

Manuel de corrosion et protection des ouvrages en sites aquatiques



Manuel de corrosion et protection des ouvrages en sites aquatiques

Collection | **Références**

Édition Cerema

Cerema Eau, mer et fleuves – 134, rue de Beauvais – CS 60039 – 60280 Margny-lès-Compiègne Tél : +33(0)3 44 92 60 00
Siège social : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30

L'ouvrage est une œuvre collective réalisée sous la direction du Cerema.

Les coordinateurs

Brahim BENAÏSSA, Consultant
Jean-Michel MOREL, Cerema Est

Les rédacteurs

Miléna BARRAS, Cerema Est
Brahim BENAÏSSA, Consultant
Christian BENARD, GPMH
Sébastien BERGEROT, A-Corros
Laurence BOUGON, Cerema Normandie-Centre
Philippe CARPENTIER, GPMD
Anne FAGOT, ArcelorMittal
Dominique JACOB, Corrodys
Émilie MALARD, Corrodys
Jean-Bernard MEMET, A-Corros
Nicolas MENARD, GMPNSN
Pierre-Antoine MIZZI, GPMM
Jean-Michel MOREL, Cerema Est
Jean-Marie MOUCHEL, Corrodys
Samuel PINEAU, ACCOAST
Laurent SUIRE, GMPNSN
ACQPA a apporté sa participation dans la rédaction du chapitre «Protection passive»

Les relecteurs

Miléna BARRAS, Cerema Est
Christian BENARD, GPMH
Philippe CARPENTIER, GPMD
Daniel COPIN, CEFRACOR CFPC
Jérôme CROUZILLAC, BAC France
Bertrand DE BRUYN, Cerema Eau, mer et fleuves
Elisabeth FLEURY, CEFRACOR
Laurent GUILLOUT, MCO Services
Jean-Claude HOURRIEZ
Hervé LE GUYADER, Consultant
Nicolas MENARD, GMPNSN
Pierre-Antoine MIZZI, GPMM
Jean-Pierre PAUTASSO, CEFRACOR CFPC
Marcel ROCHE, CEFRACOR
Jean-Pierre SAMARAN, CEFRACOR CFPC
Aurélien TELLIER, Cerema Eau, mer et fleuves
Jean-Jacques TRICHET, Cerema Eau, mer et fleuves

Comment citer cet ouvrage :
Cerema. Manuel de corrosion et protection des ouvrages en sites aquatiques
Cerema, 2020. Collection : Références. ISBN : 978-2-37180-419-7

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Table des matières

Introduction 5

OBJECTIF DU MANUEL	5
LIMITES D'UTILISATION	5

I. Structures, milieu et corrosion 6

1. INTRODUCTION	6
2. LES STRUCTURES MÉTALLIQUES EN MILIEU PORTUAIRE OU FLUVIAL	6
2.1 Les ouvrages à structures métalliques en site aquatique	6
2.1.1 Constitution des structures métalliques	7
2.1.2 Structures métalliques et contact avec le milieu marin	7
2.2 Le matériau constitutif	7
2.2.1 Produits constitutifs des structures maritimes	7
2.2.2 L'acier : matériau constitutif des produits palplanches	9
2.2.3 Caractéristiques des aciers pour rideaux de palplanches	13
2.3 Profil de corrosion et profil de contraintes	16
3. LA CORROSION EN MILIEU PORTUAIRE OU FLUVIAL	17
3.1 Généralités sur la corrosion	17
3.1.1 Processus général électrochimique de la corrosion	17
3.1.2 Formation des produits de corrosion de l'acier en environnement aquatique	18
3.2 Typologie de la corrosion des matériaux métalliques	20
3.2.1 La corrosion généralisée ou uniforme	21
3.2.2 La corrosion galvanique	21
3.2.3 La corrosion caverneuse ou corrosion par effet de crevasse	22
3.2.4 La corrosion par piqûres	23
3.2.5 La corrosion érosion et la corrosion cavitation	23
3.2.6 La corrosion intergranulaire	24
3.2.7 La corrosion sélective	25
3.2.8 La corrosion-frottement (tribocorrosion)	25
3.2.9 La corrosion sous contrainte et la fatigue corrosion	26
3.2.10 La corrosion influencée par les micro-organismes (CIM)	26
3.3 La corrosion des matériaux métalliques en sites aquatiques	27
3.3.1 Corrosion de l'acier	27
3.3.2 Corrosion des aciers faiblement alliés	27
3.3.3 Corrosion des aciers galvanisés	28
3.3.4 Corrosion des aciers inoxydables	28
3.3.5 Corrosion des alliages à base nickel	28
3.3.6 Corrosion des alliages d'aluminium	28
3.3.7 Corrosion des alliages de titane	29
3.3.8 Corrosion des alliages cuivreux	29
3.4 Mécanisme et aspect selon la zone d'exposition	29
3.4.1 Corrosion en zone atmosphérique	31
3.4.2 Corrosion en zone d'éclaboussure	31
3.4.3 Corrosion en zone marnante	32

3.4.4 Corrosion en zone de basses-eaux	33
3.4.5 Corrosion en zone immergée	34
3.4.6 Corrosion en zone de jonction sédimentaire (pied d'ouvrage)	35
3.4.7 Corrosion des armatures métalliques	36
3.4.8 Corrosion en zone de jonction et d'assemblage	36

II. Surveillance et mesures 38

1. MÉTHODES ET OUTILS D'ÉVALUATION	38
2. INSPECTION VISUELLE DE L'ÉTAT DE SURFACE	38
2.1 Nettoyage préalable	38
2.2 Échantillonnage des fenêtres d'inspection	39
2.3 Inspection	39
3. MESURES D'ÉPAISSEURS RÉSIDUELLES	40
3.1 Intérêt	40
3.2 Principe de la mesure	40
3.3 Protocole de mesure sur site	41
3.3.1 Recherches préalables	41
3.3.2 Échantillonnage	41
3.3.3 Étalonnage et calibration du matériel	43
3.3.4 Mesures	43
3.3.5 Qualification de l'opérateur	43
3.3.6 Présentation des résultats et traitement des données	43
4. MESURES DE POTENTIEL ÉLECTROCHIMIQUE	44
4.1 Définition	44
4.2 Intérêt	44
4.2.1 Généralités	44
4.2.2 Cas des ouvrages protégés cathodiquement	45
4.3 Principe de la mesure	45
4.3.1 Métrologie	45
4.3.2 Matériel à utiliser	45
4.4 Protocole de mesure sur site	46
4.4.1 Préparation et vérification du matériel	46
4.4.2 Connexion à l'ouvrage	46
4.4.3 Réalisation des mesures	47
4.4.4 Présentation des résultats et traitement des données	47
4.4.5 Conclusion	48
5. DÉTECTION DES MICRO-ORGANISMES INFLUENÇANT LA CORROSION	48
6. MESURES PHYSICO-CHIMIQUES DU MILIEU	49
6.1 Température	49
6.2 pH	49
6.3 Teneur en dioxygène dissous	49
6.4 Salinité	49
6.5 Conductivité	50
6.6 Turbidité	50
6.7 Vitesse d'écoulement de l'eau	50
7. DÉTECTION DES COURANTS VAGABONDS	50
7.1 Définitions et présentation de la problématique	50
7.2 Sources	50

7.3 Détection	51
7.4 Atténuation des courants vagabonds	51
8. AUTRES TECHNIQUES D'APPRÉCIATION OU DE DÉTECTION	52
8.1 Recherche de continuités défavorables	52
8.1.1 Cas particulier	53
8.2 Émission acoustique	53
8.3 Impédance mécanique	53

III. Les systèmes de protection 54

1. PRINCIPES ET MÉTHODES DE PROTECTION	54
1.1 Conception et prise en compte de la corrosion	54
1.2 Protection passive	55
1.3 Protection électrochimique	55
1.4 Combinaison des systèmes de protection	55
2. SYSTÈMES DE PROTECTION PAR PEINTURE	56
2.1 Caractéristiques et conditions d'application	56
2.2 Choix du système à appliquer	57
2.2.1 La durée de vie attendue et la garantie souhaitée	58
2.2.2 Les conditions de remise en peinture	58
2.2.3 L'environnement dans lequel se situe l'ouvrage	58
2.3 Préparation de surface	59
2.4 Application du système de peinture et contrôle	60
2.4.1 Application du système de peinture	60
2.4.2 Organisation du contrôle qualité	60
2.4.3 Les contrôles de l'application	61
2.5 Gestion des résidus de décapage	61
2.5.1 Choix de la filière d'élimination	62
2.6 Maintenance du système, durabilité et rénovation	62
2.6.1 Reprise localisée	62
2.6.2 Avivage	62
2.6.3 Reprise générale du système	63
3. SYSTÈMES DE PROTECTION CATHODIQUE	63
3.1 Principe de protection et zones d'exposition concernées	63
3.2 Paramètres du milieu à maîtriser ou à surveiller	64
3.2.1 Potentiels et électrodes de référence	64
3.2.2 Facteurs à prendre en compte pour la conception de la protection	65
3.3 Protection par anodes galvaniques	66
3.3.1 Conception d'une protection par anodes galvaniques	66
3.3.2 Recommandation pour une bonne installation	66
3.3.3 Débit des anodes galvaniques	67
3.4 Protection par courant imposé	67
3.5 Comparaison des deux systèmes	68
3.6 Maintenance du système de protection	69
3.7 Retour d'expérience	69
4. AUTRES TECHNIQUES DE PROTECTION	70
4.1 Revêtement métallique	70
4.2 Combinaison protection cathodique et peinture ou revêtement	71
4.3 Association de métaux et méthode de protection	71

IV. Retour d'expériences 73

1. REMISE EN ÉTAT DU QUAI DE L'ESCAUT DU PORT DE DUNKERQUE	73
1.1 Description de l'ouvrage et de son environnement	73
1.2 Pathologies	73
1.3 Diagnostic	74
1.4 Choix de la solution	74
1.5 Travaux	75
1.6 Contrôle qualité	76
1.7 Bilan	76
2. REMISE EN ÉTAT DE L'ÉCLUSE DE WATIER DU PORT DE DUNKERQUE	77
2.1 Description de l'ouvrage et de son environnement	77
2.2 Pathologies	77
2.3 Diagnostic	77
2.4 Choix de la solution	79
2.4.1 Choix du scénario	79
2.5 Travaux	80
2.6 Contrôle qualité	82
2.7 Bilan	82
3. DÉMARCHE INVESTIGATRICE D'IDENTIFICATION DE LA CORROSION DU QUAI DES TELLINES AU PORT DE MARSEILLE-FOS	83
3.1 Description de l'ouvrage et de son environnement	83
3.2 Pathologies	83
3.2.1 Programme d'investigation	83
3.3 Diagnostic	85
3.4 Bilan	85
4. RÉFECTION DE LA PROTECTION ANTICORROSION DU PONT-CANAL DE BRIARE	85
4.1 Description de l'ouvrage et de son environnement	85
4.2 Pathologies	86
4.2.1 État des lieux initial : les différents systèmes de peinture à l'intérieur de la bache	86
4.2.2 État de la protection anticorrosion en place	88
4.3 Diagnostic	88
4.3.1 Contraintes liées à la remise en peinture de l'intérieur de la cuve	88
4.3.2 Solutions pour la remise en peinture	89
4.4 Choix de la solution	90
4.5 Bilan	91

V. Bibliographie 92

VI. Glossaire et liste des sigles 96

Index des illustrations 98

Introduction

OBJECTIF DU MANUEL

Cet ouvrage a pour objet de faire un état de la connaissance sur la corrosion et son impact sur les structures métalliques dans le milieu portuaire et fluvial. Il s'adresse aux spécialistes mais aussi aux non spécialistes qui y trouveront les bases de connaissance pour appréhender les phénomènes.

L'ouvrage décrit les phénomènes de corrosion en milieu portuaire et fluvial ainsi que les structures affectées. Il définit en particulier les différentes zones d'attaque de la corrosion, les différents types de corrosion et l'influence du milieu.

Il aborde ensuite les outils de surveillance et de mesures de la corrosion ainsi que les dispositions à mettre en œuvre pour la mesure des épaisseurs résiduelles, celle du potentiel électrochimique et des paramètres environnementaux.

Les systèmes de protection sont ensuite abordés : protection passive, protection active et combinaison des deux.

Le Cerema remercie l'ensemble des contributeurs à cet ouvrage.

LIMITES D'UTILISATION

Cet ouvrage traite des structures métalliques en contact avec le milieu marin ou fluvial. Il ne traite pas des aciers d'armatures du béton, qui fait l'objet d'une publication spécifique, ou des canalisations métalliques. Ce guide ne traite pas des structures mobiles qui sont traitées dans un autre manuel.

I. Structures, milieu et corrosion

1. INTRODUCTION

Les désordres observés sur les structures métalliques des infrastructures portuaires, fluviales, ou en bordure de mer, sont principalement occasionnés par la corrosion qui se manifeste différemment sur les parties métalliques en fonction du type d'exposition (éclaboussures, marnage, immersion ou zone 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 uniforme due à la corrosion de l'ordre de 0,1 mm/an. Or des pertes d'épaisseur de plusieurs millimètres par an dues à des vitesses de corrosion localisées ont été enregistrées sur certains sites. Les zones réputées pour être le siège de ces dégradations méritent une attention particulière et une protection bien adaptée au type de corrosion, au milieu et aux conditions de fonctionnement de la structure.

Ce guide va décrire successivement les structures métalliques rencontrées dans les sites portuaires et fluviaux, les types de dégradations observées, et le mécanisme de corrosion le plus apte à se développer au regard des conditions d'exposition et du milieu. Les retours d'expériences ont été collectés auprès des ports commerciaux de Boulogne-sur-Mer, Brest, Dunkerque, Le Havre, Marseille et Nantes-Saint-Nazaire.

2. LES STRUCTURES MÉTALLIQUES EN MILIEU PORTUAIRE OU FLUVIAL

La maîtrise de tous les paramètres de formation de la corrosion passe par la bonne connaissance des structures et de leurs sollicitations, du matériau constitutif, de ses caractéristiques mécaniques et des propriétés du milieu électrolytique ambiant et en contact avec le métal. Il est donc nécessaire de recenser les types d'ouvrages constitués de structures métalliques et soumis à l'action du milieu aquatique environnant.

Des corrosions apparaissent sous différentes formes selon les zones d'exposition et la composition du milieu en contact.

Les observations visuelles relevées sont concordantes d'un site à l'autre et concernent :

- l'état de surface des structures en acier constituant des rideaux de palplanches ou des pieux non protégés ;
- les désordres des connexions entre rideaux et tirants d'ancrages ou têtes de pieux ;
- la dégradation des armatures du béton des poutres ou des dalles en intrados des quais.

2.1 Les ouvrages à 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, l'accostage, ou encore pour protéger les riverains contre les inondations. Des structures métalliques constituent l'ossature, le soutènement ou le support principal. Elles sont en contact avec le milieu terrestre et le milieu aquatique.

Elles sont constituées principalement de pieux et de palplanches en acier. L'assemblage des différentes parties peut nécessiter des soudures, un boulonnage ou une liaison articulée (portes et vannes). Les surfaces métalliques ont le plus souvent une face soit immergée, soit soumise au marnage, tandis que l'autre face est en contact avec les matériaux constituant le terre-plein, les remblais ou le talus.

Différentes formes de structure (rideaux, pieux, gabions, etc.) sont employées séparément ou combinées pour assurer la stabilité de l'ouvrage.

Le dimensionnement de ces ouvrages se fait selon la *norme NF EN 1993 – 5 – Calcul des structures en acier - Partie 5 : pieux et palplanches* et son annexe nationale. Le module de flexion et la limite d'élasticité sont les deux caractéristiques principales à prendre en compte dans la réalisation d'une structure métallique. Le premier est caractérisé par la géométrie du produit, tandis que la limite d'élasticité est déterminée par le matériau.

2.1.1 Constitution des structures métalliques

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. 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.

