permettant d'optimiser la vie entière d'un ouvrage ou d'un réseau de structures.

D'autre part les compagnies/opérateurs chargés d'effectuer le travail de réhabilitation ont également besoin d'informations fiables sur la qualité des produits utilisés en réhabilitation, sur leur durabilité et sur leur adaptation au problème qu'ils ont à résoudre.

Travail de recherches :

- Étude du vieillissement en air salin du bois, de l'acier, de la pierre (selon leur carrière), et du béton armé.
- Étude des outils disponibles des mesures pour évaluer l'état de dégradation des matériaux tant en laboratoire qu'in situ.

- Évaluation de l'état de structure en place (pont en acier ou en béton armé, monument en pierre, structure de bois de construction, quais, quais sur pieux) : mesure à l'aide des outils de CND, modélisation de la structure.
- Définition d'une politique optimale de maintenance pour de telles structures.

Partenaires du projet:

Labein: C/Parque Tecnológico de Bizkaia – Edificio 700 – 48160 – (Bizkaia) – Derio – Spain

ARC'ANTIQUE – 26 rue de la haute forêt – F44300 NANTES – France

CDGA Université de Bordeaux 1, Domaine Universitaire F33405 Talence Cedex – France

Conseil Général de Gironde (CG33): Esplanade Charles de Gaulle F33000 Bordeaux – France

CTBA – Allée de Boutaut – BP 227 – F33028 Bordeaux cedex – France

GeM: 1 rue de la Noe - F44300 Nantes – France

LCPC Nantes: route de Bouaye, BP4129, F44341 Bouguenais Cedex – France

LEPTAB: Université de La Rochelle
Av. Michel Crépeau F17042 La Rochelle cedex – France

Port Autonome Nantes St Nazaire – Service études et Travaux d'Infrastructures – 18 quai Ernest Renaud, BP18609 – F44186 NANTES Cedex 4 – France

Trinity College Dublin: Department of Civil, Structural & Environmental Engineering
Museum Building - Trinity College Dublin
Dublin 2 – Ireland

EP - Estradas de Portugal, E.P.E.
Praça da Portagem – 2809-013 Almada – Portugal

LNEC – Département Matériaux – Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa – France

Site Web: <http://www.medachs.u-bordeaux1.fr>

Content

1	Introduction.....	4
2	Généralités sur la corrosion	4
2.1	Définition.....	4
2.2	Nature de la corrosion.....	4
2.3	Le milieu corrosif	6
3	Conception et maîtrise de la corrosion	7
3.1	Etude de l'environnement.....	7
3.2	Choix de la nuance d'acier	7
3.3	Dimensionnement	8
3.3.1	Pieux	9
3.3.2	Palplanches	9
3.3.3	Remarques	9
3.3.4	Exemple d'un pieu de quai	10
4	La galvanisation.....	12
4.1	Introduction.....	12
4.2	Le principe de la galvanisation	12
4.3	Le processus de galvanisation	13
4.3.1	Préparation des éléments	13
4.3.2	Immersion dans le bain de zinc	14
4.4	Caractéristiques d'un acier galvanisé	15
4.4.1	Résistance	15
4.4.2	Vitesse de corrosion.....	15
4.4.3	Durée de protection.....	15
4.4.4	Recommandation	16
4.5	Normes.....	16
4.5.1	Epaisseur.....	16
4.5.2	Accrochage	17
4.6	Ordre de prix.....	17
5	Peinture	17
5.1	Présentation générale	17
5.2	Mise en œuvre.....	18
5.2.1	Préparation de la surface.....	18
5.2.2	Application de la peinture.....	18
5.2.3	Qualité de mise en œuvre	19
5.3	Ordre de prix d'une prestation de peinture.....	20
6	La protection cathodique	21
6.1	Généralités	21
6.2	Définition.....	21
6.2.1	La protection passive	22
6.2.2	La protection active	22
6.3	Application au cas du Havre et hypothèses de calcul :.....	22
6.3.1	Calcul de la protection cathodique	23
6.3.2	Contrôle des anodes	24
6.3.3	Mise en œuvre des anodes sacrificielles.....	24
6.4	Principe de la protection cathodique par courant imposé.....	26
6.4.1	Principe.....	26
6.4.2	Mise en œuvre des anodes sacrificielles.....	26
6.5	Analyse économique.....	27
7	Conclusion	27
8	Annexes	27
9	Bibliographie et consultations	27

1 Introduction

Comme tous les matériaux de construction, l'acier tend à se dégrader superficiellement lorsqu'il est soumis à des milieux corrosifs comme le sol, l'air et plus particulièrement le milieu marin.

Les techniques de prévention de la corrosion sont diverses : le dimensionnement de l'acier, la protection par peinture ou autre revêtement de surface ou la protection cathodique. Le choix de l'une ou de plusieurs de ces techniques dépend de divers paramètres comme l'agressivité du milieu ambiant, la durée de protection envisagée, les possibilités de mise en œuvre et d'entretien et le coût. Une optimisation technico-économique est à faire entre ces différents facteurs.

Après quelques généralités sur la corrosion, nous exposerons les différentes techniques citées précédemment, en se concentrant uniquement sur celles concernant les pieux et les palplanches en milieu marin.

2 Généralités sur la corrosion

2.1 Définition

La corrosion est une interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant. Elle entraîne des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs.

2.2 Nature de la corrosion

Pour l'acier, la corrosion se traduit par la formation de rouille. Ce produit composé d'oxydes plus ou moins hydratés ne se forme qu'en présence d'oxygène et d'eau à température ordinaire. Cette corrosion est dite aqueuse, et c'est la forme la plus fréquemment rencontrée en construction métallique.

La corrosion est un phénomène électrochimique : cela signifie qu'il se crée des piles à la surface de l'acier, dans lesquelles une des électrodes, l'anode, se consomme au bénéfice de l'autre, la cathode, qui reste intacte. L'électrolyte est constituée par l'eau, plus ou moins conductrice et oxygénée.

Dans la pratique, ces piles se forment dès qu'il y a hétérogénéité à la surface de l'acier et qu'il se crée des zones anodiques et des zones cathodiques. Ces piles se forment également lorsque l'acier est relié à un autre en présence d'électrolyte (couples galvaniques).

Ainsi, à chaque fois que l'acier se trouvera en position anodique, il se corrodera; au contraire, en position cathodique, il restera intact. Ce phénomène se produit fréquemment lorsque les surfaces d'acier sont recouvertes par des écailles de calamine ou de rouille qui sont cathodiques par rapport à leur support. Il est important de comprendre la différence fondamentale qu'il existe entre la rouille et la calamine: la rouille se forme en présence d'humidité et d'air à température ordinaire, tandis que la calamine est une couche d'oxydes qui apparaît à haute température lors de l'élaboration et de la transformation de l'acier; elle a une couleur bleuâtre caractéristique; il est impératif de l'éliminer avant tout revêtement de l'acier.