Les structures avec palplanches

Les palplanches à module présentent un profil en U ou Z et sont assemblées et battues pour former des rideaux de soutènement ou des écrans d'étanchéité. Les palplanches sont reliées par des liernes, et des tirants assurent la liaison avec un rideau arrière pour maintenir le rideau principal en position verticale et résister aux sollicitations horizontales.

Les palplanches plates sont utilisées sous forme de gabions. En effet, le fonctionnement en silo qui en résulte permet de ne les faire travailler qu'en traction.

2.1.2 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 supporter une plate-forme (quai, ponton). Ces structures métalliques se trouvent selon les configurations du site en contact avec différents milieux (air, embruns, eau et sol) qui induisent différents mécanismes de corrosion possibles (atmosphérique, par aération différentielle, ou encore corrosion influencée par les micro-organismes).

2.2 Le matériau constitutif

2.2.1 Produits constitutifs des structures maritimes

L'introduction de nouvelles techniques de laminage au début du XX^e siècle a marqué le début des palplanches en acier. Les palplanches en acier sont particulièrement adaptées pour la construction rapide de structures fiables à moindre coût. Elles se caractérisent par leur excellente résistance à la flexion et à leur durabilité. Elles sont largement utilisées, entre autre pour la construction de murs de quai et de brise-lames dans les ports et les écluses, et pour le renforcement de berges sur les rivières et les canaux.

Les demandes du marché, ainsi que l'évolution des moyens de production sidérurgique, ont permis le développement des différents produits palplanches avec une performance accrue pour une masse d'acier souvent moindre. La gamme actuelle recouvre les produits laminés à chaud montrés dans la [figure I.2.1](#).

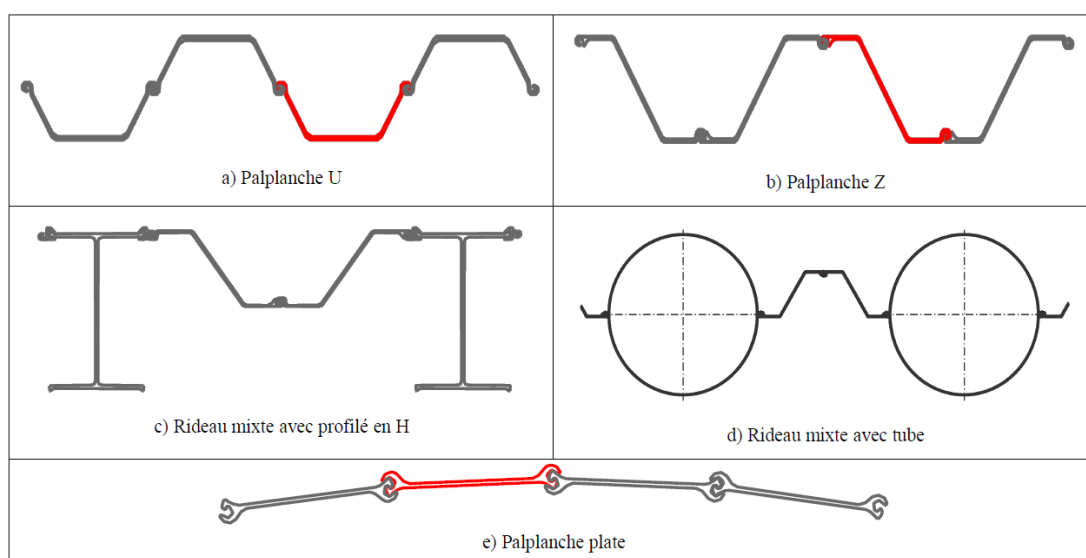


Figure I.2.1 - Les produits palplanches fonctionnant en flexion et en traction

La variation de géométrie de ces produits peut conduire à une disparité des faciès de corrosion sur la longueur d'un mur de soutènement en acier. Les conditions hydrodynamiques sont des facteurs d'influence prépondérants dans ces phénomènes.

Ces produits sont livrés selon des normes précises, rappelées dans les paragraphes suivants. Le marquage CE de ces produits entrera en vigueur lorsque les normes seront harmonisées. D'autres nuances ou produits peuvent être utilisés sur décision du maître d'ouvrage. Dans ce cas, un agrément technique européen peut remplacer la norme.

Palplanches à module

Les palplanches à module, telles que les palplanches U et Z (figure I.2.1, a et b), reprennent les moments de flexion. La figure I.2.2 présente un exemple de courbe des moments pour une paroi ancrée avec un rideau arrière. Le moment maximal est souvent situé dans la zone d'immersion.

Les produits longs laminés à chaud tels que les palplanches U et Z sont livrés selon la norme NF EN 10 248 - Palplanches laminées à chaud en aciers non alliés – Partie 1 : conditions techniques de livraison et Partie 2 : tolérances sur forme et dimensions.

Les palplanches profilées à froid sont livrées selon la norme NF EN 10 249 - Palplanches laminées à froid en aciers non alliés – Partie 1 : conditions techniques de livraison et Partie 2 : tolérances sur forme et dimensions. Pour des ouvrages de type canal, où les sollicitations et les profondeurs sont limitées, elles sont couramment utilisées.

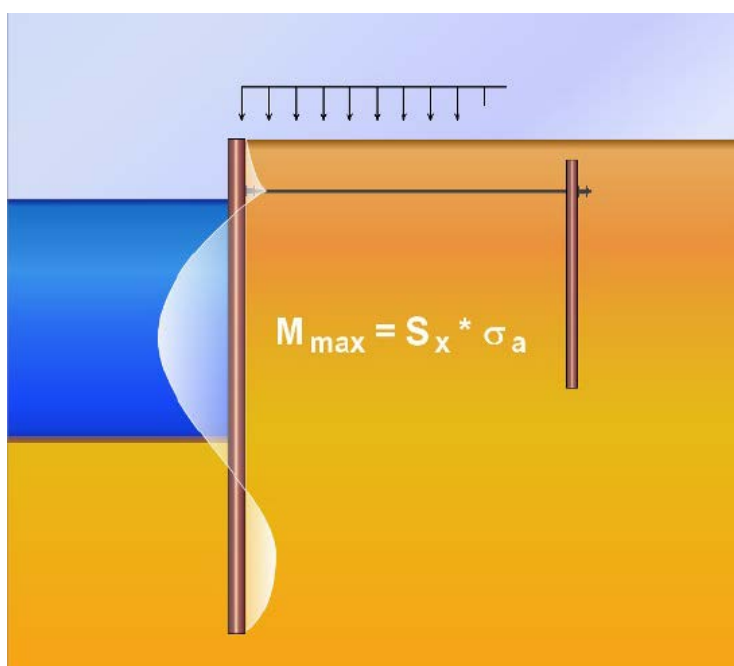


Figure I.2.2 - Allure de courbe des moments sur une paroi ancrée par un rideau arrière

Rideaux mixtes

L'accroissement des transports de marchandises, conduit à l'augmentation de la taille des bateaux, et rend nécessaire la construction de murs de quai plus profonds et plus résistants. Les parois combinées présentent une amplitude de flexion élastique supérieure aux palplanches à module, ce qui permet de répondre à cette demande.

Une paroi combinée est une alternance périodique de produits primaires et secondaires. Les éléments primaires sont les éléments porteurs, primordiaux pour la stabilité de l'ouvrage. Les éléments secondaires ou intermédiaires résistent aux efforts locaux des pressions d'eau et assurent la retransmission des efforts aux éléments porteurs.

En pratique, des profilés en H (par exemple des palplanches HZM), des pieux tubulaires ou des caissons reconstitués en acier, représentent les éléments porteurs, tandis qu'une combinaison de palplanches (double ou triple) constitue l'élément secondaire (figure I.2.1, c et d). Ces éléments sont connectés par des raccords, également laminés à chaud. Ces raccords sont soudés sur l'élément primaire avant la mise en œuvre.

Les tubes peuvent être livrés selon la norme NF EN 10 219 – Profils creux de construction soudés, formés à froid en aciers non alliés et à grains fins – Partie 1 : conditions techniques de livraison, et Partie 2 : tolérances, dimensions et caractéristiques de profil.

Les profilés H et les raccords sont livrés selon la norme *NF EN 10 248 - Palplanches laminées à chaud en aciers non alliés – Partie 1 : conditions techniques de livraison, et Partie 2 : tolérances sur forme et dimensions*.

Les caissons reconstitués en acier sont produits à partir de ces produits de base selon la norme *NF EN 1090 - Exécution des structures en acier et des structures en aluminium – Partie 2 : Exigences techniques pour les structures en acier*.



Figure I.2.3 - Paroi combinée en tubes, raccords et palplanches - crédit : Arcelor Mittal

Palplanches plates

Les palplanches plates apparaissent en Europe vers 1935. Elles permettent de reprendre les efforts de traction horizontaux (figure I.2.1, e). Les applications sont donc sous forme de batardeaux ou de gabions. Elles entrent dans la structure de murs de quai massifs, de jetées, de ducs d'Albe ou de brise-lames. La résistance à la traction des griffes est un paramètre essentiel à prendre en compte lors de la sollicitation en traction. Il n'y a pas besoin de liernes ou d'ancrage pour ce type d'ouvrage.

Ces palplanches sont livrées selon la norme *NF EN 10 248 - Palplanches laminées à chaud en aciers non alliés – Partie 1 : conditions techniques de livraison, et Partie 2 : tolérances sur forme et dimensions*.

Autres éléments métalliques constructifs

Les pieux H sont des poutrelles H spéciales dont l'âme et l'aile ont la même épaisseur. Ils sont utilisés comme pieux de fondation pour des ouvrages tels que les ponts ou comme pieux d'ancrage pour les murs de quai.

D'autres éléments métalliques tels que les ancrages, butons et liernes, doivent dans certains cas être mis en place pour assurer la stabilité de l'ouvrage. Ces éléments doivent aussi être pris en compte dans l'analyse anticorrosion et sont décrits dans des normes spécifiques.

2.2.2 L'acier : matériau constitutif des produits palplanches

Les propriétés mécaniques (limite d'élasticité) d'un produit en acier sont entièrement dépendantes de sa composition chimique et de son processus de fabrication. Ceux-ci peuvent également avoir une influence sur la sensibilité à la corrosion des produits.

Production de l'acier

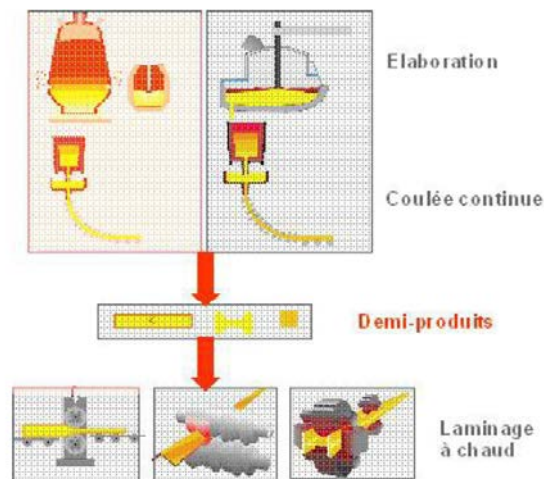


Figure I.2.4 - Etapes fondamentales de la fabrication des produits palplanches

Il est nécessaire d'expliquer brièvement les trois étapes fondamentales de la fabrication des produits palplanches, illustrées dans la [figure I.2.4](#).

Élaboration de l'acier

L'acier est un alliage métallique composé en majorité de fer et de carbone. Dans le cas où le taux de carbone dépasse les 2 % en masse de l'alliage métallique, on parle d'acier carbone. Les éléments d'alliage (composition chimique) ainsi que les conditions de fabrication déterminent les propriétés mécaniques d'une nuance d'acier.

Le fer en tant que tel n'existe pas à l'état naturel. Il est présent sous forme d'oxydes, appelés minerais de fer, qui doivent être transformés pour former le fer utilisé dans la fabrication de l'acier. Le phénomène de corrosion est le procédé naturel de retour du fer ou de l'acier à son état oxydé, le plus stable.

On distingue à l'heure actuelle deux filières principales d'élaboration de l'acier : les hauts fourneaux associés aux convertisseurs à oxygène (filière fonte) et les fours électriques (filière électrique).

Le minerai de fer est d'abord transformé en aggloméré, ensuite réduit dans le haut-fourneau en présence de carbone et de chaux. Le produit intermédiaire obtenu s'appelle la fonte. La fonte entre ensuite dans le convertisseur à oxygène, dans lequel les dérivés carbonés vont être brûlés par l'ajout d'oxygène. L'acier ainsi obtenu aura un niveau faible d'impuretés.

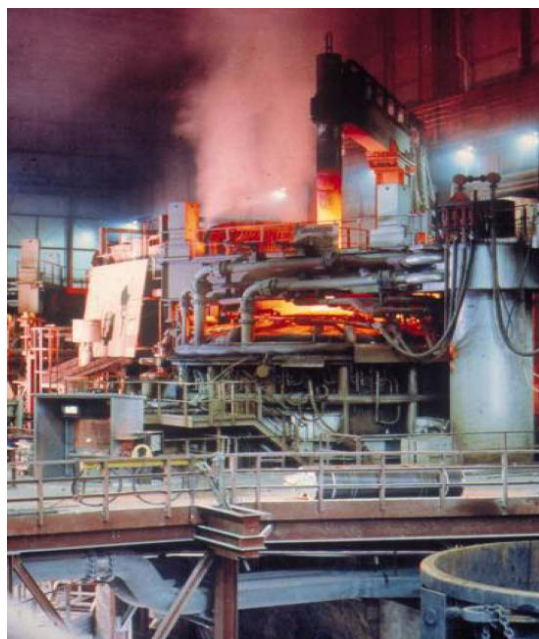


Figure I.2.5 - Four électrique - crédit : Arcelor Mittal

Le second procédé, plutôt réservé aux aciers fer-carbone et aciers à outils, a été étendu à la fabrication d'acier de construction. Le four électrique permet de fondre des aciers recyclés appelés mitrailles afin d'obtenir de l'acier liquide par l'intermédiaire d'un arc électrique. Dans ce processus, la préparation d'une charge de mitrailles est primordiale pour obtenir la bonne nuance sur le produit final. Les teneurs en éléments résiduels sont particulièrement surveillées.

Que ce soit par la filière fonte ou la filière électrique, l'acier brut obtenu ne correspond pas encore à la composition chimique visée. Des procédés secondaires tels que la métallurgie secondaire ou l'affinage sont utilisés. Ainsi des ferroalliages sont ajoutés à l'étape du four poche (Figure I.2.6) afin d'obtenir la composition chimique visée pour l'acier liquide.

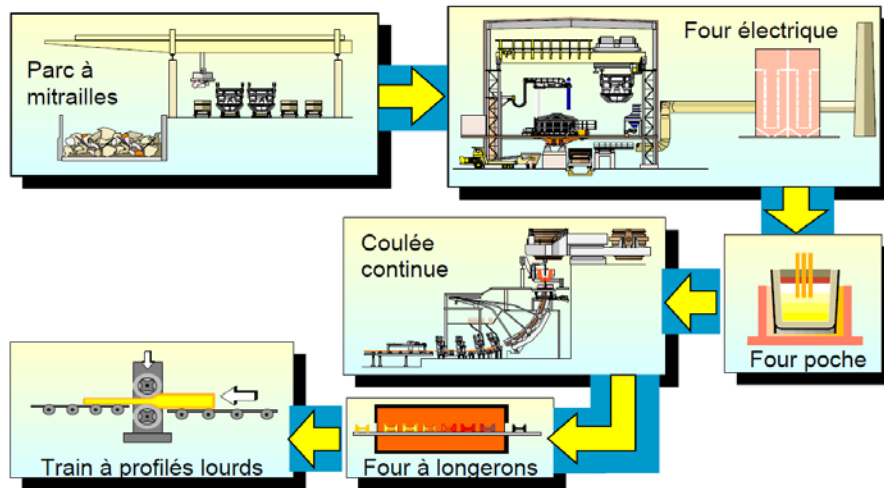


Figure I.2.6 - Route métallurgique type pour la production de palplanches - crédit : Arcelor Mittal Luxembourg

Coulée de l'acier

La coulée continue est actuellement le principal procédé de fabrication pour le passage de l'acier liquide à l'acier solidifié. Une illustration de coulée continue est présentée sur la figure I.2.7.

L'acier liquide est coulé dans un moule, appelé lingotière, refroidi à l'eau. Ce moule extrait rapidement la chaleur de l'acier, ce qui permet sa solidification progressive.

Le produit obtenu, appelé demi-produit et de section variée, sera utilisé pour les étapes ultérieures de mise en forme du produit fini.

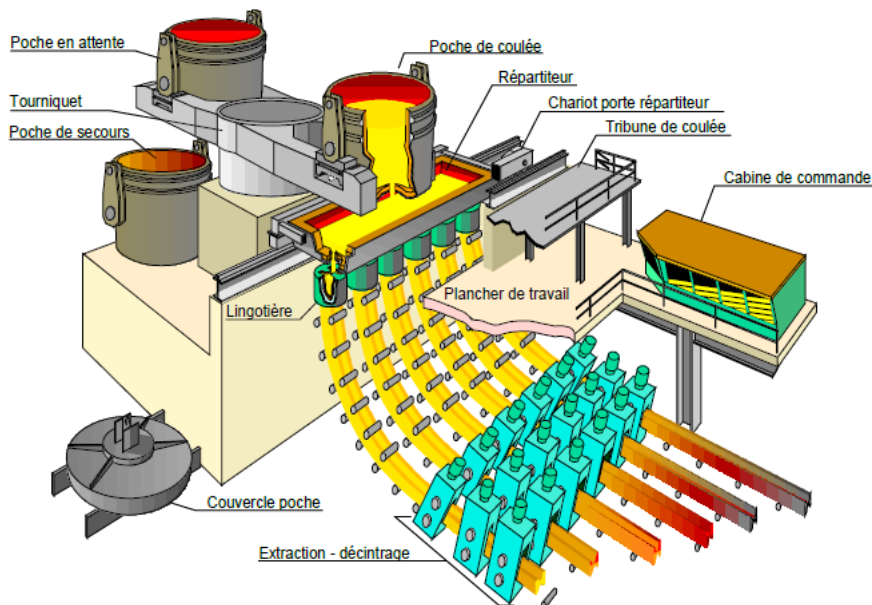


Figure I.2.7 - Schéma d'une installation de coulée continue pour demi-produit type beam blanks

Mise en forme des produits en acier

La mise en forme des demi-produits commence par le laminage à chaud. Un laminoir est composé de plusieurs cages successives, chacune comportant une paire de cylindres. Le demi-produit passe dans les différentes cages, où il est écrasé entre les cylindres afin de réduire l'épaisseur et de donner la géométrie finale du produit (figure I.2.4). La figure I.2.8 présente le détail d'une cage constituée de deux cylindres cannelés pour le laminage à chaud de palplanches.

Cette étape se fait à chaud (généralement 700°C à 1200°C) afin de faciliter les grandes déformations avec des efforts modérés. Les tôles sont ensuite enroulées en bobines, tandis que les profilés sont coupés à longueur, avant refroidissement. Cette étape est primordiale dans la création de la microstructure, comme décrit plus loin.

Le cycle de production des palplanches et des profilés H est résumé dans la figure I.2.6. Le cycle normal de production de l'acier est complété par les étapes comprenant une coulée continue de la fonte, suivie d'un passage dans un four à longerons puis l'acier est enfin coulé sur des trains à profilés lourds.

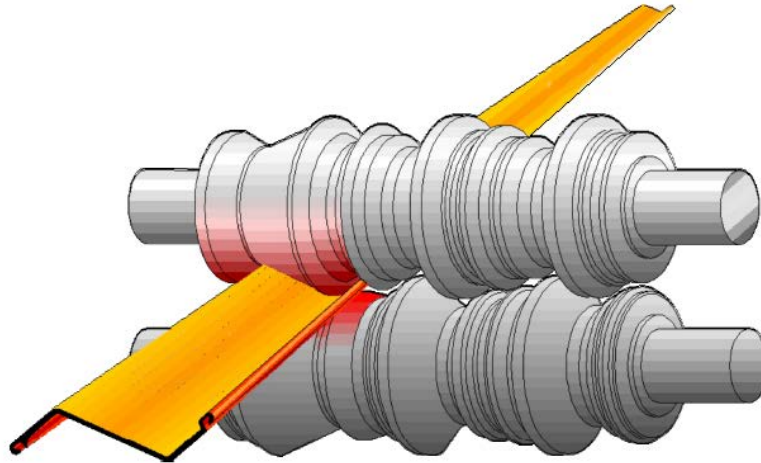


Figure I.2.8 - Cylindres cannelés d'une cage de laminoir à chaud - crédit : Arcelor Mittal

D'autres étapes de mise en forme peuvent suivre.

Les pieux tubulaires sont généralement fabriqués à partir de bobines laminées à chaud, déroulées et soudées (figure I.2.9) mais ils peuvent également être formés à partir d'un tôle soudée longitudinalement.

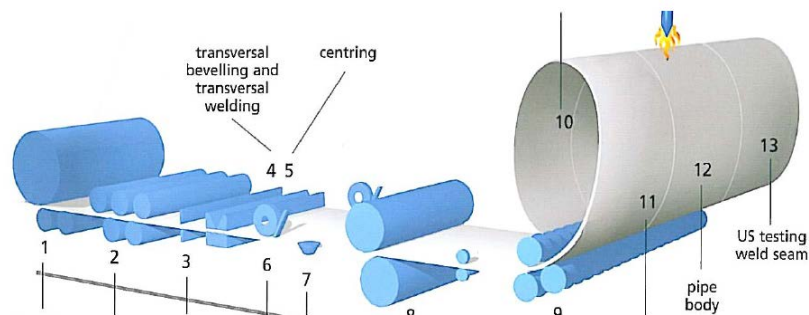


Figure I.2.9 - Illustration du procédé d'obtention de tubes à partir de bobines

Le profilage à froid, à partir de l'acier en bobine permet également de fabriquer les palplanches profilées à froid.

Recyclage

En fin de vie de l'ouvrage temporaire ou permanent, les palplanches ainsi que les profilés ou les tubes récupérés peuvent être réemployés ou recyclés comme mitraille pour une nouvelle production d'acier. Ce produit est recyclable.



Figure I.2.10 - Stands de profilage à froid - crédit : Arcelor Mittal

2.2.3 Caractéristiques des aciers pour rideaux de palplanches

Les principales propriétés mécaniques recherchées pour les aciers de construction sont les propriétés de traction et de résilience. Les essais relatifs ainsi que la localisation et la géométrie des échantillons sont normalisés, et les références des essais sont rappelées dans les différentes normes des produits.

Préambule sur les propriétés mécaniques

Le processus de production va déterminer la microstructure du produit final et lui donner ses propriétés mécaniques. En effet, l'ampleur des déformations plastiques effectuées à une température donnée, représentée par un schéma thermomécanique, joue un rôle essentiel sur la microstructure et les phases qui la composent.

La [figure I.2.11](#) illustre deux microstructures ferrito-perlitiques obtenues avec la même composition chimique. Les déformations (laminage) ont eu lieu à haute température (entre 950°C et 1000°C) sur l'image a), tandis que pour l'image b) elles sont échelonnées sur une plage de températures plus large de 800°C à 1000°C. La microstructure obtenue est différente par sa taille et par la distribution de ses phases. Cette microstructure est la clef de voûte des propriétés mécaniques d'un acier ; la réduction de la taille des grains induit une augmentation de la limite d'élasticité.

Il n'existe pas d'élément tangible à l'heure actuelle indiquant que la microstructure de ces aciers modifie leurs propriétés de corrosion à long terme.

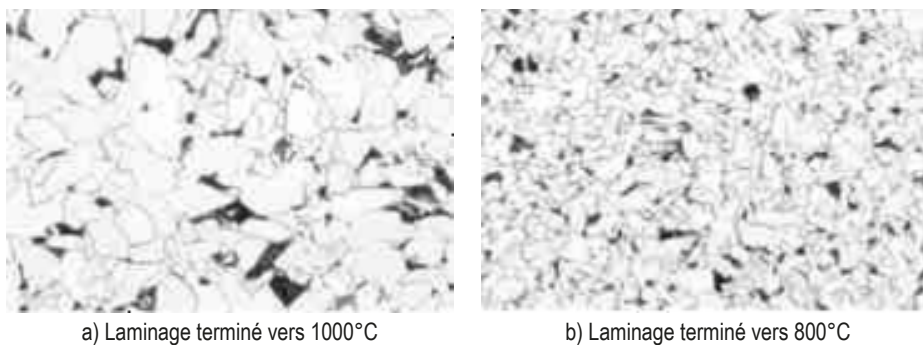


Figure I.2.11 - Influence de la plage de température de transformation sur la microstructure de l'acier

Bifluence de la composition chimique sur les propriétés mécaniques

Les éléments d'alliage permettent également de modifier cette microstructure en modifiant la distribution, la présence et la morphologie des phases existantes.

La [figure I.2.12](#) ci-dessous donne des allures de courbes de traction si l'on augmente la teneur en carbone de l'acier. Dans ce cas, une augmentation du carbone permet d'augmenter la limite d'élasticité et la résistance mécanique. L'allongement, cependant, diminue. D'autres propriétés mécaniques peuvent être également affectées par cet ajout.

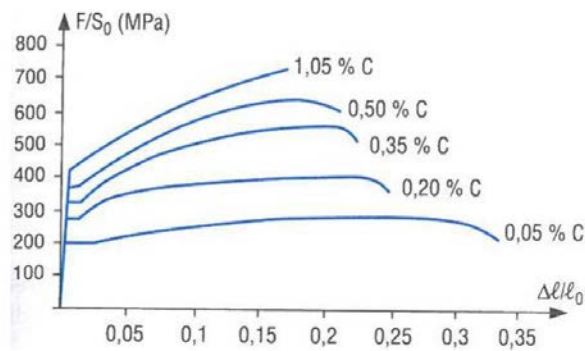


Figure I.2.12 - Influence de la teneur en carbone sur les courbes de traction uniaxiale d'aciers non alliés
 crédit : Précis de métallurgie : élaboration, structures-propriétés, normalisation - Barralis J., Maeder G.

Des éléments tels que le manganèse, le silicium, le niobium ou le vanadium sont ajoutés dans l'acier pour améliorer les propriétés mécaniques ou d'autres propriétés fonctionnelles. Le chrome est par exemple utilisé pour obtenir une meilleure résistance à la corrosion (cas des aciers inoxydables).

L'azote, le soufre ou le phosphore peuvent également participer à l'élaboration de l'acier. Ils améliorent certaines propriétés mécaniques, considérant qu'une teneur trop élevée peut affecter sa soudabilité.

Les aciers pour les produits palplanches

Les aciers pour les palplanches sont principalement des aciers non alliés tels que définis par la norme EN 10 020 – Définition et classification des nuances d'acier. Les normes indiquent la composition chimique et les propriétés à respecter en conformité avec les règles de dimensionnement de ces produits. Un exemple est donné dans la figure I.2.13 concernant la norme palplanche EN 10 248-1 – Systèmes de désignation des aciers – Partie 1 : désignation symbolique.

Nuances d'acier des palplanches

Nuance d'acier EN 10248	Limite d'élasticité min. R_{eH} MPa	Résist. à la traction min. R_m MPa	Allongement min. $L_0=5,65\sqrt{S_0}$ %	Composition chimique (% max)					
				C	Mn	Si	P	S	N
S 240 GP	240	340	26	0,25	–	–	0,055	0,055	0,011
S 270 GP	270	410	24	0,27	–	–	0,055	0,055	0,011
S 320 GP	320	440	23	0,27	1,70	0,60	0,055	0,055	0,011
S 355 GP	355	480	22	0,27	1,70	0,60	0,055	0,055	0,011
S 390 GP	390	490	20	0,27	1,70	0,60	0,050	0,050	0,011
S 430 GP	430	510	19	0,27	1,70	0,60	0,050	0,050	0,011
Spécification interne d'ArcelorMittal									
S 460 AP	460	550	17	0,27	1,70	0,60	0,050	0,050	0,011

Figure I.2.13 - Nuances d'acier suivant la norme EN 10248-1 - crédit : extrait du catalogue Arcelor Mittal

Les désignations des nuances d'acier sont définies dans la norme EN 10 027-1 – Systèmes de désignation des aciers : Partie 1 – désignation symbolique.

- S désigne un acier de construction, les trois chiffres suivants correspondent à la limite d'élasticité minimale requise pour la gamme d'épaisseur la plus faible ;
- GP signifie que les autres caractéristiques (G) sont définies dans la norme de livraison des palplanches (P).

Le même principe s'applique aux dénominations des aciers pour tubes, tels que définis dans l'Euronorme EN 10 219-1.

- JR et J0 indiquent une contrainte sur la valeur minimale de résilience, respectivement 27J à 20°C et 0°C.
- M ou N désignent un état de livraison respectivement thermomécanique ou normalisant, soit autre que brut de laminage.
- H désigne les profilés creux.

Un certificat du matériel peut être demandé par le client suivant la norme EN 10 204 – 1. Cette norme décrit le contexte normatif du certificat de conformité à la réception des produits livrés.

Ces aciers, pourtant livrés selon différentes normes, sont tous des aciers de construction non alliés. Bien qu'ils présentent des microstructures, et donc des propriétés mécaniques distinctes, le risque de corrosion galvanique entre ces aciers nus est faible. Cette remarque est valide uniquement pour ces aciers et pour des aciers à un stade de corrosion identique.

Les aciers à résistance améliorée à la corrosion

Des aciers à résistance améliorée à la corrosion ont été développés par certains sidérurgistes pour les applications en milieu marin principalement. Ces aciers font partie des aciers faiblement alliés ou micro-alliés, car ils contiennent des teneurs en éléments d'alliage supérieures aux limites prescrites par la norme EN 10 020. Ils ne peuvent donc plus appartenir à la catégorie des aciers non alliés.

Ils ne doivent pas être confondus avec les aciers inoxydables, qui sont très alliés et ont des comportements différents en corrosion.

L'acier normé ASTM A690 - *High-Strength Low-Alloy Nickel, Copper, Phosphorus Steel H-Piles and Sheet Piling with Atmospheric Corrosion Resistance for Use in Marine Environments* a été commercialisé sous le nom de Mariner, par Bethlehem Steel à partir de 1964. Cet acier, allié aux Cu (min 0,5 %m), Ni (0,4–0,5 %m) et P (0,08 – 0,15 %m), est plus résistant à la corrosion en zone d'éclaboussures et à la corrosion atmosphérique. L'entreprise française Pompey a aussi mis au point, dans les années 1950-1960, des aciers au chrome/aluminium pour leur bon comportement en atmosphère marine.

D'autres nuances ne faisant pas l'objet de normes peuvent être proposées par les producteurs. Ainsi des expérimentations récentes de palplanches en nuance AMLoCor par ArcelorMittal montrent qu'elles peuvent apporter une nouvelle solution de protection en milieu portuaire. Cette nuance d'acier est plus résistante à la corrosion marine en zone d'immersion, incluant la zone des basses eaux, grâce à sa teneur en chrome et en aluminium.

Les propriétés mécaniques des aciers ASTM A690 et AMLoCor sont comparables à celles de nuances d'aciers non alliés (figure I.2.14), ce qui permet un dimensionnement selon les méthodes utilisées pour les aciers de construction standards.

AMLoCor®	Limite	Résist. à la	Allongement min.	Composition chimique (% max)							
	d'élasticité min. R _{eH}	traction min. R _m	$L_0=5,65\sqrt{S_0}$	C	Mn	Si	P	S	N	Cr	Al
	MPa	MPa	%								
Blue 320	320	440	23	0,27	1,70	0,60	0,05	0,05	0,011	1,50	0,65
Blue 355	355	480	22	0,27	1,70	0,60	0,05	0,05	0,011	1,50	0,65
Blue 390	390	490	20	0,27	1,70	0,60	0,05	0,05	0,011	1,50	0,65

Figure I.2.14 - Propriétés mécaniques et compositions chimiques AMLoCor - crédit : Arcelor Mittal

La combinaison des éléments d'addition chrome et aluminium permet la formation d'une couche de produits de corrosion compacte et stable qui réduit notablement la vitesse de corrosion d'un facteur 3 à 5 dans la zone d'immersion.