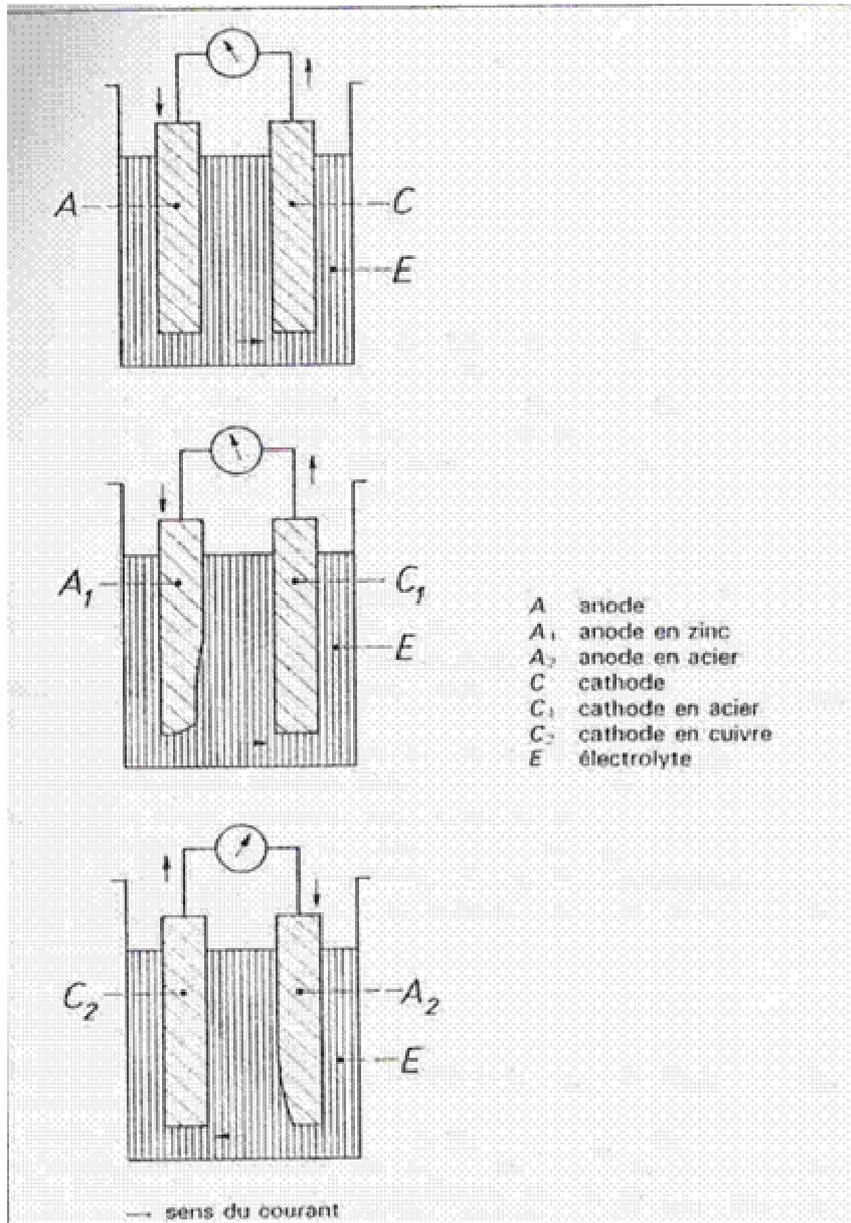


Figure 1: création de couples galvaniques

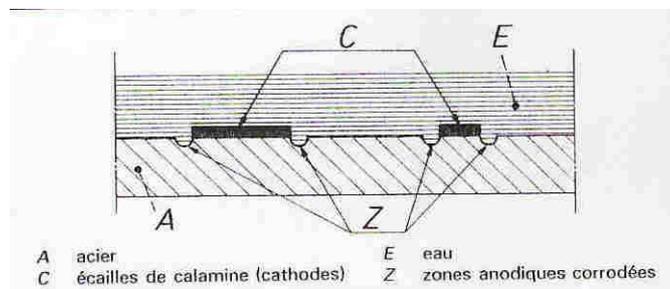


Figure 2 : couples galvaniques calamine-acier

2.3 Le milieu corrosif

Les milieux corrosifs les plus courants sont l'atmosphère, le sol et l'eau. L'eau de mer et l'eau douce sont suffisamment chargées en sels pour être des éléments actifs des piles de corrosion, au contact de l'acier nu. L'eau de pluie et l'eau de condensation de l'humidité atmosphérique ne sont pas chargées de sel et leurs conductivités électriques sont faibles. Cependant, lorsque l'atmosphère contient des impuretés telles que du dioxyde de soufre (SO₂), du dioxyde de carbone (CO₂), des chlorures en bord de mer, et autres composés, l'eau de pluie ou de condensation s'en trouve chargée, devient conductrice et, par suite, peut favoriser la corrosion.

L'eau étant un des éléments nécessaires à la corrosion, il est évident que les structures en acier exposées à l'atmosphère, occasionnellement au contact de l'eau (pluie, condensation), subiront une corrosion moindre que celles constamment ou surtout alternativement immergées et émergées.

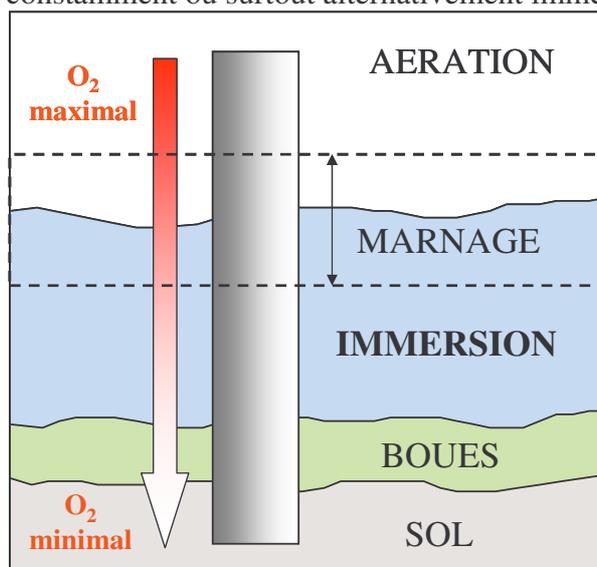


Figure 3 : élément métallique dans l'environnement marin

Aux phénomènes électrochimiques s'ajoutent les phénomènes biologiques que sont les biofilms et les salissures marines.

La figure suivante donne un ordre de grandeur de l'importance des taux de corrosion d'un acier dans différentes atmosphères.

On peut retenir que la *vitesse moyenne* de corrosion d'un acier en eau de mer est de l'ordre de **0,1 mm/an**. Elle est très élevée dans les premiers mois d'immersion puis ralentit progressivement. On explique ce phénomène par la formation, au contact du métal, d'une pellicule de rouille adhérente qui, en s'épaississant, freine la migration de l'oxygène vers l'acier, et ralentit ainsi la vitesse de corrosion. Le comportement de l'ouvrage dans ces premiers mois s'avère donc décisif pour la durée de vie de celui-ci.

L'expérience montre que la corrosion ne devient sensible qu'au-delà d'un certain seuil du *taux d'humidité relative de l'ordre de 50 à 70 %*. Mais la présence de poussières et d'autres dépôts solides étrangers à la surface de l'acier peut abaisser notablement la valeur de ce seuil et favoriser l'apparition de la corrosion. Il en résulte que la pollution atmosphérique, malheureusement importante dans les sites urbains et industriels (comme Saint-Nazaire par exemple), contribue à l'accélération du processus de corrosion. La température joue également un rôle déterminant dans l'accélération du processus chimique d'oxydation : par exemple, une augmentation de 10 °C double la vitesse de réaction. Enfin, l'alternance eau/air dans la zone de marnage amplifie d'autant plus la corrosion des pieux.

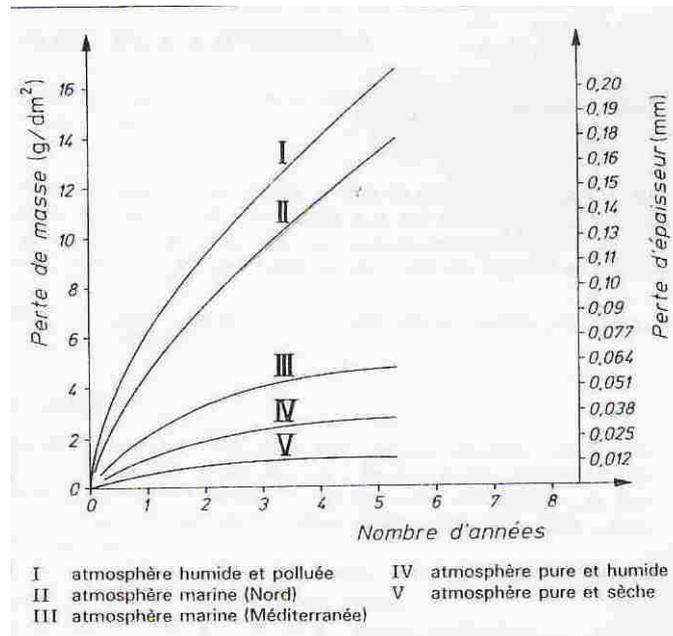


Figure 4 : taux de corrosion d'un acier dans différentes atmosphères

3 Conception et maîtrise de la corrosion

C'est au niveau de la conception que les premières précautions doivent être prises pour gérer la corrosion de l'acier ; ces précautions devront faciliter l'entretien.

3.1 Etude de l'environnement

La première étape consiste à caractériser l'environnement de service dans lequel se situera l'acier. La corrosivité d'un environnement est fonction de l'humidité, la température de l'air, la présence de produits chimiques et leur concentration, la teneur en oxygène, etc. La corrosion ne peut pas survenir en l'absence d'humidité. Les régions côtières sont très corrosives en raison de la présence de fortes concentrations d'ions chlorure dans l'air, et par conséquent, les structures exposées au marnage mais également aux embruns sont particulièrement sensibles aux attaques corrosives.

3.2 Choix de la nuance d'acier

L'étape la plus importante dans la prévention des problèmes liés à la corrosion est le choix d'une nuance d'acier appropriée, accompagnée de méthodes de fabrication adaptées pour l'environnement donné. Toutefois, même après avoir prescrit un acier particulier, il est nécessaire de soigner les détails constructifs et la mise en œuvre afin d'obtenir la meilleure résistance à la corrosion.

Le tableau ci-dessous de l'Eurocode 3, donne les choix possibles de nuances d'acier selon l'environnement.

Nuance d'acier selon EN 10088	Type d'environnement et catégorie de corrosion											
	Rural			Urbain			Industriel			Marin		
	Faible	Moy.	Élevée	Faible	Moy.	Élevée	Faible	Moy.	Élevée	Faible	Moy.	Élevée
1.4301 1.4311 1.4541 1.4318	✓	✓	✓	✓	✓	(✓)	(✓)	(✓)	X	✓	(✓)	X
1.4401 1.4404 1.4406 1.4571	□	□	□	□	✓	✓	✓	✓	(✓)	✓	✓	(✓)
1.4439 1.4462 1.4529 1.4539	□	□	□	□	□	□	□	□	✓	□	□	✓

Conditions de corrosion :

Faible : Conditions corrosives les plus réduites pour ce type d'environnement. Par exemple les cas tempérés par une faible humidité ou de basses températures.

Moy. : Assez typiques pour ce type d'environnement.

Élevée : Corrosion susceptible d'être plus forte que dans les conditions typiques pour ce type d'environnement. Par exemple aggravée par une humidité élevée persistante, des températures ambiantes élevées, ou des polluants atmosphériques particulièrement agressifs.

Légende :

□ Surestimation potentielle du point de vue de la corrosion.

✓ Probablement le meilleur choix pour la résistance à la corrosion et le coût.

X Susceptible de subir une corrosion excessive.

(✓) Digne d'être envisagé à condition de prendre des précautions appropriées (c'est-à-dire de prévoir une surface relativement lisse et un lavage ultérieur régulier).