Bien que le risque de corrosion de ces aciers à résistance améliorée entre eux et avec les aciers de construction classiques semble faible, leur comportement lors d'un couplage galvanique reste mal connu et il est préférable de ne pas combiner ce type d'acier avec un acier de construction classique. Pour une paroi mixte, il est par ailleurs déconseillé de combiner les tubes et les palplanches en aciers faiblement alliés avec des raccords ou soudures en aciers de construction au vu des rapports de surface.

État de surface des produits

Les palplanches sont en général livrées brutes de laminage, ce qui signifie qu'il n'y a pas de traitement après refroidissement. Lors du laminage, la température favorise la croissance d'oxydes de fer en surface par oxydation. Cette fine couche, appelée calamine, est plus noble que l'acier et constitue dans un premier temps une barrière contre la corrosion.

L'irrégularité de cette couche favorise ensuite la corrosion des endroits sans calamine. Cette corrosion, bien qu'impressionnante les premiers mois, est négligeable sur la durée de vie de ces structures. Le phénomène de corrosion, lors du stockage par exemple, entraîne la transformation progressive de cette couche. Une préparation de surface particulière, telle que le sablage ou le grenailage, n'est donc pas nécessaire.

Ultérieurement, la manipulation des produits sidérurgiques doit être faite avec précaution afin d'éviter les empreintes mécaniques sur les surfaces peintes. Ces empreintes peuvent être le siège, principalement en immersion, de zones préférentielles de corrosion car l'acier y est mis à nu.

Des imperfections, ainsi que des réparations de surface, sont admises dans les limites définies par les normes des produit. Dans le cadre d'un revêtement ultérieur, il est important de le préciser à la commande afin de se faire livrer le produit adéquat. Dans le cadre d'une galvanisation à chaud, par exemple, il convient de sélectionner certaines compositions chimiques.

Soudabilité des aciers

La soudabilité des aciers dépend du produit concerné, ainsi que des procédés de soudage. Le soudage à l'arc dans les règles de l'art est généralement compatible pour les aciers de construction palplanches. Les recommandations générales pour le soudage des aciers palplanches sont rapportées dans la norme EN 1011- 1.

Les produits palplanches sont majoritairement soudés par procédé MAG ou soudage sous flux, en usine ou chez le sous-traitant. C'est le cas des raccords sur les éléments porteurs ou bien des palplanches spéciales. L'aptitude de soudage d'un acier dépend de nombreux facteurs dont sa composition. Il est considéré qu'un acier non allié à faible teneur en carbone, type S ou E, a une bonne soudabilité. Concernant les aciers faiblement alliés, c'est l'indice de carbone-équivalent (C_{eq}) qui permet de vérifier leur bonne soudabilité ou non.

Sa formule et sa limite supérieure sont indiquées dans les normes correspondantes. La formule de l'institut international de soudure (IIS/IIW), reprise dans la norme EN 10 248-1 est la suivante :

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (2.1)$$

Dans le cas où C_{eq} est inférieur à 0,4, l'acier a une bonne soudabilité à température ambiante. Dans le cas où C_{eq} est compris entre 0,45 et 0,7, l'acier a une soudabilité moyenne, et nécessite un préchauffage de 100 à 400°C. Dans le cas où C_{eq} est supérieur à 0,7, la soudabilité de l'acier est difficile et recours à des processus plus compliqués. Pour étudier la soudabilité des aciers inoxydables, on peut se référer à la norme norme EN 1011-3.

Le choix d'un alliage métallique d'apport et des paramètres de soudage sont primordiaux pour ne pas favoriser la corrosion galvanique et pour assurer le maintien des propriétés mécaniques. La corrosion galvanique est d'autant plus accélérée que la différence de surface entre deux pièces est grande. Certains assemblages de métaux sont à proscrire : acier-zinc, acier-acier inox, acier-aluminium.

Dans le cas d'un assemblage, le métal d'apport doit être au minimum aussi noble que le matériau de base.

2.3 Profil de corrosion et profil de contraintes

La prise en compte de la corrosion dans la définition des profilés dépend du système de protection. Ce point est évoqué en partie III.

Dans le cas du recours à une épaisseur sacrifiée à la corrosion, la définition de cette dernière est liée au fonctionnement mécanique de la structure qui conditionne son profil de contraintes. Il faut noter que la modification d'épaisseur liée à la corrosion influe sur la rigidité de la structure. Cette modification de rigidité dans le cas d'une interaction sol-structure va modifier le profil de contraintes et peut en particulier déplacer la cote des contraintes maximales. Il faut donc conduire des vérifications complètes sur la structure neuve et sur la structure corrodée. Dans le cas de structures complexes en interaction sol-structures, il n'est pas acceptable de se contenter d'une simple vérification des contraintes admissibles, il faut recalculer les contraintes en tenant compte des épaisseurs corrodées.

En fonction des structures, les conséquences de la prise en compte d'une épaisseur sont les suivantes :

- Un duc d'Albe mono-inertie ou un rideau non ancré sont caractérisés par une épaisseur unique et présentent un profil de contraintes qui est maximal dans le sol ce qui donne une marge de sécurité par rapport au profil de corrosion. En effet la contrainte maximale se situe hors des zones de forte corrosion en général concentrées autour de la zone de marnage (sauf cas particulier de corrosion en zone de jonction sédimentaire en pied d'ouvrage). La prise en compte d'une épaisseur sacrifiée par corrosion n'engendre pas automatiquement une surépaisseur des profilés ;
- Un duc d'Albe à inertie variable est optimisé pour adapter l'épaisseur d'acier des tubes au profil de contraintes. La prise en compte d'une épaisseur sacrifiée par corrosion engendre généralement une surépaisseur des tubes. La modification de la rigidité du duc d'Albe doit être analysée par une vérification de la structure neuve et de la structure corrodée en particulier dans le cas de duc d'Albe d'accostage ;
- Sur un rideau ancré ou sur les pieux d'un quai sur pieux, il peut y avoir coïncidence entre les profils de corrosion et de contraintes. La prise en compte d'une épaisseur sacrifiée par corrosion engendre généralement une surépaisseur des profilés.

3. LA CORROSION EN MILIEU PORTUAIRE OU FLUVIAL

Dans le cas des ouvrages métalliques portuaires, hormis les processus de corrosion galvanique mis en jeu dans le cadre d'une protection cathodique, le phénomène corrosion représente essentiellement un risque vis-à-vis des structures. La dégradation de ces dernières peut remettre en cause la sécurité des personnes, de l'environnement et des biens ainsi que l'exploitation d'un port de commerce, de pêche ou de plaisance.

3.1 Généralités sur la corrosion

La corrosion est un domaine qui se situe à l'interface de plusieurs sciences : la science des matériaux, la chimie, l'environnement, l'électrochimie ou encore la biologie. La corrosion correspond à des processus dont la terminologie et les méthodes d'investigation font l'objet de normes internationales (notamment la norme NF EN ISO 8044)[1].

Les différentes typologies de corrosion reposent sur un processus électrochimique général qui est résumé en première partie.

Bien que la corrosion concerne différents types de matériaux, seuls les matériaux métalliques sont pris en considération dans cet ouvrage.

Par ailleurs, la corrosion d'un matériau métallique engendre des produits qui peuvent jouer un rôle dans le ralentissement ou l'accélération du processus, raison pour laquelle leur processus de formation est décrit dans ce chapitre.

Les phénomènes mis en jeu par les différents types de corrosion ne sont pas tous parfaitement connus (corrosion influencée par les micro-organismes notamment) et il n'y a pas toujours un consensus sur leur fonctionnement précis. Aussi, le choix a été fait dans cet ouvrage de ne s'intéresser qu'aux théories les plus courantes et les plus reconnues.

3.1.1 Processus général électrochimique de la corrosion

La corrosion des matériaux métalliques en site aquatique relève essentiellement de processus dits électrochimiques .

L'origine de ce processus, la corrosion aqueuse, se trouve dans les propriétés de conduction électrique entre la phase métallique (conduction électronique) et la phase aqueuse, appelée également électrolyte ou milieu électrolytique (conduction ionique). À l'interface entre le matériau métallique et l'électrolyte, les réactions électrochimiques assurent les transferts de charges.

Cependant, les caractéristiques chimiques du matériau et de l'environnement influencent directement ce processus et les produits de transformation qui en résultent.

Le terme électrolyse, signifiant étymologiquement décomposition par l'électricité, n'est donc pas le plus approprié dans un contexte maritimo-fluvial, du fait qu'il est relativement restrictif par rapport aux facteurs d'influence chimique du milieu.

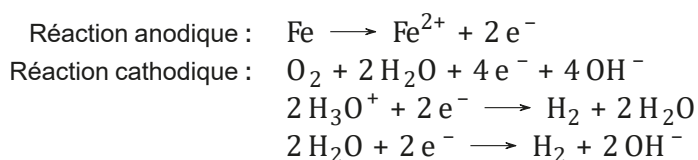
La corrosion électrochimique d'un matériau correspond à une réaction d'oxydo-réduction :

- la réaction d'oxydation d'un métal est appelée réaction anodique ;
- la réaction de réduction d'un agent oxydant est appelée réaction cathodique.

Dans le cas des alliages métalliques en eau de mer, saumâtre ou douce (milieu basique ou neutre), deux cas de figure peuvent se rencontrer :

- le cas d'un environnement aéré, pour lequel l'agent oxydant est l'oxygène dissous ;
- le cas d'un environnement désaéré, pour lequel l'agent oxydant est l'eau (H_2O ou H^+). Le matériau est toujours le siège de la réaction d'oxydation.

Ainsi, un acier immergé en milieu maritimo-fluvial aéré subit une réaction anodique de dissolution du fer, à laquelle s'associe la réaction cathodique de réduction de l'oxygène dissous, des ions ou de l'eau :



La réaction anodique correspond à une production d'ions métalliques qui participent à la formation de composés généralement solides, les produits de la corrosion.

La réaction anodique ne peut se produire sans la réaction cathodique et vice-versa, car les électrons produits par la réaction anodique sont consommés par la réaction cathodique.

Le mécanisme d'ensemble est appelé pile de corrosion.

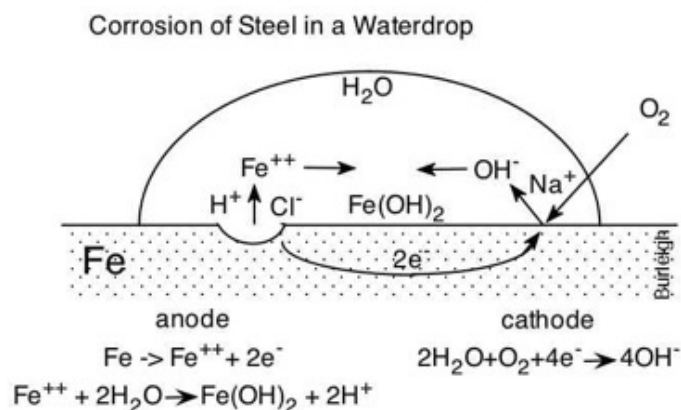


Figure I.3.1 - Principe de l'action corrosive avec présence aqueuse

3.1.2 Formation des produits de corrosion de l'acier en environnement aquatique

Peu de métaux se trouvent à l'état natif dans la nature. La plupart d'entre eux se rencontrent sous forme oxydée. Réduits à l'état métallique, ils ont tendance, dans certains environnements, à revenir à la forme oxydée qui est leur forme thermodynamiquement stable.

Ces substances formées sous l'effet de la corrosion, pour reprendre la définition de la norme ISO 8044[1], correspondent à ce qui est communément appelé rouille. En réalité, ces produits de corrosion qui sont d'une grande diversité possèdent des propriétés variables et engendrent des interactions complexes et souvent méconnues avec le matériau et son environnement chimique et biologique.

Du fait de cette complexité, seul le cas de l'acier au carbone en milieu maritime est abordé ici à titre d'exemple.

Pour les matériaux métalliques à base de fer, les principaux constituants de la rouille sont les oxyhydroxydes ferriques ($\text{FeO}(\text{OH})$) qui donnent généralement une couleur orangée caractéristique et connue de tous. Néanmoins, ce n'est que la partie visible de l'iceberg car selon le degré d'oxydation du fer, selon les autres éléments présents dans le matériau et dans le milieu et selon certains facteurs environnementaux (température, pH et oxygène dissous notamment), plusieurs types de produits de corrosion peuvent s'observer, par exemple :

- les oxydes de fer (la magnétite, la maghémite) ;
- les oxyhydroxydes ferriques (la goethite, la lépidocrocite, l'akaganéite, la ferrihy-drite) ;
- les rouilles vertes (sulfatées, carbonatées ou chlorurées) ;
- les sulfures de fer (la mackinawite).

D'autres produits de corrosion peuvent être observés dans certains cas particuliers. C'est le cas de produits de corrosion carbonatés (la sidérite et la chukanovite) pouvant se former en milieu anoxique. Certains produits n'ont été identifiés que sur des objets archéologiques ferreux, tels que des hydroxychlorures ferreux.

En environnement portuaire, maritime ou fluvial, les principaux facteurs susceptibles d'influencer la nature des produits de corrosion sont les suivants :

- le niveau d'oxygène dissous disponible selon les couches de corrosion (du milieu extérieur vers l'acier) ;
- la zone d'exposition (dans la colonne d'eau, au soleil, aux embruns) ;
- les conditions hydrodynamiques du site (courant, agitations) ;
- le type de structure (matériau, procédé de fabrication, design) ;
- les éléments chimiques présents dans le milieu (sulfates, carbonates, chlorures,...) ;
- les micro-organismes colonisant ces dépôts (bactéries pouvant oxyder ou réduire certains composés ou produits de corrosion).

Le plus souvent, pour l'acier en environnement marin, la stratification au travers d'un dépôt de produits de corrosion sera directement liée à la concentration en oxygène dissous. Il s'agit d'un facteur majeur, pour lequel le niveau d'oxydation va varier en fonction de l'état de valence du fer qui se trouve sous la forme de $\text{Fe}(\text{II})$ ou de $\text{Fe}(\text{III})$.

Surface en contact avec l'environnement	
Oxy-hydroxydes ferriques (FeOOH)	3
Magnétite (Fe ₃ O ₄)	2,67
Rouille verte (Fe ^{II} , Fe ^{III} (OH) ₂ SO ₄ ·nH ₂ O)	2,33
Sulfures de fer	2
Surface en contact avec le métal	
	Degré d'oxydation du fer

Figure 1.3.2 - Degrés d'oxydation du fer

Bien que non représentatifs de l'ensemble des cas de figure pouvant être identifiés en environnement naturel, les photographies et schémas ci-dessous illustrent l'aspect et le processus de formation de produits de corrosion d'un acier au carbone en environnement littoral. Les deux principaux cas de figure concernent la formation de dépôts en sites marnants (alternance d'immersion/émersion) et en sites immergés (constamment dans le milieu aqueux).

En zone de marnage, l'aspect externe des dépôts présente dans la plupart des cas les caractéristiques suivantes :

- faible épaisseur (quelques micromètres à quelques millimètres) ;
- forte adhérence à la surface : il est difficile d'atteindre une surface métallique brillante et le dépôt tend à se détacher en paillettes ;
- peu de stratification visible ;
- colonisation par des organismes parfois très adhérents (coquillages et algues).



Dépôt de corrosion formé à la côte + 4m CM sur un pieu métallique en estuaire



Dépôt de corrosion formé à la côte + 4m CM sur un pieu métallique en Atlantique

Figure 1.3.3 - Illustration de différentes formes de produits de corrosion - crédit : ACCOAST

Dans le cas des zones exposées à l'alternance émergence/immersion, voire dans la zone d'éclaboussure avec maintien de conditions humides, la formation de magnétite est favorisée, ainsi que la précipitation des produits carbonatés. Parallèlement, l'assèchement périodique des dépôts tend à limiter la quantité d'eau en leur sein et engendre ainsi la précipitation des sels dissous à la surface des dépôts, favorisant ainsi une densification des couches de corrosion.

De plus, les effets mécaniques des conditions hydrodynamiques (balayage de la marée) tendent à limiter la formation d'une couche exogène, peu adhérente. La morphologie plus compacte qui en résulte limite la pénétration de l'oxygène et favorise également la formation de magnétite.

En zone d'immersion constante, l'aspect externe des dépôts présente dans la plupart des cas les caractéristiques suivantes :

- épaisseur plus importante qu'en site marnant (quelques millimètres à quelques centimètres) ;
- faible adhérence à la surface métallique : il est facile d'atteindre une surface métallique brillante et le dépôt tend à se détacher en plaques ;
- une stratification souvent visible (couches orangées à noirâtres) ;
- une colonisation par des organismes d'une grande diversité, pour certains peu adhérents voire mobiles (coquillages, algues, crustacés).

Dans le cas des zones constamment immergées le contact direct entre l'oxygène dissous et le fer au cours des premiers jours ou premières semaines provoque la formation rapide de $\text{FeO}(\text{OH})$ (oxyhydroxydes de type lépidocrocite par exemple). Puis, au cours des six premiers mois, l'épaississement de cette couche favorise les stades intermédiaires d'oxydation, formant de la rouille verte (RV).

On admet généralement que le fer migre ensuite vers l'interface RV/ $\text{FeO}(\text{OH})$ via la porosité de la couche d'interface. Mis à part la possibilité de migration du fer, le passage d'oxygène jusqu'au cœur de la couche d'interface est également envisageable. Ainsi, au cours des mois suivants, selon le gradient en oxygène à travers le dépôt, la rouille verte progresse en épaisseur, mais est simultanément oxydée dans sa partie supérieure en goethite ou en magnétite par exemple. La concentration progressive des chlorures et des sulfates, provenant de l'eau de mer, favorise la formation d'akaganéite et de rouille verte sulfatée (majoritairement) ou chlorurée (occasionnellement).

Ces rouilles vertes sulfatées représentent des réservoirs de sulfates exploitables par la flore bactérienne sulfurogène qui a pour particularité de réduire les sulfates en sulfures. Ceux-ci forment alors des sulfures de fer à la surface du matériau.

Il est impossible de représenter l'ensemble des configurateurs possibles de formation et de transformation des produits de corrosion. D'ailleurs de plus en plus d'études portant sur la formation d'oxydes de fer selon les facteurs environnementaux démontrent la complexité des processus, mais également le potentiel que cela représente en termes d'exploration scientifique.

Ainsi, un dépôt de corrosion peut être considéré comme :

- un habitat en tant que tel, support de développement biologique, des bactéries aux organismes filtreurs ou crustacés ;
- un témoin de processus de corrosion à l'instant t , avec un potentiel d'aide à l'interprétation des processus de corrosion mis en jeu ;
- un système de protection de l'acier, selon les propriétés électrochimiques des différentes couches d'oxydes.

L'observation des dégradations et des profils de vitesse permet de connaître la vitesse de dégradation à un instant t . Cependant ces valeurs ne peuvent être prises isolément pour préjuger de l'évolution de cette vitesse. Il est en effet primordial de considérer le matériau comme faisant partie d'un système qui subit l'influence directe de son environnement et qui évolue dans le temps (changement de la fonction de l'ouvrage, modification de la turbidité ou de la vitesse d'écoulement du milieu en contact).

3.2 Typologie de la corrosion des matériaux métalliques

Il existe une douzaine de formes de corrosion, dont certaines résultent d'une conjonction de phénomènes. Parmi ces différentes formes, certaines sont spécifiques à des domaines industriels ou à des environnements particuliers.

Dans le cadre d'un environnement portuaire maritime ou fluvial, pour ce qui concerne l'acier au carbone, la très grande majorité des cas correspond aux trois types de corrosion suivants :

- la corrosion générale ou uniforme ;
- la corrosion galvanique ;
- la corrosion caverneuse ou corrosion sous crevasse.

Ces trois typologies sont donc plus particulièrement exposées dans ce chapitre. Les autres typologies de corrosion sont néanmoins présentées de façon plus succincte, afin d'avoir une vue exhaustive des possibilités d'interactions entre un environnement, un matériau et l'utilisation de ce dernier.

La première approche de la corrosion étant généralement visuelle, les formes de corrosion se distinguent traditionnellement soit par l'aspect de l'attaque qui en résulte (corrosion par piqûres), soit par la localisation (corrosion intergranulaire). Dans d'autres cas cependant, la désignation est associée à un mécanisme (corrosion sous crevasse, corrosion sous contrainte, corrosion-érosion).

Cette partie ne s'intéresse qu'aux phénomènes de corrosion en tant que tels. Les différents métaux étant plus ou moins sensibles à chacun de ces types en fonction des facteurs environnementaux, une description par type de matériau fait l'objet de la partie La corrosion des matériaux métalliques en milieu portuaire ou fluvial .

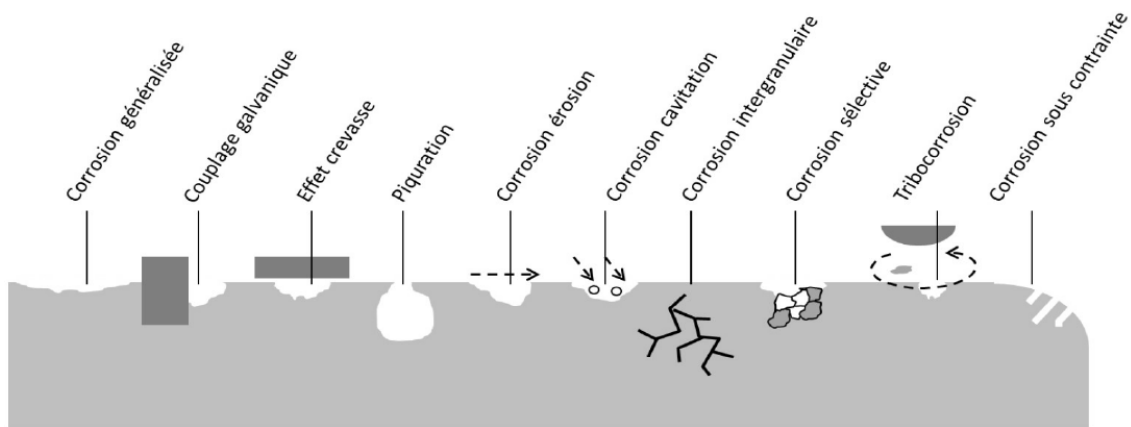


Figure 1.3.4 - Synthèse des typologies et illustration des faciès de corrosion

3.2.1 La corrosion généralisée ou uniforme

Il s'agit d'une corrosion progressant approximativement à la même vitesse sur la totalité de la surface d'un métal donné en contact avec un milieu environnant corrosif. C'est la forme de corrosion la plus simple, et dans une certaine mesure la mieux connue (lorsque le matériau et le milieu sont strictement définis).

Elle survient dans le cas d'un environnement homogène (pas de gradient de température, pression ou concentration le long de l'interface), et lorsque le métal lui-même présente vis-à-vis de cet environnement un comportement suffisamment homogène (en raison notamment de l'absence d'inclusions ou de défauts structuraux, ou en raison de la non-sélectivité de l'environnement vis-à-vis de ces défauts).

Des micro-piles de corrosion se forment et se déplacent sur l'ensemble de la surface.

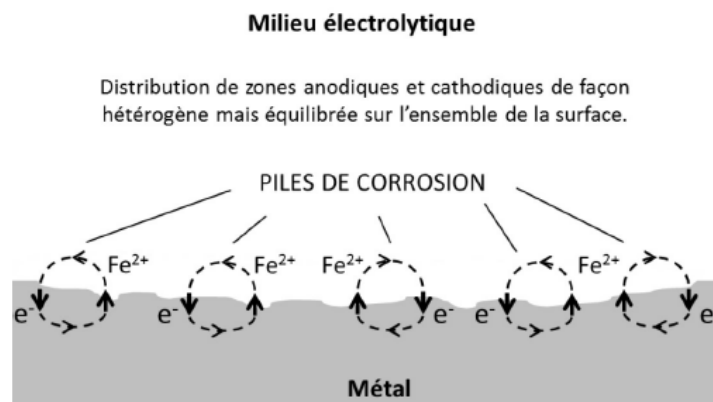


Figure 1.3.5 - Principe de la corrosion généralisée

3.2.2 La corrosion galvanique

La corrosion galvanique est due à la formation d'une pile électrochimique.

C'est une des formes de corrosion les plus fréquentes en milieu aqueux. Les zones où se produisent les réactions anodiques (corrosion du matériau) et cathodiques (réduction de l'oxydant) sont distinctes. Cette localisation des réactions est essentiellement liée à une hétérogénéité provenant d'un alliage métallique, du milieu ou des conditions physico-chimiques à l'interface.

La corrosion galvanique ou corrosion par couplage galvanique est souvent restreinte à sa forme la plus commune, à savoir l'action de piles bimétalliques (corrosion bimétallique).

En effet, pour un milieu donné, chaque métal peut être caractérisé par son potentiel de corrosion.

Il est alors possible d'établir ce que l'on nomme des séries galvaniques donnant, pour un milieu considéré, le classement des différents métaux selon leur potentiel mesuré expérimentalement.

À partir de ces indications, on peut prévoir le sens de la pile qui sera créée à partir de deux métaux quelconques couplés électriquement, à condition que l'écart de potentiel soit suffisant pour créer une pile. La qualité du contact électrique joue également un rôle important.

Dans le cas général, il y a un accroissement de la vitesse de corrosion d'un alliage métallique le moins noble (potentiel de corrosion le moins élevé) et une diminution de la vitesse de corrosion d'un alliage métallique le plus noble (potentiel de corrosion le plus élevé).

Le rapport de surfaces est également un facteur important : une grande surface de cathode par rapport à la surface de l'anode engendre une vitesse de corrosion plus importante.

Cet effet peut être mis à profit pour lutter contre la corrosion en réalisant volontairement un couplage galvanique (protection cathodique) : le matériau sur lequel la réaction anodique est prépondérante (anode galvanique) protège le reste de la structure qui est le siège de la réaction cathodique.

La corrosion due au couplage galvanique de deux matériaux va dépendre de nombreux paramètres liés au milieu :

- composition, pH et impuretés ;
- concentration en espèces réductibles (O_2 , H_3O^+) ;
- résistivité, température et volume de l'électrolyte ;
- débit et agitation (phénomènes diffusionnels) ;
- présence d'espèces susceptibles de précipiter du fait des variations locales de pH (dépôts calco-magnésiens).

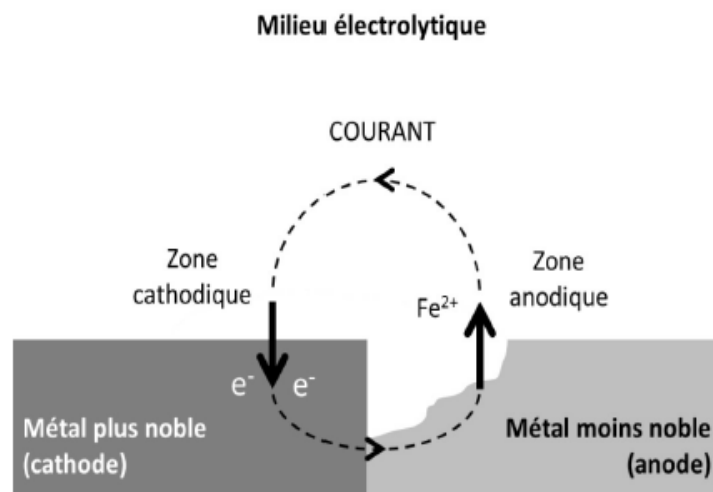


Figure I.3.6 - Principe de la corrosion galvanique

3.2.3 La corrosion cavernueuse ou corrosion par effet de crevasse

La corrosion cavernueuse ou par effet de crevasse est associée à la présence d'une ouverture étroite (joints, interstices, dépôts), c'est-à-dire une zone confinée avec un faible volume d'eau et une vitesse d'écoulement proche de zéro. Ce phénomène concerne tous les matériaux.

Ce phénomène induit une différence d'accessibilité de l'oxygène et/ou d'autres formes chimiques entre deux parties d'une structure, créant une pile de corrosion.

La [figure I.3.7](#) explicite les mécanismes en présence.

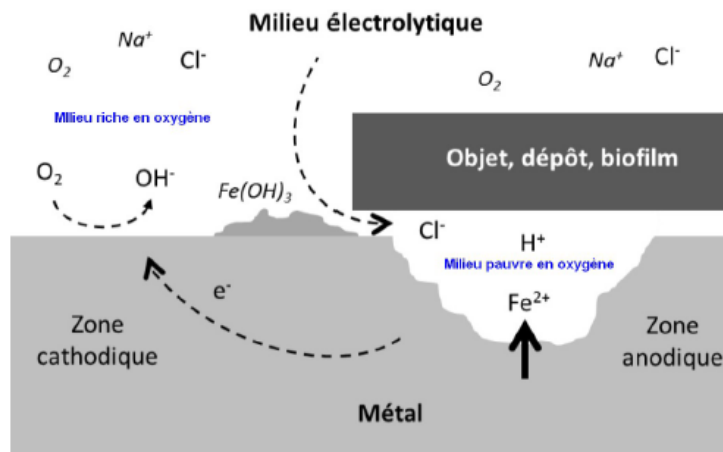


Figure I.3.7 - Principe de la corrosion caverneuse

3.2.4 La corrosion par piqûres

La corrosion par piqûres est produite par certains anions, notamment les chlorures, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince (ce qui est typiquement le cas des alliages passivés tels que les aciers inoxydables, par exemple, ou dans le cas de mauvaises qualité du substrat formant le film d'oxyde).

Ce type de corrosion se traduit par l'apparition de piqûres (c'est-à-dire de cavités), progressant à partir de la surface d'un alliage métallique.

Ce phénomène concerne une grande variété de matériaux (aciers, aciers inoxydables, alliages de nickel, de titane, d'aluminium ou de cuivre) ; il se produit souvent en présence de paramètres aggravants tels que les chlorures.

Ce type de corrosion est très difficile à détecter par examen non destructif, car il n'engendre que de faibles pertes de masse. Il peut parfois conduire à la ruine d'une installation sans avoir été détecté.

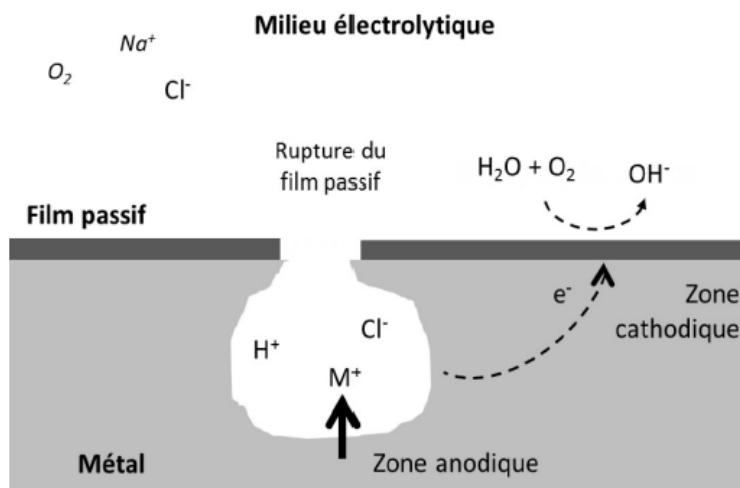


Figure I.3.8 - Principe de la corrosion par piqûres

3.2.5 La corrosion érosion et la corrosion cavitation

La corrosion-érosion ou la corrosion-abrasion sont dues à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière. Elle a souvent lieu sur des alliages métalliques exposés à l'écoulement rapide d'un fluide. Elle affecte de nombreux matériaux (aluminium, acier au carbone...) et est particulièrement connue pour les alliages de cuivre en milieu marin.