Figure 5 : environnement et corrosion

3.3 Dimensionnement

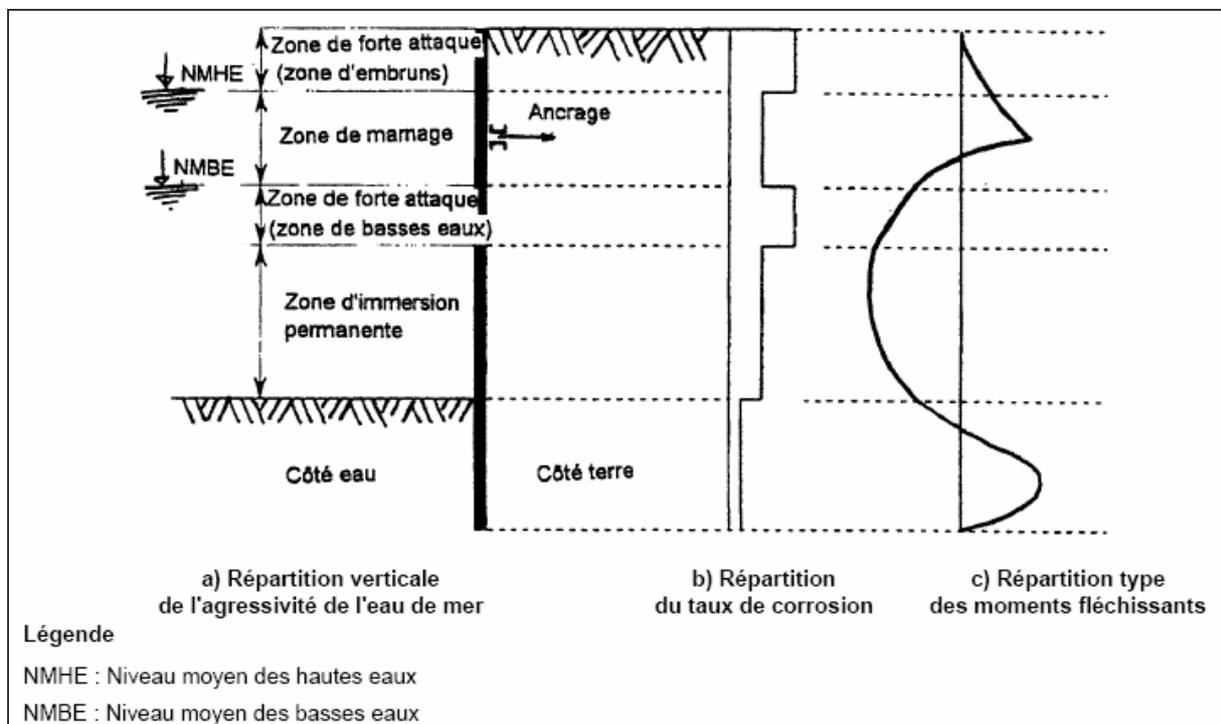


Figure 6 : exemple de répartition du taux de corrosion

Selon l'agressivité de l'environnement de l'élément en acier, des mesures de protection contre les effets de la corrosion doivent être prises si d'éventuelles pertes d'épaisseur d'acier sont prévisibles. Si la

corrosion doit être prise en compte dans le calcul par une réduction d'épaisseur, les taux de corrosion doivent être donnés dans le cahier des charges du projet. L'utilisation d'une épaisseur d'acier supplémentaire peut donc apparaître dans les calculs afin de prendre en compte de la corrosion et respecter la durée de vie de la structure.

Dans ce paragraphe nous donnons des indications sur la perte d'épaisseur des pieux en acier et des palplanches en acier provoquée par la corrosion.

3.3.1 *Pieux*

Sauf spécification différente, pour les états limites ultimes et de service, il convient de prendre la perte d'épaisseur (en millimètres) provoquée par la corrosion des pieux sur la face en contact avec le sol, avec ou sans nappe phréatique, dans le **Tableau 1** (Figure 7) et pour les pieux situés dans l'eau dans le **Tableau 2** (Figure 8), en fonction de la durée de vie de calcul exigée pour la construction.

La perte d'épaisseur provoquée par la corrosion atmosphérique peut être prise égale à [0,01] mm par an en atmosphères normales, et à **[0,02] mm par an dans les emplacements proches de la mer**. En effet il convient que le calcul prenne en compte le fait que les pieux peuvent être en contact avec le sol sur la totalité de leur longueur ou seulement sur une partie.

Sauf spécification différente, la corrosion à l'intérieur de pieux creux dont les extrémités sont hermétiquement obturées ou remplis de béton peut être négligée.

3.3.2 *Palplanches*

De même que pour les pieux, il convient de prendre la perte d'épaisseur pour les parties de rideaux de palplanches en contact avec le sol, avec ou sans nappe phréatique, dans le **Tableau 1**, en fonction de la durée de vie de calcul exigée pour la construction. Lorsque des palplanches se trouvent en contact avec le sol sur leurs deux faces, les taux de corrosion s'appliquent sur chaque face.

Sauf spécification différente, il convient de prendre la perte d'épaisseur pour les parties non protégées de rideaux de palplanches en contact avec de l'eau de rivière ou de mer, dans le **Tableau 2**, en fonction de la durée de vie de calcul exigée pour la construction.

Comme pour les pieux la perte d'épaisseur provoquée par la corrosion atmosphérique peut être prise égale à [0,01] mm par an en atmosphères normales, et à **[0,02] mm par an dans les emplacements proches de la mer**. Si l'agressivité du sol ou de l'eau est différente sur les côtés opposés d'un rideau de palplanches, deux taux de corrosion différents peuvent être appliqués.

Si la durée de vie de calcul spécifiée en exploitation est supérieure à la durée de vie réelle du revêtement, la perte d'épaisseur qui se produit pendant le restant de la durée de vie en exploitation doit être prise en compte dans les vérifications aux états limites de service et aux états limites ultimes.

3.3.3 *Remarques*

Une combinaison de différentes mesures de protection pourrait s'avérer utile pour obtenir une durée de vie en exploitation élevée. Le système de protection peut être défini en prenant en compte le calcul de la structure et du revêtement de protection ainsi que la faisabilité des contrôles.

La possibilité que la corrosion ne soit pas uniforme sur la totalité de la longueur d'un profilé peut être prise en compte, en permettant une conception économique par le choix d'une répartition des moments adaptée à la répartition de la corrosion.

En ce qui concerne les cordons de soudures il faut s'assurer qu'ils soient continus. On supprime ainsi les interstices et facilite également l'application de peinture.

Les effets suivants exercent une influence importante sur les taux de corrosion donnés dans les Tableaux 1 et 2 :

- présence ou non en zone de marnage ;
- en mer ou estuaire ;
- le taux d'oxygène.

Durée de vie de calcul exigée	5 ans	25 ans	50 ans	75 ans	100 ans
Sols naturels intacts (sable, limon, argile, schiste, ...)	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Sols naturels pollués et terrains industriels	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Sols naturels agressifs (marais, marécages, tourbe, ...)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Remblais non compactés et non agressifs (argile, schiste, sable, limon, ...)	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Remblais non compactés et agressifs (cendres, scories, ...)	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75
NOTES :					
1) Les taux de corrosion dans les remblais compactés sont inférieurs à ceux observés dans les remblais non compactés. Dans les remblais compactés, il convient de diviser par deux les chiffres du tableau.					
2) Ces valeurs sont données uniquement à titre indicatif. Il convient d'étudier les conditions locales car elles peuvent affecter le régime de corrosion réel, qui peut être supérieur ou inférieur à la valeur moyenne donnée dans le tableau.					
3) Les valeurs données pour 5 ans et 25 ans sont basées sur des mesures, tandis que les autres valeurs sont extrapolées.					

Figure 7 : perte d'épaisseur [mm] provoquée par la corrosion pour les pieux et les palplanches mis en place dans les sols, avec ou sans nappe phréatique

Durée de vie de calcul exigée	5 ans	25 ans	50 ans	75 ans	100 ans
Eau douce ordinaire (rivière, canal navigable, ...) dans la zone d'attaque élevée (ligne d'eau)	0,15	0,55	0,90	1,15	1,40
Eau douce très polluée (égouts, effluent industriel, ...) dans la zone d'attaque élevée (ligne d'eau)	0,30	1,30	2,30	3,30	4,30
Eau de mer sous climat tempéré dans la zone d'attaque élevée (basses eaux et zones de clapotis)	0,55	1,90	3,75	5,60	7,50
Eau de mer sous climat tempéré dans la zone d'immersion permanente ou dans la zone de marnage	0,25	0,90	1,75	2,60	3,50
NOTES :					
1) Le régime de corrosion le plus élevé se trouve habituellement au niveau de la zone de clapotis ou à l'emplacement du niveau des eaux à marée basse. Cependant, dans la plupart des cas, les contraintes les plus élevées se situent dans la zone d'immersion permanente, voir Figure 2.1.					
2) Ces valeurs sont données uniquement à titre d'indication. Il convient d'étudier les conditions locales car elles peuvent affecter le régime de corrosion réel, qui peut être supérieur ou inférieur à la valeur moyenne donnée dans le tableau.					
3) Les valeurs données pour 5 ans et 25 ans sont basées sur des mesures, tandis que les autres valeurs sont extrapolées.					

Figure 8 : perte d'épaisseur [mm] provoquée par la corrosion pour les pieux et les palplanches mis en place dans l'eau douce ou dans l'eau de mer

3.3.4 Exemple d'un pieu de quai

Nous avons pris l'exemple d'un pieu d'un quai du terminal agro-alimentaire du Port de Montoir. Ce quai est un quai sur pieux (coupe ci-dessous) construit dans les années 70 soit il y a environ 25 ans. Des mesures de pertes d'épaisseur ont été réalisées par le Port Autonome. Si on les compare aux valeurs données dans le tableau ci-dessus, on s'aperçoit que les valeurs sont proches de la réalité.

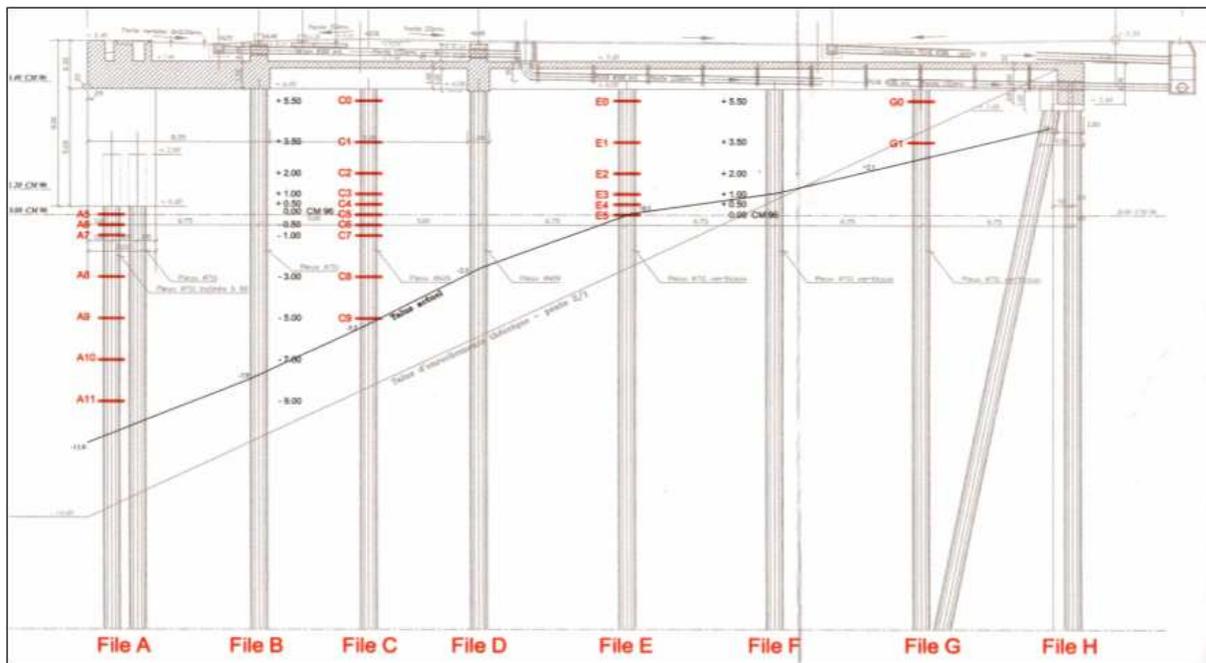
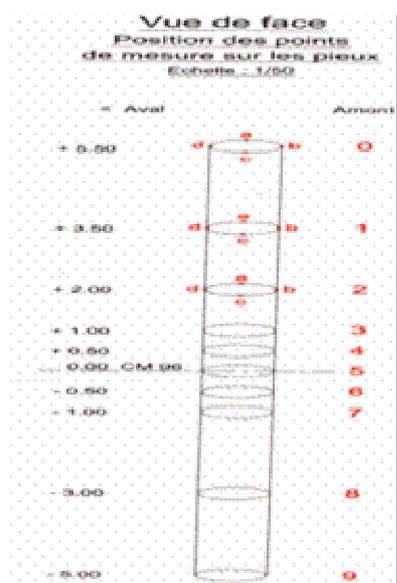


Figure 9-1 : coupe du poste agro-alimentaire



	A
5,50	
3,50	
2,00	
1,00	
0,50	
0,00	2,83
-0,50	2,40
-1,00	2,56
-3,00	2,46
-5,00	2,17
-7,00	2,58
-9,00	2,61

Figure 10 -2: Mesures de pertes d'épaisseur en mm sur les pieux de la file A :

Nous avons remis en forme le calcul simplifié d'un de ces pieux à l'Eurocode 4 (voir en annexe). Nous avons fait varier l'épaisseur du pieu dans le programme afin de voir l'évolution du facteur de sécurité et nous avons obtenu les résultats suivants :

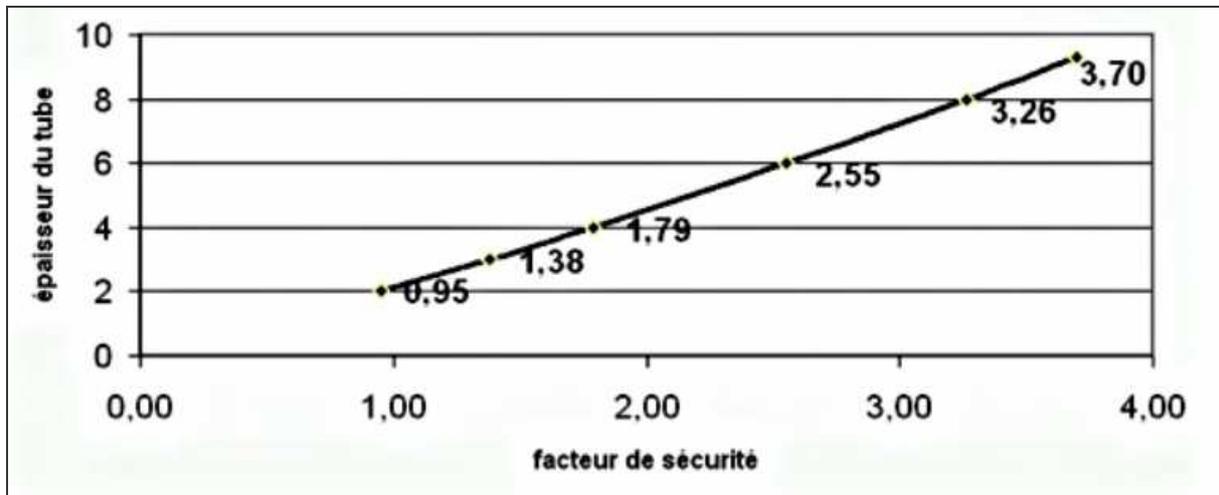


Figure 11 : variation du facteur de sécurité en fonction de l'épaisseur du tube pour une charge de 6 t/m²

On obtient par exemple un facteur de sécurité de 1,5 avec une épaisseur de tube 3 mm. D'après les données de l'Eurocode, si nous voulons garantir un facteur de sécurité de 1,5 sur 25 ans il faudrait ajouter 1,90 mm d'épaisseur. (Tableau 2 : 25 ans zone de clapotis). Etant donné les prix actuels de l'acier il serait plus intéressant d'allier une sur-épaisseur avec un autre procédé de prévention

4 La galvanisation

4.1 Introduction

L'histoire de la galvanisation a commencé en l'an 1712, où le chimiste français Melouin, lors d'une présentation à l'Académie royale française, décrivait une méthode de protection du fer par immersion dans une solution de zinc en fusion.

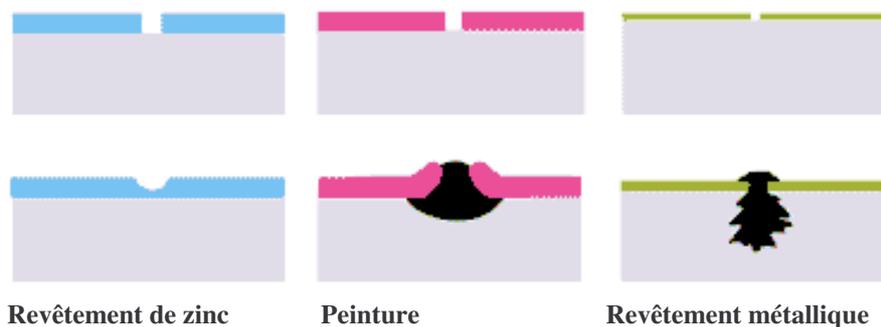
Il existe de nos jours différentes protections à base de zinc appelées zingage, mais dans le milieu de la construction, la galvanisation est la technique la plus utilisée, mais reste rare comme protection de pieux et de palplanches.

4.2 Le principe de la galvanisation

Le but premier de la galvanisation est de recouvrir l'acier d'une couche de zinc qui agira contre la corrosion. En effet, l'oxydation du zinc est lente comparativement à celle de l'acier.

Il est aussi possible d'ajouter de l'aluminium au zinc. Cet ajout produit un enduit qui procure une résistance accrue contre la corrosion en plus de mieux résister à la micro fissuration et le fendillement lors du façonnage ou suite aux impacts. Mais ce produit reste néanmoins peu utilisé.

Le zinc constitue également une protection sacrificielle en cas de blessure ou de discontinuité de revêtement, grâce à l'effet de pile produit entre l'acier et le zinc. Cette protection cathodique très efficace est spécifique à la galvanisation. Les revêtements organiques (peintures) ou les autres revêtements métalliques n'offrent pas cette seconde protection.



<p>Une pile fer-zinc fonctionne en présence d'humidité. Les sels de zinc produits par la réaction anodique polarisent la pile : pas de corrosion de l'acier.</p>	<p>L'acier rouille à l'endroit de la rayure. L'oxydation se propage sous le film de peinture qui se soulève. En l'absence de réparation, la corrosion de l'acier continue.</p>	<p>plus électro-positif que l'acier par exemple : nickel, chrome, cuivre. L'acier protège cathodiquement le revêtement et s'oxyde à l'endroit du défaut sous forme de corrosion par piquûre.</p>
--	--	---

Figure 12 : comparatif du comportement aux blessures entre la galvanisation et les autres protections

Lorsque deux métaux sont en contact, un courant électrique est généré. Lorsque le courant passe, l'un des métaux se corrode plutôt que l'autre. Ce comportement est due aux propriétés atomiques des métaux, qui ne peuvent pas être modifiées, de telle sorte que ces effets sont déterministes.