Ce phénomène correspond à une dégradation de la surface sous l'effet de l'impact de particules, de gouttelettes, d'un jet, ou sous l'action d'un écoulement turbulent au voisinage d'un défaut de surface. La turbulence locale ainsi créée

contribue à éroder le film protecteur (pile de concentration, usure mécanique, augmentation de la vitesse de dissolution par déplacement de l'équilibre). Le phénomène a alors tendance à s'auto-accélérer.

La corrosion-cavitation est un phénomène résultant de l'action conjuguée de la corrosion et de la cavitation. Le phénomène de cavitation, bien connu en mécanique des fluides, consiste en la formation de bulles remplies de vapeur ou de gaz au sein d'un liquide en écoulement turbulent, lorsque la pression en un point du liquide devient inférieure à la pression de vapeur de celui-ci.

Lorsque les bulles formées par cavitation atteignent une région de pression plus forte, elles implosent en produisant une onde de choc. Cette dernière induit une fatigue locale du matériau conduisant à des ruptures répétées du film passif et à une attaque localisée.

Le phénomène de corrosion-cavitation affecte particulièrement les hélices de navires et les parties rotatives de pompes ou de turbines hydrauliques.

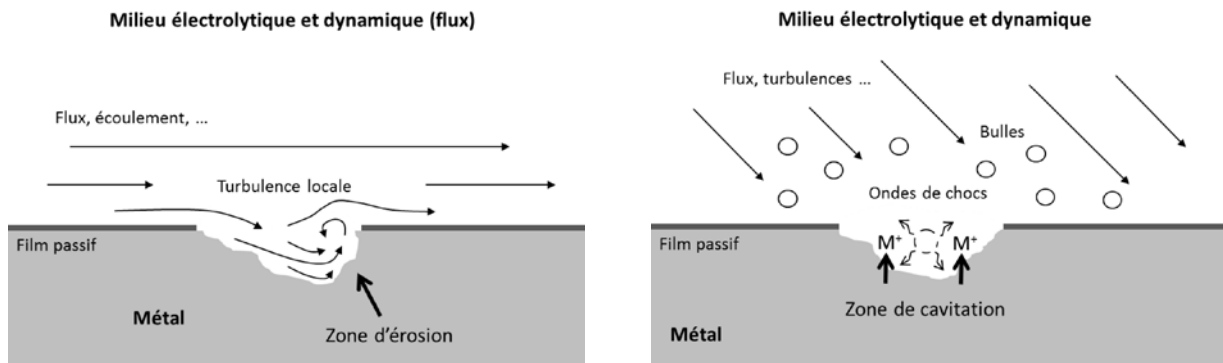


Figure I.3.9 - Principe de la corrosion-érosion (à gauche) et de la corrosion cavitation (à droite)

3.2.6 La corrosion intergranulaire

La corrosion intergranulaire est une attaque sélective aux joints de grains ou à leur voisinage immédiat, alors que le reste du matériau n'est pas attaqué. L'alliage se désagrège et perd toutes ses propriétés mécaniques.

Ce type de corrosion peut être dû soit à la présence d'impuretés dans le joint, soit à l'enrichissement (ou l'appauvrissement) local en l'un des constituants.

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

Ce type de corrosion est très difficile à détecter par examen non destructif, car il n'engendre que de faibles pertes de masse. Il peut parfois conduire à la ruine d'une installation sans avoir été détecté.

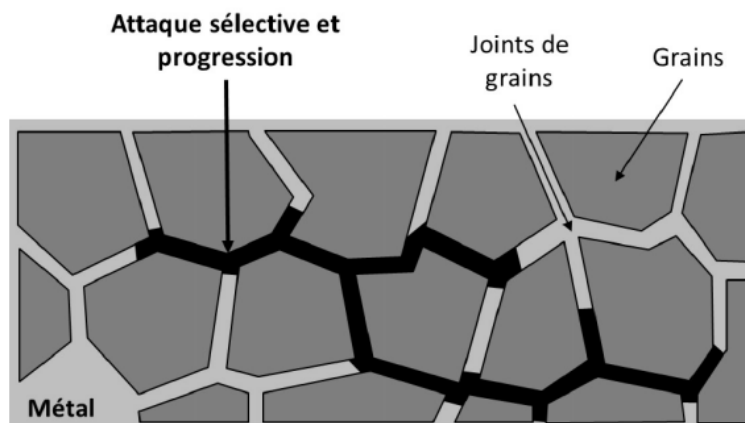


Figure I.3.10 - Principe de la corrosion intergranulaire

3.2.7 La corrosion sélective

La corrosion sélective correspond à l'oxydation d'un composant de l'alliage conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse (dont les différents constituants réagissent en proportion différente de leur teneur).

C'est le cas :

- des fontes grises *via* un phénomène de graphitisation (corrosion sélective de la fonte grise éliminant préférentiellement les constituants ferreux et laissant subsister le graphite) ;
- des laitons *via* un phénomène de dézincification (corrosion sélective du laiton dans laquelle le zinc est éliminé préférentiellement) qui se traduit dans certains cas par l'existence en surface de couches poreuses et friables de cuivre.

Dans tous les cas, ces attaques sélectives conduisent à modifier profondément les caractéristiques mécaniques des matériaux.

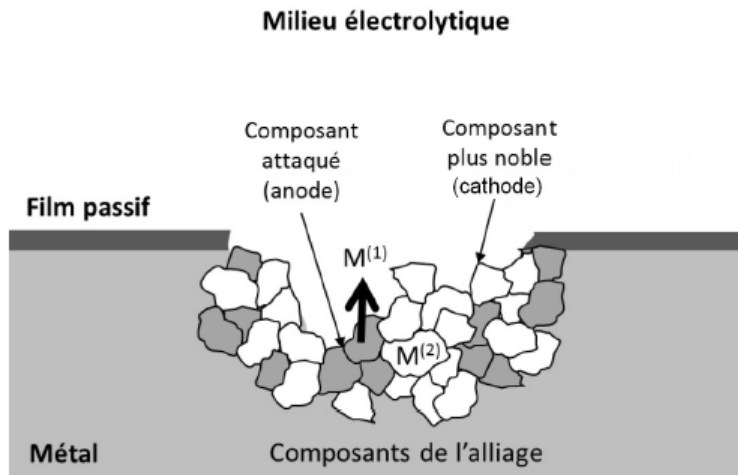


Figure I.3.11 - Principe de la corrosion sélective

3.2.8 La corrosion-frottement (tribocorrosion)

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

Elle se produit essentiellement lorsque l'interface est soumise à des vibrations (mouvement relatif répété de deux surfaces en contact) et à des charges de compression. Ce mouvement relatif peut être très faible (petits débattements de l'ordre de quelques micromètres). En présence d'un mouvement de frottement continu en milieu corrosif, on utilise de préférence le vocable de tribocorrosion. Dans le cas d'une sollicitation de type percussion/vibration, on parlera de frettingcorrosion. La distinction entre ces deux types de corrosion est décrite plus amplement dans la *norme ISO 8044*[1].

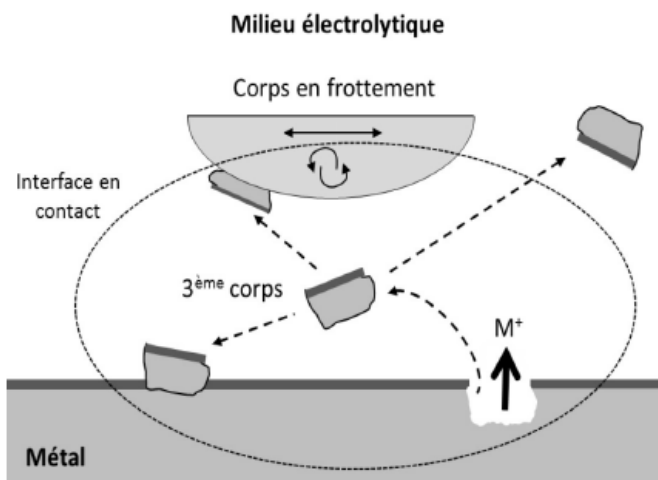


Figure I.3.12 - Principe de la tribocorrosion

3.2.9 La corrosion sous contrainte et la fatigue corrosion

La corrosion sous contrainte résulte de l'action commune de la corrosion et d'une contrainte mécanique (déformation d'un alliage métallique sous l'effet de contraintes appliquées ou résiduelles ou dû au soudage).

Ce phénomène concerne un grand nombre de matériaux, notamment passivables : le film protecteur se rompt localement sous l'action des contraintes, ce qui entraîne une corrosion localisée. Ce type de corrosion affecte préférentiellement les couples matériau-milieu pour lesquels le potentiel de corrosion est proche de la frontière de stabilité du film protecteur.

Les contraintes sont le plus souvent d'origine thermique (flux, dilatation, différence de pression), résiduelle (laminage, cintrage), ou encore inhérentes à l'installation (câbles, portiques).

La fatigue-corrosion est un phénomène très comparable à la corrosion sous contrainte, la différence étant que la sollicitation est alors cyclique. La rupture peut intervenir même si la contrainte appliquée est très inférieure à la résistance mécanique attendue pour l'acier. Les mécanismes évoqués pour rendre compte de la fatigue-corrosion sont les mêmes que ceux présentés pour la corrosion sous contrainte.

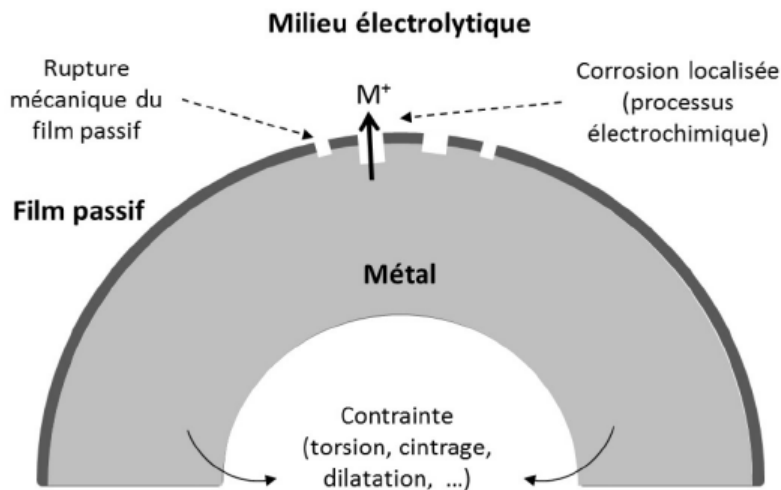


Figure I.3.13 - Principe de la corrosion sous-contraintes

3.2.10 La corrosion influencée par les micro-organismes (CIM)

La corrosion influencée par les micro-organismes (connue en anglais sous le sigle MIC pour *Microbiologically Influenced Corrosion*) est parfois désignée de façon impropre par biocorrosion. La norme ISO 8044 cite la corrosion bactérienne ou microbienne et la définit comme une corrosion associée à l'action de micro-organismes présents dans le système de corrosion. Ce phénomène peut prendre n'importe laquelle des principales formes de corrosion. Pour plus de précisions, il est recommandé la lecture du livre *Prévention et lutte contre la corrosion - Une approche scientifique et technique, Collection des sciences appliquées de l'INSA de Lyon, 2004*.

Tout matériau en contact avec un milieu biologique actif est susceptible de développer une corrosion influencée par les micro-organismes. Les micro-organismes n'utilisent pas les matériaux comme une source de nutriments. Ils modifient, de façon drastique de part leur métabolisme, la physico-chimie à l'interface matériau-environnement (pH, concentration en oxygène, concentration de composés chimiques). Se faisant, ils créent des conditions favorables à la corrosion. Les micro-organismes peuvent donc être considérés comme des catalyseurs de phénomènes de nature électrochimique correspondant à des typologies de corrosion précises (pile d'aération différentielle, couplage galvanique). Ils influencent également les produits de corrosion (par réduction ou oxydation). Ils peuvent, de cette manière, modifier leurs propriétés protectrices.

En environnement maritime, portuaire notamment, il est fréquemment fait état de corrosion influencée par les micro-organismes. Compte-tenu de la richesse microbiologique du milieu marin, les micro-organismes ont toujours un rôle, direct ou indirect, sur la corrosion. Ils font partie du système dans lequel se trouve le matériau. Il a ainsi été prouvé qu'ils participent directement à la transformation des produits de corrosion dans les phénomènes de corrosion généralisée, sans qu'il s'agisse pour autant d'une corrosion accélérée.

Par ailleurs, des études ont été menées au sujet d'un phénomène appelé corrosion accélérée en basses eaux (ALWC pour *Accelerated Low Water Corrosion*). Cette forme de corrosion serait influencée par les micro-organismes. Elle engendrerait des perforations d'ouvrages métalliques portuaires. Le phénomène est souvent associé à la présence de turbercules orangés, sans qu'il s'agisse d'une condition *sine qua non*.

En tout état de cause, dans certains cas de figure et dans beaucoup de secteurs industriels, les bactéries sont responsables de corrosions accélérées et/ou localisées difficiles à anticiper.

S'agissant d'organismes vivants, leurs croissances et leurs métabolismes sont difficiles à prévoir et à maîtriser. Ces organismes ont un fonctionnement en *consortia* bactérien (association de plusieurs groupes métaboliques). Ils s'adaptent aux modifications du milieu et à l'état de surface du matériau.

3.3 La corrosion des matériaux métalliques en sites aquatiques

Dans le cadre de cet ouvrage, seuls les matériaux métalliques sont pris en considération. Les principaux matériaux métalliques susceptibles d'être utilisés en environnement marin appartiennent à huit catégories, décrites dans les pages suivantes :

- les aciers ;
- les aciers faiblement alliés ;
- les aciers galvanisés ;
- les alliages inoxydables ;
- les alliages à base de nickel ;
- les alliages d'aluminium ;
- les alliages de titane ;
- les alliages cuivreux.

Chaque alliage est conçu pour répondre à des attentes opérationnelles différentes, que ce soit une résistance mécanique (dureté, souplesse, à haute température), une résistance à certaines formes de corrosion (généralisées, par piqûres, sous contraintes, par érosion) ou des propriétés spécifiques (poids, conductivité électrique ou thermique).

Les ouvrages portuaires, maritimes ou fluviaux sont quasi exclusivement constitués d'acier au carbone pour les infrastructures fixes. Néanmoins, d'autres alliages peuvent être utilisés, notamment les alliages d'aluminium (pontons et passerelles par exemple). Les autres alliages sont plutôt présents pour des pièces mécaniques d'ouvrages mobiles ou pour des éléments d'usage ou d'outillage portuaire.

3.3.1 Corrosion de l'acier

L'acier est plus utilisé en construction d'ouvrages portuaires et fluviaux que les autres matériaux métalliques grâce à ses propriétés mécaniques et de son faible coût de production. Il est employé dans les palplanches, les pieux, les ouvrages mobiles (ponts, écluses) ou encore pour le ferrailage des bétons.

Néanmoins, il s'agit d'un matériau sensible aux processus de corrosion, d'autant plus en environnement marin, ce qui nécessite d'appliquer un système de protection (revêtement et/ou protection cathodique) pour améliorer sa longévité. En règle générale, en eau de mer, la vitesse de corrosion généralisée de l'acier au carbone est inférieure à 0,1 mm/an.

L'acier est susceptible de subir la plupart des typologies de corrosion, incluant :

- la corrosion généralisée : l'oxygène dissous est le principal facteur d'influence en milieu aqueux ; ce processus est rapide lors de la première phase d'exposition (semaines et mois), il tend à se stabiliser dans le temps ;
- les corrosions localisées, que ce soit par effet de crevasse, par couplage galvanique ou sous l'influence de micro-organismes ; ces types de corrosion sont toujours liés à une hétérogénéité, soit du matériau (ou de sa surface), soit de l'environnement (oxygénation, pH ...).