En ce qui concerne l'acier, composé en majorité de fer, le zinc est un métal protecteur électrochimique.

4.3 *Le processus de galvanisation*

Il existe 3 techniques de galvanisation :

- Par immersion : pour des éléments neufs et de dimensions compatibles avec la taille des bains.
- La projection : nommée métallisation sera retenue pour la rénovation ou les éléments de grandes dimensions n'entrant pas dans les bains.
- L'électrolyse : convient bien aux pièces de petites dimensions et de grande série (pas utilisé en Génie Civil).

En ce qui concerne les ouvrages en milieu marin, la méthode utilisée est la galvanisation par immersion. C'est pourquoi nous ne traiterons, par la suite, que ce procédé.

4.3.1 *Préparation des éléments*

La galvanisation de pièces nécessite, avant l'immersion à l'intérieur du bain de zinc fondu, une préparation de surface selon des étapes bien définies. On retrouve généralement trois étapes de préparation de surface ; le dégraissage, le décapage et le fluxage. Ces étapes vont avoir une incidence directe sur la réaction entre le zinc liquide et l'acier, donc sur la performance du revêtement en service :

- Le dégraissage enlève toutes les salissures et graisses qui empêcheraient la dissolution des oxydes de fer superficiels.
- Le décapage élimine l'oxyde en surface.
- Le fluxage évite à l'acier de se réoxyder entre la sortie du décapage et l'entrée dans le bain de zinc, et favorise la réaction métallurgique fer-zinc.

Les problèmes liés à la galvanisation découlent dans la majorité des cas d'une mauvaise préparation. Comme mentionné précédemment, les étapes de préparation de surface seront critiques à l'obtention d'un revêtement de qualité.



La photo ci-contre présente un défaut de surface associé à une mauvaise préparation de surface. Les résidus de peinture, d'huile et/ou de graisse restés sur une petite zone du profilé en acier n'ont pas permis d'obtenir une bonne adhérence du zinc liquide lors du traitement de galvanisation à chaud.



La photo suivante révèle un problème généralement rencontré au niveau de pièces mises en contact soit par soudage ou par toute autre technique. Après galvanisation, il arrive souvent que des dépôts d'acides (utilisés lors du décapage) restent emprisonnés entre les surfaces et réagissent avec le revêtement de zinc causant l'apparition de traces de rouille.

Figure 13 : exemples de problèmes courants

4.3.2 Immersion dans le bain de zinc

La durée d'immersion, qui dépend du volume de la pièce, doit être suffisante pour permettre d'obtenir l'épaisseur nécessaire de protection, c'est-à-dire jusqu'à la fin de l'évolution (instant où la pièce aura atteint la même température que le zinc, soit environ 450°C). Ce temps varie également entre 3 et 10 minutes et peut dépasser 15 minutes pour des pièces massives.

Lorsque l'on immerge un élément en acier dans le zinc liquide et qu'on le retire du bain, il n'y a pas simplement entraînement et solidification du zinc en surface de l'acier, mais réaction métallurgique de diffusion entre le zinc et le fer, avec formation de couches d'alliage Fer-Zinc. La galvanisation est donc une forme de lien métallurgique entre le zinc et la sous-couche d'acier créant une barrière qui devient part entière du métal.

La dureté des différents composés Fer-Zinc formés en surface contribue à améliorer la résistance au frottement et à l'abrasion.

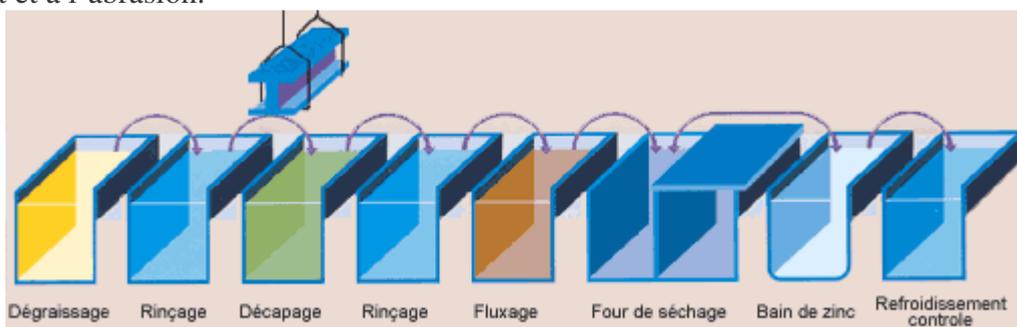


Figure 14 : processus de galvanisation

4.4 Caractéristiques d'un acier galvanisé

4.4.1 Résistance

Le revêtement de galvanisation à chaud est unique du fait de ses propriétés de dureté et de résistance. Les aciers doux classiques ont une dureté Vickers d'environ 160. Les couches d'alliage du revêtement sont bien plus dures, jusqu'à environ 240, tandis que le zinc à la surface est plus mou que l'acier ou les alliages. Le zinc est assez ductile et absorbe les chocs mais si le revêtement reçoit un choc sévère, les couches d'alliage sont souvent plus dures que l'acier lui-même, de telle sorte que le dommage ne peut pas atteindre l'acier sous-jacent.

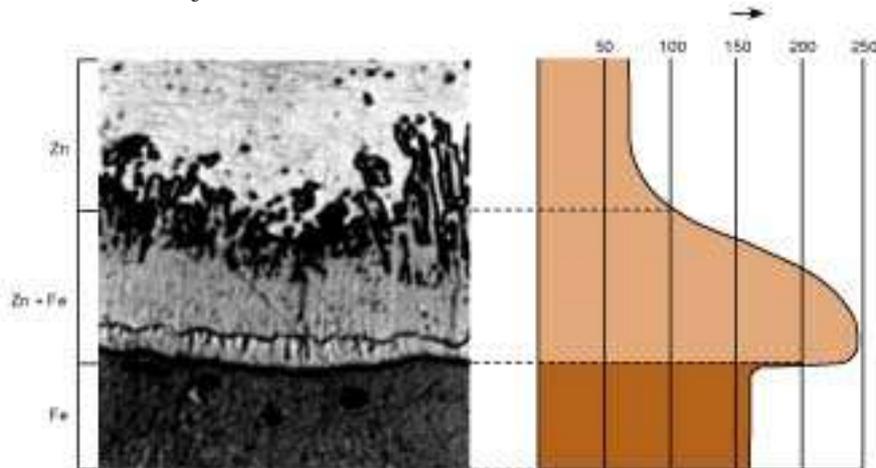


Figure 15 : diagramme de la dureté de chacune des couches, l'unité de mesure utilisée est la Dureté Vickers (Hv)

La première couche d'alliage est soudée à l'acier, mélangée atome par atome. Même si un choc sur le revêtement réussit à l'écailler en partie, la couche de base reste, offrant une protection électrochimique.

4.4.2 Vitesse de corrosion

Un produit fini galvanisé à chaud présente une très faible vitesse de corrosion dans le temps. Cette vitesse de corrosion est sensible aux agents qui contribuent à l'oxydation du zinc.

Le milieu marin est évidemment très agressif. On peut y trouver des vitesses de corrosion, sur des éléments aciers, atteignant plus de 4 microns/an. Ces vitesses peuvent également être accélérées en présence de pollution industrielle (ports industriels).

4.4.3 Durée de protection

Cette protection est malgré tout limitée dans le temps, elle cesse lorsque tout le revêtement est consommé par la corrosion.

La durée de protection est principalement fonction de l'épaisseur de la couche de galvanisation. Les 3 facteurs les plus déterminants, de cette épaisseur, sont :

- *L'épaisseur de paroi de l'acier* : les épaisseurs minimales locales et moyennes en fonction de l'épaisseur de l'acier sont données par la norme de galvanisation.
- *La composition de l'acier* : plus particulièrement sa teneur en silicium et en phosphore. Ces dernières déterminent la « réactivité » de l'acier vis-à-vis du zinc fondu. Les aciers réactifs donnent des couches épaisses de couleur gris terne présentant un aspect rugueux et irrégulier.

- **Rugosité de l'acier** : un acier dont la surface est fort rugueuse présente une surface spécifique importante et réagira dès lors de manière plus violente avec le zinc fondu. A composition d'acier égale, l'épaisseur de couche sera donc plus importante sur une surface rugueuse. Parfois, la surface de l'acier est rendue rugueuse intentionnellement afin d'obtenir des couches plus épaisses.

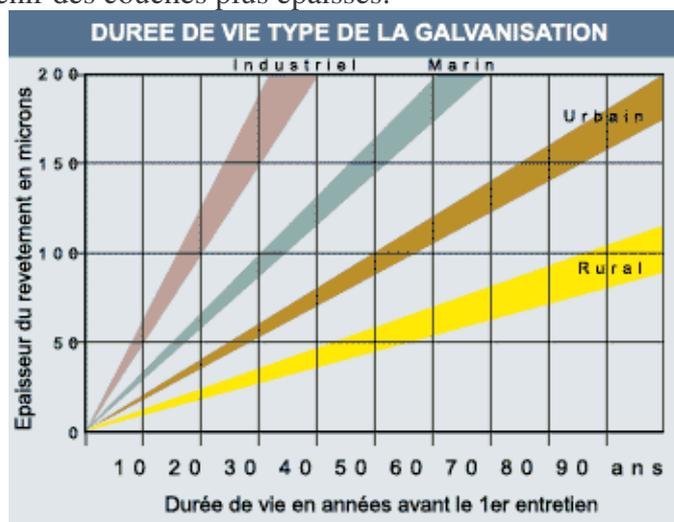


Figure 16 : durée de vie d'un élément galvanisé

4.4.4 Recommandation

Avant de souder les pièces galvanisées, il est recommandé d'enlever le revêtement dans la zone du cordon de soudure. Après soudure la zone affectée sera protégée par peinture riche en zinc.

Tous les aciers galvanisés peuvent être peints pour modifier l'aspect de surface. La couche de peinture en protégeant du contact de l'air améliore alors la durée de vie et le support en zinc permet des remises en état facilitées. Il suffit de brosser la peinture endommagée et d'appliquer la nouvelle couche de peinture pour rénover la surface.

4.5 Normes

En février 1999, la norme Européenne de galvanisation EN ISO 1461 est entrée en vigueur dans tous les pays du CEN (Comité Européen de Normalisation).

En conséquence, ces pays retirent leur ancienne norme nationale et adoptent la nouvelle norme Européenne.

4.5.1 Epaisseur

Les épaisseurs minimales, locales ou moyennes, pour le procédé normal par immersion, sont présentées dans le tableau suivant.

Epaisseurs de la pièce	Epaisseur locale de revêtement (en micromètres) μm	Epaisseur moyenne de revêtement (en micromètres) μm
acier \geq 6mm	70	85
acier \geq 3mm à 6mm	55	70
acier \geq 1,5mm à 3mm	45	55
acier < 1,5mm	35	45
pièces moulées \geq 6mm	70	80

pièces moulées < 6mm	60	70
----------------------	----	----

Figure 17 : épaisseurs de revêtement minimales sur des échantillons non centrifugés

4.5.2 Accrochage

En contradiction avec la plupart des anciennes normes nationales, la EN ISO 1461 stipule qu'il n'y a pas, pour l'instant, de méthode appropriée pour la détermination de l'accrochage de la couche de zinc. Les pays du CEN s'efforcent de mettre au point une procédure d'essai représentative qui serait reprise dans la 2ème version de l'EN ISO 1461.

4.6 Ordre de prix

Le prix d'une galvanisation, dépend essentiellement de l'épaisseur de l'élément (exprimée en m²/tonne). En effet l'épaisseur de la couche de zinc augmente avec l'épaisseur de l'élément.

En ce qui concerne les palplanches, la surface par tonne est de l'ordre de **7 m²/t, et le prix de galvanisation est de l'ordre de 20 €/m².**

Quant aux pieux, si on considère un **diamètre 800, la surface correspondante est de 21 m²/tonne (intérieur et extérieur), le prix de galvanisation est alors de l'ordre de 10 €/m².**

Nous avons donc vu comment fonctionnait la galvanisation, rarement utilisée pour des ouvrages portuaires. Nous allons désormais voir les techniques les plus courantes en terme de prévention de la corrosion en milieu marin.

5 Peinture

5.1 Présentation générale

Le traitement de surface par une peinture anticorrosive est une méthode très courante en terme de prévention des ouvrages métalliques (**85 % des surfaces protégées**), et plus particulièrement en milieu marin. Cette technique présente l'avantage de pouvoir traiter la plupart du temps les éléments en usine avant de les amener sur chantier. On a donc une facilité de mise en œuvre et de ce fait un avantage économique. C'est en grande majorité sur les pieux que ce type de protection est effectué.

Les systèmes appliqués sont choisis dans la liste des systèmes certifiés par l'Association pour la Certification et la Qualification en Peinture Anticorrosion (ACQPA). L'ACQPA regroupe à la fois des maîtres d'ouvrage (SNCF, TOTAL, GDF etc.), des bureaux de contrôle, des fabricants de peinture, des applicateurs de peinture et des membres de L'OHGPI (Office d'Homologation et de Garantie des Peintures Industrielles). Elle s'est substituée en 1998 à la Commission Interministérielle d'Homologation (CIH) qui, jusqu'à cette date avait en charge l'homologation des produits.

Les systèmes certifiés font l'objet d'une liste éditée et mise à jour annuellement par l'ACQPA. Cette liste vise les structures en mer, mais aussi les ouvrages de Génie Civil ou les bâtiments, les structures industrielles ainsi que les équipements divers en fer, fonte ou acier dont les éléments ont une épaisseur minimale de 3 mm. Sont concernés les travaux neufs et la maintenance des ouvrages dont les supports sont, soit bruts, soit galvanisés, soit métallisés.

La marque ACQPA attribuée aux systèmes de peinture offre aux maîtres d'ouvrages (état, collectivités territoriales) un ensemble de garanties et d'aptitude à l'emploi (tenue anticorrosion supérieure à 15 ans).

5.2 Mise en œuvre

5.2.1 Préparation de la surface

Les surfaces à peindre doivent être propres, débarrassées de la rouille et de la calamine (ton bleu noir). Les éléments en acier arrivant à l'atelier ou sur site déjà oxydés, on a recours à différentes techniques de décapage : brossage, piquage, martelage ou projection d'abrasifs (grenaillage). Le grenaillage par sable est la technique la plus couramment utilisée. Les ateliers sont souvent équipés de cabines de grenaillage, qui récupèrent le sable en circuit fermé. Sur chantier, cette récupération est une contrainte environnementale assez lourde. La qualité de préparation de la surface est fonction du type de peinture à appliquer (notion de degré de soin DS). Le contrôle de la rugosité peut se faire à l'aide d'un cadran présentant des surface appartenant à 4 domaines de rugosité différents, permettant une comparaison à la fois tactile et visuelle. On peut aussi utiliser une sonde à courant de Foucault (microtest).



Figure 18 : unité de grenaillage

Parfois, un dégraissage à l'aide de lessives alcalines ou de détergents est nécessaire. Cette opération doit alors précéder le décapage.

5.2.2 Application de la peinture

Les travaux de peinture doivent se dérouler à l'abri des poussières et des intempéries, en dehors des périodes de gel et par un ensoleillement modéré en respectant la fiche technique du produit, en particulier la notion de point de rosée. La température du point de rosée (TPR) se calcule à partir d'un abaque extrait de la norme NF EN ISO 8502-1, en fonction du pourcentage d'humidité relative (HR) et de la température ambiante (TA).

Exemple : avec $TA = 20^{\circ}\text{C}$ et $HR = 60\%$, on a $TPR = 12^{\circ}\text{C}$

Afin d'éviter tout problème de condensation sur le support (source de formation de cloques), la température du support doit être supérieure de 3°C à la température du point de rosée. Pour notre exemple, il faut donc que la température du support soit de $12 + 3 = 15^{\circ}\text{C}$.

Les produits de peinture sont généralement mis en œuvre en 3 couches :

- Une couche primaire (40 à 50 μm): couvrant le support, elle assure l'adhérence et doit être compatible avec le matériau.

- Une couche intermédiaire (plus épaisse): elle permet la liaison entre primaire et finition et la maîtrise des épaisseurs en fonction de la durée de vie envisagée.
- Une couche de finition (encore plus épaisse) : résistante aux agressions externes, elle joue un rôle esthétique.

Cependant pour les milieux marins, la tendance est à l'utilisation de bicouches (avec des épaisseurs plus épaisses), sauf en offshore où l'on peut avoir 4 couches.

Les peintures sont mises en oeuvre par des méthodes manuelles (brosse ou rouleau), des moyens mécanisés (pistolet pneumatique,) ou encore par procédé électrostatique. Des exigences sont spécifiées pour chaque méthode.



Figure 19 : application par pistolet pneumatique

Pour s'assurer de l'efficacité de la protection, l'application de la couche primaire doit être exécutée rapidement après la préparation de la surface, afin d'éviter une oxydation de l'acier. Le cas échéant, une élimination de la rouille en formation (non adhérente), sera effectuée par un brossage des surfaces concernées.

5.2.3 *Qualité de mise en oeuvre*

Le succès de la protection anticorrosion dépend pour plus de 50 % de la qualité de mise en oeuvre des produits certifiés.

Il existe une fiche descriptive et d'emploi pour chaque produit certifié par l'ACQPA (voir exemple en annexe). Le respect des indications de cette fiche est indispensable à l'efficacité du produit. Les principales indications mentionnées sont les suivantes :

- Destination du produit (ex : parties immergées en eau de mer)
- Nom du fabricant
- Préparation de la surface (ex : projection d'abrasif Sa3 avec une rugosité Moyen G)
- Nombre de couches, constituants, épaisseurs
- Conditions atmosphériques durant l'application et le séchage (températures et hygrométries maxi et mini)
- Durée de séchage, délai de recouvrement
- Mode d'application et dilution
- Caractéristiques des diluants

Les contrôles minimum à effectuer sont les conditions climatiques et les épaisseurs de couches. Ces dernières peuvent être contrôlées en état humide (à l'aide d'un peigne spécifique) et/ou sec (sondes électromagnétiques). Dans le offshore, les exigences sont plus nombreuses.

5.3 *Ordre de prix d'une prestation de peinture*

Le coût d'une telle prestation s'exprime en € par m² de surface à peindre. La détermination du prix dépend de plusieurs facteurs :

- Le type de peinture
- Le nombre de couches
- La géométrie (facilité d'application ou non)
- La surface (le prix au m² va être négocié en fonction d'importance des travaux)
- Le lieu d'exécution : en atelier ou sur site (accessibilité)

Un point aussi très important à considérer est le coût de manutention, qui peut parfois s'avérer être plus élevé que celui de la prestation de peinture elle-même, notamment pour les tubes.

Exemple: pieux du quai poste 4 Cheviré Aval à Nantes

Le chantier qui s'est déroulé en 2002-2003 concernait la confection d'un quai d'une longueur de 180 m par 34,5 m de largeur. Il s'agissait d'un quai classique d'une dalle reposant sur les pieux dont le maillage est rectangulaire.