La typologie de corrosion peut dépendre de la zone d'exposition des ouvrages (zones d'exposition atmosphérique, en marnage, en immersion).

3.3.2 Corrosion des aciers faiblement alliés

Les aciers alliés sont des aciers contenant des éléments d'alliage supplémentaires qui permettent d'obtenir des propriétés supérieures de dureté, de résistance à la corrosion, d'élasticité, de résistance à l'usure, ou encore de température critique (température à laquelle le métal subit une perte de ses propriétés). Un acier est faiblement allié si les éléments d'alliage comptent pour moins de 5 % de sa composition.

Les aciers faiblement alliés sont susceptibles de subir les mêmes pathologies de corrosion que les aciers au carbone et ces typologies dépendent de la zone d'exposition des ouvrages.

3.3.3 Corrosion des aciers galvanisés

La galvanisation consiste à recouvrir l'acier d'une couche de zinc qui se corrode à la place de l'acier. L'oxydation du zinc est plus lente que celle de l'acier (environ 25 fois plus lente).

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.

Un acier galvanisé 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.

Cette protection est malgré tout limitée dans le temps. La durée de protection est principalement fonction de l'épaisseur de la couche de galvanisation.

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 au fendillement lors du façonnage ou suite aux impacts. Mais ce produit reste néanmoins peu utilisé pour les ouvrages portuaires.

Les aciers galvanisés sont sensibles aux typologies de corrosion suivantes :

- corrosion uniforme ;
- corrosion caverneuse, notamment au niveau de zones de filetage ;
- corrosion galvanique au niveau des zones de soudage ou de brasage.

3.3.4 Corrosion des aciers inoxydables

Les aciers ou alliages inoxydables jouissent de la meilleure réputation dans les domaines industrialo-portuaires, notamment maritimes, du fait de leur grande résistance à la corrosion généralisée d'où l'appellation inoxydables.

Cette propriété est induite par la présence d'un film passif sur l'ensemble de la surface du matériau. Il s'agit en effet d'alliages de fer et de carbone, auxquels sont ajoutés essentiellement du chrome (au-delà de 11 %) qui provoque la formation d'une couche protectrice d'oxyde.

D'autres éléments peuvent être ajoutés, notamment le nickel qui améliore les propriétés mécaniques, ou encore le molybdène, le titane, le vanadium ou le tungstène qui améliorent la stabilité de l'alliage pour des températures définies.

Selon les alliages, les aciers inoxydables sont sensibles aux typologies de corrosion suivantes :

- corrosion par piqûres, notamment en présence de bio-films ainsi qu'en présence de chlorures ;
- corrosion par effet de crevasse, en zones confinées (joints, dépôts, recoins, bras morts, eaux stagnantes) ;
- corrosion intergranulaire, notamment les aciers du type AISI 302, 304, 316, 317 et 310 lors des opérations de soudage. Les aciers à bas carbone (AISI 304L et 316L) ou stabilisés au titane (AISI 321 et 316Ti) ou au niobium (AISI 347) sont moins sujets aux effets thermiques engendrant ce type de corrosion. Tous ne sont pas adaptés à une utilisation en immersion ;
- corrosion sous contrainte, notamment pour les aciers martensitiques (haute teneur en carbone pour un alliage plus dur).

3.3.5 Corrosion des alliages à base nickel

Les alliages à base nickel sont particulièrement résistants en environnement aqueux circulant et notamment marin. Certains alliages Ni-Cr-Mo font partie des plus performants.

Les alliages à base nickel sont passivables, comme les aciers inoxydables. Ils sont sensibles aux typologies de corrosion suivantes :

- corrosion par piqûres ;
- corrosion sous crevasse.

3.3.6 Corrosion des alliages d'aluminium

En environnement portuaire, les alliages d'aluminium sont les principaux matériaux composant des ouvrages de servitude tels que les passerelles et les pontons des ports de pêche et de plaisance. Ils sont également utilisés pour la fabrication d'éléments d'usage (échelles, taquets d'amarrage).

Il existe plusieurs séries d'alliages d'aluminium, dont les plus utilisés en environnement portuaire sont les séries 5000 (Al-Mg) et 6000 (Al-Mg-Si). Les risques de corrosion les plus importants pour les alliages d'aluminium sont :

- corrosion galvanique ;
- corrosion intergranulaire, notamment pour la série 5000 pour laquelle le composé inter-métallique peut précipiter aux joints de grains, devenant une anode vis-à-vis de l'intérieur des grains ;
- corrosion par piqûres, du fait d'une forte sensibilité des alliages d'aluminium aux métaux lourds susceptibles d'être présents dans les eaux portuaires (cuivre, plomb, mercure) ;
- corrosion feuilletante et corrosion sous contrainte, notamment dans le cas des alliages de la famille 7000 (Al-Zn-Mg avec ou sans Cu).

3.3.7 Corrosion des alliages de titane

Les alliages de titane, du fait de leurs coûts de production, sont utilisés dans des applications très spécifiques exigeant à la fois une excellente tenue à la corrosion et une très grande résistance mécanique (enceintes sous pression, ingénierie sous-marine et militaire).

Ces alliages possèdent une passivité naturelle due à un film mince qui leur donne un comportement général similaire à celui des aciers inoxydables et des alliages de nickel. Ce film d'oxyde, très adhérent, a la propriété de se reformer spontanément en présence d'air ou d'eau. Cette couche étant stable sur une large gamme de pH, de potentiel et de température ; le titane et ses alliages sont extrêmement résistants à la corrosion.

Malgré leurs nombreuses propriétés, les alliages de titane peuvent parfois être sujets aux formes de corrosion suivantes :

- corrosion par piqûres ;
- corrosion par effet de crevasse ;
- corrosion sous contrainte.

3.3.8 Corrosion des alliages cuivreux

Le domaine maritime utilise fréquemment des alliages cuivreux, notamment en construction (tuyauteries, tubes d'échangeurs ou de condenseurs). Le cuivre et ses alliages ont en effet une excellente résistance à la corrosion. Parmi les alliages de cuivre, les cupro-nickels et les cupro-aluminiums sont les plus fréquemment utilisés.

Par ailleurs, les propriétés biocides du cuivre (hors protection cathodique) lui confèrent une résistance importante à la corrosion influencée par les micro-organismes : ils limitent la formation de biofilms.

Ces alliages sont sujets aux typologies de corrosion suivantes :

- corrosion-érosion pour des vitesses importantes de circulation de l'eau ;
- corrosion-sélective, notamment la désaluminisation des cupro-aluminiums, la dézincification des laitons et la dénichelisation des cupronickels ;
- corrosion galvanique, notamment dans le cadre de raccords de tuyauteries ou de vannes ;
- corrosion cavernueuse, en présence de dépôts, de cavernes ou de crevasses. En raison d'une pile concentration, la corrosion a lieu à l'extérieur de la caverne.

Tableau 3.1 Seuils indicatifs de vitesses de circulation de l'eau provoquant de la corrosion-érosion pour des tubes de diamètre inférieur à 100 mm

Alliage métallique	Acier	Cupro-Nickel 90/10	Laiton	Inox
Vitesse minimum (m/s)	5	2.5	2	50

3.4 Mécanisme et aspect selon la zone d'exposition

Dans le cadre de cet ouvrage, il a été choisi de décrire les principales pathologies selon les zones d'exposition au milieu aqueux. Le lecteur trouvera ainsi plus facilement un point d'entrée vers la description du processus probable mis en jeu dans le cas qu'il souhaite identifier ou comprendre.

Le milieu aqueux représente en effet l'électrolyte nécessaire aux processus électrochimiques. Or ces processus peuvent varier en fonction du type d'exposition à cet électrolyte (permanente, temporaire) et de ses caractéristiques physico-chimiques (interfaces d'oxygénation, concentrations en sels).

En se basant sur un site marnant, qui présente le plus large cas de figure, six zones d'exposition peuvent être décrites :

- zone atmosphérique ;
- zone d'éclaboussure ;
- zone de marnage ;
- zone des basses-eaux et de sub-surface ;
- zone d'immersion ;
- zone sédimentaire.

En plus de ces zones, directement liées à un positionnement sur la hauteur de l'ouvrage, il convient de prendre en considération deux autres zones liées au mode de construction des ouvrages :

- zone interne aux bétons, c'est-à-dire les armatures métalliques ;
- zone de jonction d'éléments constituant un ouvrage (serrures de palplanches, tirants).

Le schéma de la [figure I.3.14](#) résume les principales zones choisies pour la localisation des pathologies sur un ouvrage métallique exposé aux effets de marée et il donne un exemple de profil classique de corrosion généralisée obtenu dans ce cas.

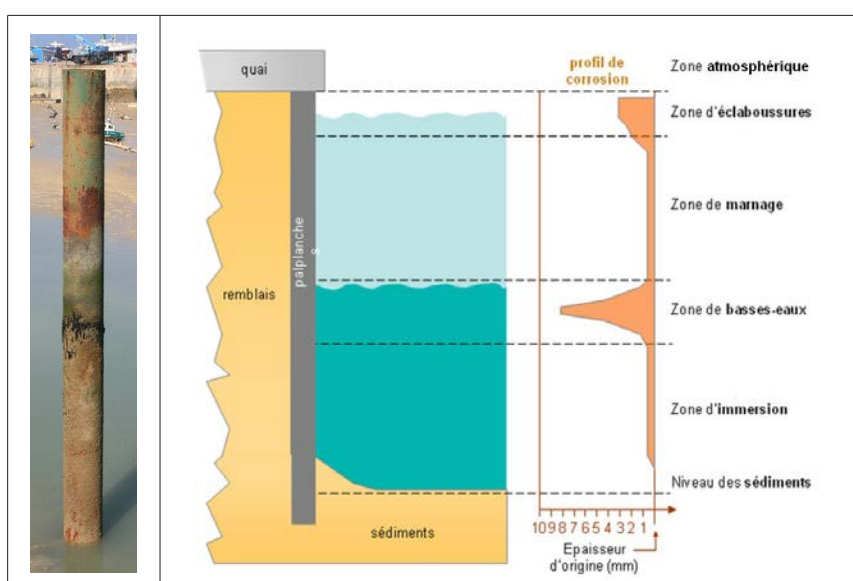
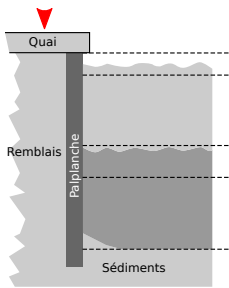


Figure I.3.14 - Illustration des principales zones d'exposition d'un ouvrage métallique en site maritime

La description des pathologies selon les zones concerne essentiellement l'acier, matériau de prédilection en matière d'ouvrages maritimes. Les autres alliages peuvent néanmoins être cités selon leurs avantages ou inconvénients pour certaines expositions.

C'est le cas, par exemple, des aciers faiblement alliés, qui présentent généralement une tenue supérieure à l'acier au carbone pour les zones atmosphériques et d'éclaboussure mais une résistance moindre en zones immergées.

3.4.1 Corrosion en zone atmosphérique



La zone atmosphérique est la zone située sur la partie terrestre des ouvrages, à distance des risques d'éclaboussure.

Selon l'endroit considéré : littoral ou humide, les risques de projection d'eau par les vents peuvent induire une atmosphère plus ou moins saline ce qui différencie la définition de la corrosion atmosphérique littorale de celle de la corrosion atmosphérique continentale.

C'est pourquoi la typologie de corrosion en zone atmosphérique des ouvrages portuaires est relativement proche de celle observée en zone d'éclaboussure.

Il s'agit le plus souvent d'une corrosion de type généralisée (ou localisée sur des défauts de peinture), induite notamment par les facteurs suivants :

- l'humidité de l'air, qui suffit à entretenir une saturation continue du film d'eau par l'oxygène de l'air ;
- les périodes de séchage, qui provoquent une concentration en sels, lesquels vont favoriser une rétention de la pellicule d'eau entretenant ainsi un mince film d'électrolyte propice aux processus de corrosion ;
- la concentration en chlorures, plus ou moins hétérogène à la surface de l'objet, qui peut former des produits de corrosion différents dont les propriétés facilitent des processus de corrosion localisée (piles d'aération différentielle ou couplages galvaniques par exemple).

La corrosion atmosphérique concerne le plus souvent les éléments d'usage et l'outillage (bollards, grues, rails). L'impact concerne donc directement l'exploitation portuaire plus que l'intégrité structurelle des ouvrages.



a) Cas d'un bollard



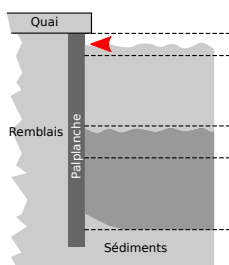
b) cas d'un chapeau de pieu de guidage

Figure I.3.15 - Exemples de corrosion en zone atmosphérique - crédit : A-Corros et ACCOAST

Autres matériaux

Les aciers inoxydables, les alliages de cuivre, tout comme certains alliages d'aluminium (série 5 000 notamment), sont généralement résistants à la corrosion en zone atmosphérique. Ils sont néanmoins exposés à des risques de corrosion par piqûres en présence d'embruns ou dans des zones de rétention d'eau.

3.4.2 Corrosion en zone d'éclaboussure



Il s'agit d'une zone qui n'est jamais recouverte par les marées, à l'exception éventuellement de surcotes en marées exceptionnelles. Cette zone est néanmoins exposée aux projections de ressac et aux embruns portés par le vent.

La corrosion, généralisée et localisée, y est très importante comparativement aux autres zones d'exposition.

Elle se manifeste par des zones fortement sollicitées (crevasses, cratères, perforations) engendrées 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 ;

- les périodes de séchage, liées notamment au niveau d'ensoleillement de la structure et donc à son orientation, qui provoquent une concentration en sels et des écarts de température influençant les phénomènes de corrosion ;
- les piles d'aération différentielle locales dues à la présence localisée de dépôts par exemple ;
- les piles entre les oxydes (cathodiques) et l'acier sous-jacent (anodique) ;
- l'effet érosif des projections, notamment sur les revêtements de protection et les dépôts.



a) Corrosion d'un pieu métallique



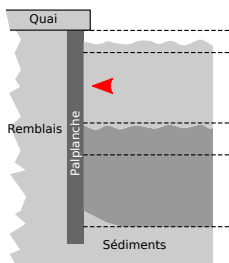
b) Corrosion d'un rideau de palplanches métalliques

Figure I.3.16 - Corrosion en zone d'éclaboussure - crédit : A-Corros et ACCOAST

Autres matériaux

Les aciers inoxydables sont sensibles à la corrosion par piqûres dans la zone d'éclaboussure, notamment sous l'action des chlorures en environnement maritime. Les alliages de cuivre et les alliages d'aluminium (série 5000) offrent une bonne résistance en zone d'éclaboussure.

3.4.3 Corrosion en zone marnante



Il est généralement admis que la corrosion modérée dans la zone de marnage est une corrosion atmosphérique partielle (temps des zones découvertes trop court). Cette zone est aussi sujette à une corrosion galvanique due au dépôt d'eau, très oxygénée, en zone supérieure, et présence d'eau peu oxygénée dans la zone en eau.

Cette interprétation ne considère pas l'éventuelle corrosion par piqûres provoquée par des particules en suspension qui peuvent se déposer à la surface d'alliages passivables.

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 (crustacés) 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.

Il s'agit néanmoins, globalement, d'une typologie de corrosion généralisée relativement homogène et présentant peu de risques de perforations ou de pertes d'épaisseurs nuisibles à l'intégrité de l'ouvrage.