Les pieux étant soumis aux agressions du milieu marin (houle, vent, marée...), ceux-ci ont nécessité une protection par peinture avant d'être acheminés sur le site pour être battus. La peinture utilisée est de type IM2 (2 couches, 3 couches à l'époque).

Pour l'entreprise sous-traitante chargée de cette affaire, il y avait en tout 185 pieux tubes à peindre. Chaque pieu est composé de trois tubes de 18 m de long. Les tubes sont amenés dans l'état à l'atelier de peinture, sont grenailés puis peints selon la procédure en vigueur. Ils sont ensuite acheminés sur site pour être battus et soudés entre eux à l'avancement du battage. On repeint ensuite une certaine bande autour des soudures pour assurer la continuité de la protection.

Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire (€)	Total (€)
Peinture sur pieux	m ²	5200	19,00	98 800,00

Figure 20 : prix de vente de la prestation

La prestation a nécessité 1000 h de travail. Elle a été évaluée à 98 800 €, ce qui représente environ 3% du projet global.



Figure 21 : chantier du quai poste 4

Actuellement, pour une IM2, il faut compter environ 26 €/m². Pour un Batofleck, on se rapproche des 36 €/m².

6 *La protection cathodique*

6.1 *Généralités*

Le but de cette méthode est de protéger les structures immergées. Pour cela il faut éviter la réaction anodique de corrosion du fer par rapport d'électrons. La corrosion provoque une modification des paramètres physico-chimiques :

- Augmentation du pH
- Formation d'un dépôt calco-magnésien.

6.2 *Définition*

On rappelle qu'un métal en contact avec un milieu conducteur, eau ou sol, est le siège de réactions électrochimiques appelées effet de pile. Ce phénomène entraîne une dissolution du métal de l'anode vers la cathode, c'est-à-dire de l'élément vers le milieu ambiant : c'est la corrosion ou oxydation. Deux moyens complémentaires existent pour maîtriser cette corrosion :

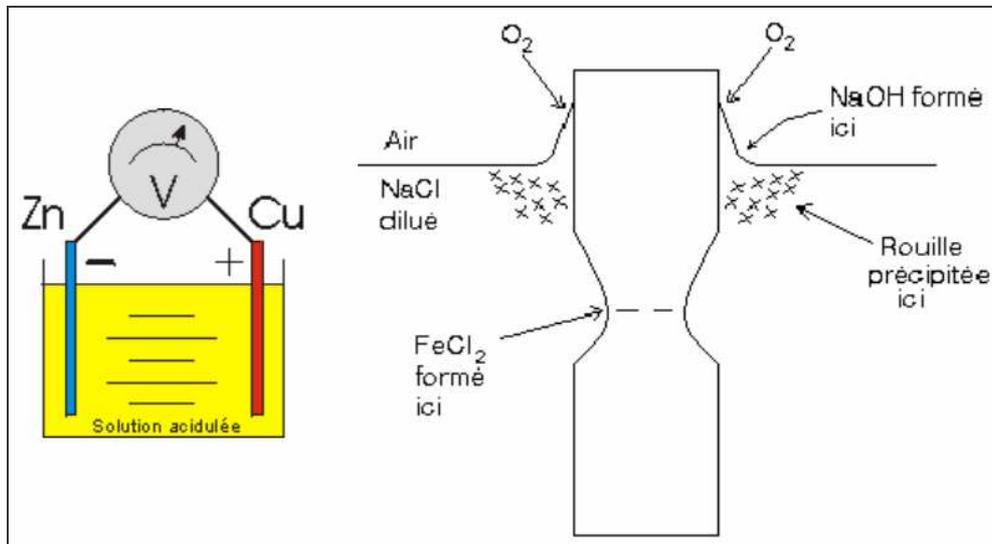


Figure 22 : schéma de principe

6.2.1 La protection passive

Elle est constituée par le **revêtement extérieur** dont le rôle est de créer un effet de barrière électrique entre le métal et le milieu environnant. Ce revêtement ne constitue cependant pas une protection absolue et définitive en raison des imperfections ou blessures susceptibles de se produire lors de la pose ou au cours de la vie de l'ouvrage. C'est pourquoi on maîtrise ces risques potentiels par l'installation d'une protection cathodique.

6.2.2 La protection active

Elle consiste à amener par des moyens extérieurs et artificiels l'ensemble de la surface extérieure du métal à un potentiel suffisamment négatif pour rendre le métal entièrement cathodique et supprimer ainsi tout risque de corrosion extérieure. Le critère de protection cathodique est la valeur du potentiel au-dessous duquel l'acier ne peut se corroder. Pour l'acier enterré ou immergé, le critère de protection est mesuré avec une électrode de référence Cu/CuSO₄ en contact avec le milieu situé au voisinage immédiat du métal de -850 mV. Ce n'est qu'à partir d'une certaine valeur de courant que le potentiel nécessaire est atteint.

Pour réaliser la protection cathodique de l'acier, il suffira donc :

- soit de constituer une pile à l'aide d'un métal plus électro-négatif que l'acier (magnésium ou zinc) : c'est la protection par **anode sacrificielle**.

soit de les relier à une source électrique convenablement connectée de manière que l'acier devienne la cathode du système et de vérifier que le potentiel de cette cathode atteint bien le critère de protection en tous points : c'est le **soutirage de courant**.

6.3 Application au cas du Havre et hypothèses de calcul :

Les prescriptions des marchés imposent une durée de vie de la protection de 15 ans et un potentiel moyen requis de - 950 mV, cette dernière valeur est relativement basse pour tenir compte de la présence de bactéries sulfato réductrices sur l'ouvrage. La quantité d'anodes en alliage aluminium est de l'ordre de 5 à 6 kg / m² d'ancrage toutes surfaces non-développées confondues.

Le potentiel des ouvrages sans protection se situe dans une fourchette variant de - 550 mV à - 650 mV. Après mise en place des anodes, ce potentiel est abaissé à une valeur, après trois mois, d'environ - 850 mV. Cette valeur qui n'est pas tout à fait conforme aux prescriptions imposées amène à considérer de façon critique la répartition et la nature même des anodes.

En effet, il semble que la composition de l'alliage et la géométrie des anodes ont une influence qu'il convient d'analyser plus précisément afin que le but recherché (- 950 mV) soit obtenu. Dans cet

esprit, les dernières consultations pour la protection cathodique des ouvrages ont intégré des témoins de corrosion, des électrodes de référence à poste fixe et une anode monitorée afin d'obtenir des renseignements complémentaires sur le mode de fonctionnement de la protection.

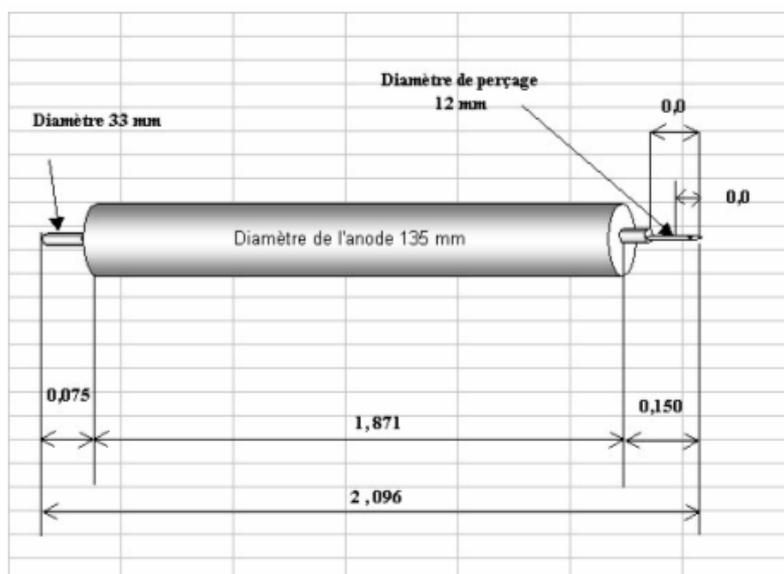


Figure 23 : schéma d'une anode



Figure 24 : cliché des anodes

6.3.1 Calcul de la protection cathodique

Le calcul de la protection cathodique par anodes sacrificielles pour des structures en palplanches ou pieux est défini à partir de la recommandation ONU RPB 401 de 1993 et des paramètres suivants :

- La durée de vie des anodes (15 ans actuellement, mais qui peut se limiter à 10 ans en fonction du contexte économique).
- Les caractéristiques des paramètres des eaux (salinité, PH, résistivité),
- Les densités de courant à prendre en compte en fonction des zones (marnante, immergée et en fiche), à titre indicatif pour des structures non revêtues ou prendre 90 mA/m² pour

les zones marnantes et immergées et 20 mA/m² pour les zones en fiche. Ces valeurs passent respectivement à 30 mA/m² et 10 mA/m² si la structure est revêtue (Baltoflake),

La capacité en courant des anodes en fonction du choix de l'alliage (au environ de 2500 Ah/kg et 750 Ah/kg respectivement pour un alliage à base d'aluminium et de zinc). Ce premier jeu de paramètres permet de définir la masse d'alliage à répartir sur l'ouvrage afin d'obtenir le potentiel moyen de - 950 mV avec un seuil minimum de - 900 mV. La détermination géométrique et dimensionnelle de l'anode ainsi que la nature de l'alliage conduisant à la masse anodique unitaire à répartir sur la structure afin d'uniformiser le potentiel en début et fin de vie (avec une consommation de la masse anodique maximale fixée à 90 %).

6.3.2 *Contrôle des anodes*

Les anodes proposées par l'Entrepreneur sont associées à des spécificités électrochimiques qui sont liées à la composition de l'alliage. Il est donc indispensable que des essais de contrôle soient effectués dans le cadre de l'acceptation des fournitures. Ces essais consistent sur la base de recommandation du « D et Work Veritas RP 401 Cathodic Protection Design » et « NACE Standard Recommended Practice RP 0387-90 » à vérifier :

- La capacité électrochimique (en Ah/kg), par analyses,
- La composition chimique déterminée sur des éprouvettes issues, par analyses
- Les dimensions et poids des anodes (fissuration, flèche,...),
- La qualité interne par sciage.

La capacité électrochimique est déterminée sur des éprouvettes issues de chaque coulée qui sont baignées sans une solution à 20°C et reliées à un système de mesure de l'intensité ; il est effectué sur 96 heures. La composition chimique est déterminée par mesure d'étincelage qui fournit les différents pourcentages de chacun des composants de l'alliage.

Les dimensions et le poids des anodes sont contrôlés par sondage ; l'aspect fait l'objet d'une inspection visuelle et la qualité interne est vérifiée par des sciages à 25 %, 33 % et 50 % de la longueur de l'anode à raison d'une anode pour 10 t.

6.3.3 *Mise en œuvre des anodes sacrificielles*

Le principe consiste en la pose d'un élément métallique (exemple le Havre : anode aluminium) afin d'abaisser le potentiel des ouvrages :

- 1°/ Un plongeur doit nettoyer la surface du pieux,
- 2°/ Il vient souder la fixation du bas,
- 3°/ On descend l'anode. Il suffit de faire coulisser l'embout dans la fixation.
- 4°/ On soude la fixation du haut.
- 5°/ Les anodes sont entretenues tous les 10 à 20 ans selon leur exposition.



Figure 25 : cliché des anodes posées

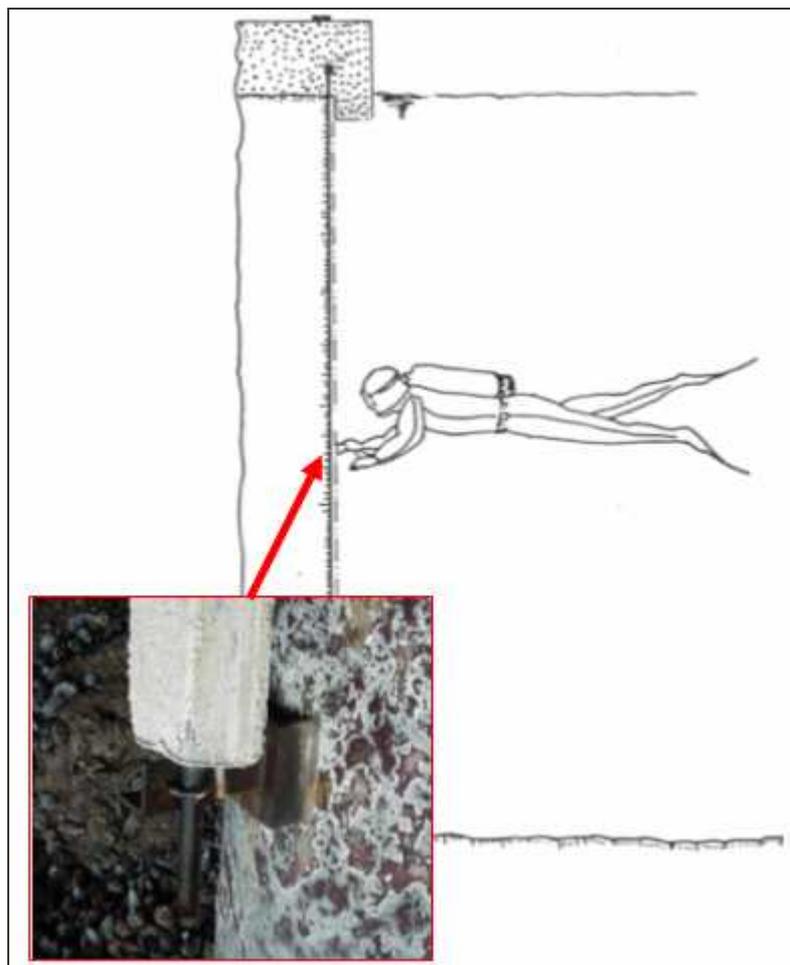


Figure 26 : fixation des anodes

6.4 Principe de la protection cathodique par courant imposé

6.4.1 Principe

La protection cathodique par courant imposé : ce mode de protection est basé sur la mise à profit d'un courant électrique injecté dans l'électrolyte à partir d'une anode dénommée anode déversoir. Dans cette configuration, on utilise une source de courant continue dont le pôle positif est relié à l'anode et le pôle négatif à la structure. Ce système est dit « énergisé » ou « à soutirage de courant ». L'emploi de ce système n'est pratiquement pas limité économiquement par la résistivité de l'électrolyte. Ses inconvénients seront liés à la nécessité d'une bonne continuité électrique de tous les éléments à protéger.

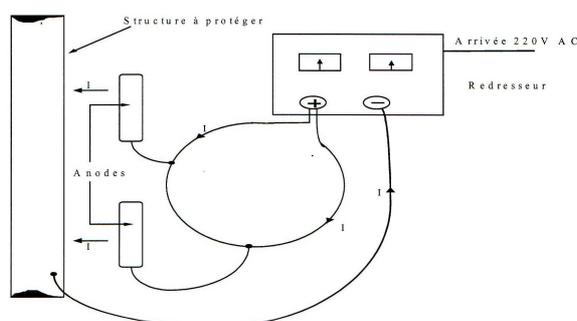


Figure 27 : schéma de la protection cathodique par courant imposé



Figure 28 : protection des appontements par courant imposé. (Terminal Méthanier de Montoir de Bretagne)

Ce type de protection est bien approprié aux électrolytes très conducteurs comme l'eau de mer.

6.4.2 Mise en œuvre des anodes sacrificielles

La pose du système de protection cathodique par courant imposé consiste à mettre en place un réseau de câble permettant le fonctionnement du processus de protection contre la corrosion :

1^o phase de préparation :

- Tirage des câbles (source vers le ponton).

2^o Mise en place du chapelet anodique :

- Installation des boîtiers électriques au dessus des deux pieux d'extrémités,
- Dépose d'une gaine en kevlar immergé allant d'un boîtier à l'autre,

- Installation sur la gaine en kevlar, environs tous les 50 cm, d'une anode sacrificiel en titane recouvert d'oxyde de méthode précieux (~ 500 € / anode).
- Branchement des extrémités de la gaine sur les bornes positives de chaque boîtier.

3^e/ Mise en place des connecteurs :

- Pose d'un connecteur sur chaque pieu,
- Branchement de chaque connecteur sur la borne négative du boîtier le plus près.

Le dispositif installé sur les appontements du terminal méthanier est capable de protéger l'équivalent de 13 000 m² de surface d'acier. Le coût des travaux avoisine les 5 000 000 €.

6.5 Analyse économique

Ouvrage	Protection cathodique	Investissement %	Coût moyen (€/A.an)
<u>Plate-forme en mer :</u> acier nu durée de vie = 25 ans besoin en courant = 700A	<u>Anodes galvaniques :</u> alliage Al-Zn-In 250 unités/masse = 65t répartition uniforme	< 3	38
	<u>Courant imposé :</u> énergie consommée = 15 KVA contrôle et entretien fréquents	< 2	48

7 Conclusion

On a donc vu au travers de ce rapport qu'il existait différentes techniques de prévention de la corrosion des ouvrages métalliques en milieu marin. On associe en général plusieurs techniques protections afin de minimiser l'apparition de rouille (souvent peinture plus protection cathodique). C'est pourquoi il est important pour le maître d'ouvrage de bien définir et analyser les besoins afin de maintenir au mieux son patrimoine.

L'état actuel de la technique ne permet pas d'empêcher complètement la corrosion de se produire, c'est pourquoi il est nécessaire de prévoir une stratégie d'entretien de l'ouvrage. Cette notion est récente, et par conséquent il existe aujourd'hui une vraie problématique en terme d'entretien, mais surtout de réparation des ouvrages.

8 Annexes

Annexe 1 : vérification d'un pieu à l'EUROCODE 4

Annexe 2 : exemple de fiches techniques de produits de peinture

Annexe 3 : sources

9 Bibliographie et consultations

- Pathologies des ouvrages portuaires en acier. Mécanismes, cinétiques et modélisation. Méthodes préventives et curatives (protections envisageables), ARC'ANTIQUE, Jean-Bernard MEMET
- Entreprise Philippe LASSARAT SA Agence de Bretagne
BP 40 44550 Montoir de Bretagne

Monsieur Patrick SANTERRE, Chargé d'affaire

- ❑ Techniques de l'ingénieur, constructions métalliques, Protection des constructions en acier par Jean-Pierre BOUILLETTE
- ❑ Port Autonome de Nantes Saint-Nazaire, Monsieur MENARD
- ❑ Port autonome du Havre, rapport de stage de Fabien KIBURSE
- ❑ La corrosion des pieux en milieu marin, FAURE Martial, MALIKI Anli, ANDRIEUX David, LEFEVRE Julien, maîtrise IUP GCI de Saint-Nazaire (année 2003-2004)
- ❑ Eurocodes 3 et 4
- ❑ Protection of steel sheet piling, Sigma coatings
- ❑ www.acierconstruction.com
- ❑ www.vslf.ch
- ❑ www.progalva.be
- ❑ www.xperx.ca
- ❑ www.sfc.fr
- ❑ www.galvazinc.com
- ❑ www.ccta.fr
- ❑ Site internet de l'entreprise TETIS