La zone de marnage se trouve dans un milieu aqueux (film d'eau à la surface de l'acier) plus oxygéné que la zone immergée en permanence, ce qui engendre une pile d'aération différentielle. La zone de marnage joue alors le rôle de cathode et se dégrade moins que la zone de basses-eaux (voir le paragraphe suivant).



a) Corrosion d'un pieu métallique



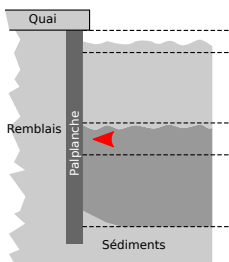
b) Corrosion d'un rideau de palplanches métalliques

Figure I.3.17 - Illustration de la corrosion en zone marnante - crédit : ACCOAST

Autres matériaux

Les aciers inoxydables sont sensibles à la corrosion par crevasse en zone de marnage, notamment en présence de bio-films ou d'organismes marins colonisateurs.

3.4.4 Corrosion en zone de basses-eaux



La corrosion en basses-eaux (LWC pour *LowWater Corrosion*), est un phénomène qui engendre des dégradations importantes, notamment pour les rideaux de palplanches. Cette corrosion serait imputable à une aération différentielle entre la zone de marnage, ayant un comportement cathodique, et la zone d'environ un mètre de hauteur sous la ligne des basses-eaux, ayant un comportement anodique.

La corrosion accélérée en basses-eaux (ALWC pour *Accelerated Low Water Corrosion*) est communément décrite comme étant une corrosion influencée par les micro-organismes qui accentuent l'effet de la corrosion en basses eaux (LWC).

Dans le cas des bassins pour lesquels il n'existe pas à proprement parler de zone de marnage mais plutôt d'une zone soumise à la houle, cette corrosion peut être désignée par le terme de corrosion de sub-surface .

La corrosion en basses-eaux peut occasionner des perforations rapides des structures métalliques et mettre en péril l'ouvrage.

Pour résumer, les principaux facteurs impliqués dans la corrosion en basses-eaux sont les suivants :

- aération différentielle à l'interface zone de marnage/zone d'immersion, la zone des basses-eaux présentant un comportement anodique par rapport à la zone de marnage qui subit la réduction de l'oxygène (comportement cathodique) ;
- hétérogénéité et pouvoir protecteur limité des dépôts de corrosion, ceux-ci étant peu adhérents, poreux et susceptibles de subir des décollements périodiques propices à la réactivation localisée des processus de corrosion ;
- influence de micro-organismes qui, en bénéficiant des propriétés des dépôts (gradient d'oxygène, réservoir de nutriments, conditions de croissance telles que le pH ou la présence de sulfates), favorisent des métabolismes corrosifs.

La corrosion en sub-surface dans les bassins à niveau plus ou moins constant (régulation du plan d'eau ou zones à très faible marnage) peut s'apparenter au phénomène de corrosion en basses-eaux. Cependant, si les processus d'aération différentielle et les effets mécaniques de surface (proches de ceux de la corrosion en zone d'éclaboussure, via les vagues et objets flottants) sont évidents, les processus précis induits par la nature des dépôts et des micro-organismes ne sont pas encore bien expliqués.



Faciès externe de pieux corrodés



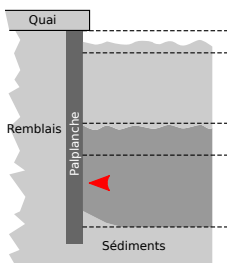
Rupture
d'un pieu corrodé



Faciès externe de palplanches corrodées

Figure I.3.18 Illustrations de la corrosion accélérée en zone de basses-eaux - crédit : ACCOAST

3.4.5 Corrosion en zone immergée



La zone immergée correspond à la partie de l'ouvrage qui ne se découvre jamais sous l'influence des marées et qui est directement exposée à l'environnement aqueux. Le matériau y est généralement exposé à un environnement relativement homogène d'un point de vue physico-chimique (salinité, pH, température, oxygène dissous), même s'il peut exister un gradient selon la profondeur d'immersion pour certains paramètres.

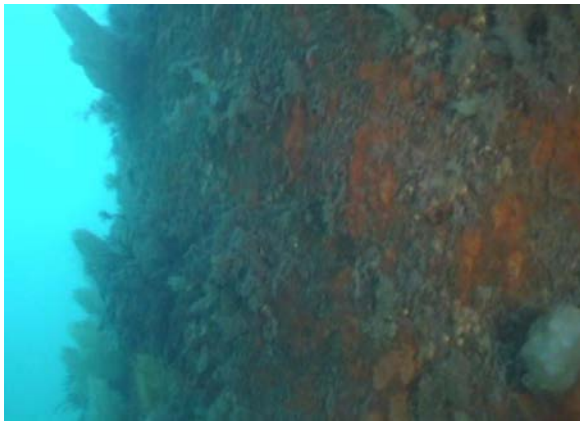
Par conséquent, la corrosion en zone immergée est surtout de type uniforme, et la vitesse de corrosion y est statistiquement faible.

Cependant, les conditions hydrodynamiques du site, la pénétration de la lumière (et donc le développement d'espèces biologiques), des rejets industriels (eaux chaudes ou acides par exemple) ou encore des défauts du matériau peuvent favoriser des processus de corrosion accélérée et/ou localisée. Celle-ci est probablement liée à des effets d'aération différentielle et d'acidification localisée induits par des différences de nature des produits de corrosion et par la présence d'organismes favorisant ces modifications.

Autres matériaux

Certains aciers inoxydables sont particulièrement résistants en zone d'immersion. De même, certains alliages de cuivre résistent mieux que d'autres à l'immersion, c'est le cas notamment du cupro-nickel, du bronze aluminium et du laiton. Ils sont néanmoins sensibles aux corrosions localisées induites par la présence de salissures (bio-films par exemple).

Les alliages d'aluminium ne sont pas recommandés pour les zones immergées du fait de leur sensibilité à la corrosion par piqûres et à la corrosion galvanique. Les meilleurs alliages d'aluminium utilisables en milieu portuaire maritime et fluvial sont les séries 5000 et 6000. Certains alliages de nickel sont résistants à condition d'être sous écoulement. En milieu stagnant, ils sont sensibles à la corrosion caverneuse et aux piqûres. Néanmoins, certains alliages nickel-chrome-molybdène sont résistants quel que soit l'environnement, ainsi que les alliages de titane.



a) Niveau -2 CM



b) Niveau -4CM

Figure I.3.19 - Illustrations des produits de la corrosion en zone immergée - crédit : CTS et ECTM



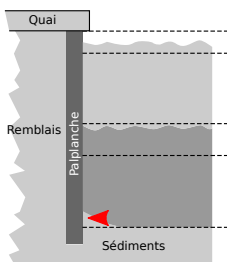
a) Corrosion généralisée affectant une palplanche plate



b) Corrosion localisée d'un pieu

Figure I.3.20 - Faciès de la corrosion en zone immergée - crédit : A-Corros

3.4.6 Corrosion en zone de jonction sédimentaire (pied d'ouvrage)



La concentration en oxygène, principal agent corrosif, décroît rapidement avec la profondeur des sédiments et ces zones jouent un rôle important dans le cycle des sulfures et sont propices au développement d'espèces biologiques réputées corrosives (flore sulfurogène). Les sédiments représentent également des réservoirs de composés chimiques potentiellement corrosifs et sont le siège de la production biogène de gaz incluant NH_3 , H_2S et CH_4 .

Cependant, très peu d'informations sont disponibles sur la corrosion des structures métalliques dans les zones sédimentaires. Le contrôle et les réparations éventuelles dans ces zones sont difficiles à mettre en œuvre, limitant la collecte d'informations sur ces sites.

La corrosion peut cependant se développer dans la zone de transition entre la partie immergée et la 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 micro-organismes à métabolisme corrosif dans la vase.



a) Rideau de palplanches

b) Pieu

Figure I.3.21 - Corrosion en zone de jonction sédimentaire se découvrant à basse-mer - crédit : ACCOAST

3.4.7 Corrosion des armatures métalliques

Les ouvrages en béton armé comportent une armature métallique essentielle au maintien de l'intégrité de ces structures. Cette armature est censée être isolée de l'environnement aqueux. Cependant, des fissures dans le béton, mais surtout sa porosité, laissent s'infiltrer les eaux. Les chlorures et le dioxyde de carbone pénètrent au travers du béton, se concentrent et abaissent localement le pH, entraînant une dépassivation des armatures métalliques.

Les volumes des produits de corrosion qui se développent alors augmentent jusqu'à éclater le béton. Ce type de dégradation, sérieuse et insidieuse, met en péril l'intégrité de l'ouvrage et son exploitation, car les zones les plus touchées sont souvent les tabliers, couronnements et les sites bord-à-quai, supportant les manœuvres d'accostage, de débarquement et de manipulation des marchandises.

Ce type de corrosion a fait l'objet d'un guide dédié à cette problématique et édité par le CETMEF.



a) Couronnement de gabion métallique

b) Poutre sous un appontement

Figure I.3.22 - Corrosion d'armatures métalliques avec éclatement du béton - crédit : ACCOAST

3.4.8 Corrosion en zone de jonction et d'assemblage

Pour consolider une structure, il est nécessaire d'apporter des matériaux et donc de réaliser des assemblages de métaux :

- en mettant une plaque métallique pour renforcer une zone ;
- en utilisant des boulons ou 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 générant une différence de potentiel suffisante, il y a création d'une pile galvanique.

Le matériau de potentiel électrochimique le plus électronégatif est mis en position anodique par rapport à l'autre. Par ailleurs, les zones de jonction présentent des discontinuités géométriques voire des zones de confinement propices aux effets de crevasse, que ce soit par aération différentielle ou par pile de concentration chimique (concentrations de certains éléments chimiques différentes du milieu extérieur). Enfin, les zones de jonction ou d'assemblage sont généralement le siège de contraintes mécaniques plus importantes que le métal de base du fait des concentrations de contraintes liées aux discontinuités géométriques ou à la réalisation de soudures. Par conséquent, les zones de jonction sont susceptibles de subir une grande partie des formes de corrosion normalisées telles que :

- la corrosion généralisée ;
- la corrosion galvanique ;
- la corrosion sous crevasse ;
- la corrosion sous contrainte (très localisée, légèrement différente de la définition des normes) ;
- la corrosion par piqûres pour les alliages passivables.



a) Serrure entre deux palplanches plates



b) Zone d'éclaboussures associée lié aux produits de corrosion dans la zone de jonction métal-béton

Figure I.3.23 - Exemple de corrosion en zone d'assemblage - crédit : ACCOAST

II. Surveillance et mesures

1. MÉTHODES ET OUTILS D'ÉVALUATION

Le tableau de la [figure II.1.1](#) ci-après précise, pour chaque zone d'exposition, les méthodes et outils d'évaluation de la corrosion qui peuvent être mis en œuvre. Ces méthodes et outils sont décrits dans les paragraphes suivants.

Méthodes et outils d'évaluation de la corrosion utilisables (O=Oui/N=Non)	Zones d'exposition d'un ouvrage maritime ou fluvial				
	Zone atmosphérique	Zone d'éclaboussures	Zone de marnage	Zone immergée	Zone sédimentaire
Inspection visuelle	O	O	O	O	O ⁽¹⁾
Mesure des épaisseurs résiduelles par ultrasons	O	O	O	O	O ⁽¹⁾
Mesure du potentiel de corrosion	N	N	O ⁽²⁾	O	N
Détection de l'activité bactérienne	N	N	O	O	O
Mesures physico-chimiques du milieu	N	N	O ⁽²⁾	O	N
Identification des sollicitations mécaniques pouvant influencer sur la corrosion	Les sollicitations mécaniques sont à rechercher dans l'environnement immédiat de l'ouvrage. Elles correspondent la plupart du temps à des contraintes exercées sur le tablier en béton armé du quai (zone de chargement et déchargement, zone d'accostage de navires, points d'amarrage).				
Détection des courants vagabonds	N	N	O ⁽²⁾	O	N
Recherche de continuités défavorables	N	N	O ⁽²⁾	O	N
Émission acoustique	O	N	N	N	N
Impédance mécanique	O	N	N	N	N

(1) Uniquement lorsque la configuration et les conditions du site le permettent car cela sous-entend de pouvoir localement dégager le bas de l'ouvrage des sédiments sur quelques dizaines de centimètres.

(2) Uniquement lorsque la zone de marnage est partiellement ou complètement immergée.

Figure II.1.1 - Méthodes et outils d'évaluation de la corrosion utilisables en fonction de la zone d'exposition

2. INSPECTION VISUELLE DE L'ÉTAT DE SURFACE

L'évaluation de la corrosion d'un ouvrage passe d'abord par une inspection visuelle dont le but est de faire une première estimation de l'état de l'ouvrage et d'identifier les mécanismes de corrosion mis en jeu par l'étude des faciès des pathologies rencontrées.

2.1 Nettoyage préalable

Le nettoyage est un préalable indispensable à l'inspection visuelle notamment dans la zone immergée où la surface d'un alliage métallique est recouverte de salissures marines et de produits de corrosion. Généralement, il n'est pas utile de réaliser un décapage complet de la surface de l'ouvrage. Le nettoyage consiste plutôt à réaliser des fenêtres de quelques centaines de centimètres carrés (typiquement entre 10 x 10 cm² et 100 x 100 cm²). Dans le cas des palplanches, il est judicieux de réaliser des fenêtres carrées dont le côté correspond à la largeur du profil entre serrures ([figure II.2.1](#)).

Cependant, si une pathologie sérieuse est détectée au sein d'une fenêtre, comme par exemple une corrosion perforante ou une multitude de cavités, le décapage complet d'une ou plusieurs zones peut se révéler nécessaire afin de réaliser un relevé exhaustif des désordres et de vérifier si la pathologie sérieuse observée est isolée ou concerne toute la structure.

Le nettoyage peut être réalisé manuellement par grattage ou au moyen d'eau sous-pression. Il doit être homogène sur l'ensemble de la surface des fenêtres. Le nettoyage par meulage est à proscrire car il endommage la surface métallique et nuit aux mesures des épaisseurs résiduelles.

Le délai entre nettoyage et inspection doit être court (de quelques heures à quelques jours) sous peine d'avoir à nettoyer à nouveau la surface d'un alliage métallique du fait de la reprise rapide de la corrosion (figure II.2.1). Pour les ouvrages étendus, il est donc recommandé de procéder par étapes en les segmentant même si cette méthodologie est plus coûteuse (temps de mobilisation du matériel de nettoyage et d'intervention plus long à cause du fractionnement des tâches).



a) Immédiatement après décapage



b) 10 jours après décapage

Figure II.1.2 - Fenêtres d'inspection (environ 15 x 15 cm²) sur un rideau de palplanches

2.2 Échantillonnage des fenêtres d'inspection

La répartition et le nombre des fenêtres d'inspection doivent tenir compte des dimensions de l'ouvrage et dépendent de la précision souhaitée pour le diagnostic.

Généralement, les fenêtres sont régulièrement réparties sur la longueur de l'ouvrage et sur la hauteur d'eau sans oublier la partie supérieure de la zone des sédiments.

L'échantillonnage peut être plus dense dans les zones suspectées d'être fortement atteintes du fait de conditions locales particulières.

Sur les rideaux de palplanches, l'échantillonnage concerne habituellement une palplanche sur trois (cela permet dans le cas de palplanches non plates d'alterner dos et ventres), et dans le cas des quais sur pieux, un pieu sur quatre. Pour les pieux concernés, le nettoyage doit être réalisé aux quatre points cardinaux afin d'avoir une vision complète de leur état sur tout le périmètre.

Les fenêtres d'inspection doivent être repérées avec précision sur l'ouvrage (position et profondeur) afin de pouvoir les retrouver facilement pour des mesures d'épaisseurs ou pour une inspection ultérieure voire, le cas échéant, pour des travaux de réparation. La qualité du repérage facilitera également le rendu des résultats.

2.3 Inspection

L'inspection consiste à relever et analyser toutes les pathologies dues à la corrosion.

L'inspection est par définition visuelle, et s'accompagne généralement de relevés photographiques et/ou vidéo. Ces relevés documentent l'inspection et présentent l'avantage de permettre une analyse ultérieure plus précise que celle qui peut être faite dans l'instant par les scaphandriers non corrosionnistes.

Par ailleurs, dans le cas des inspections sous-marines, le retour d'image instantané en surface permet une analyse immédiate des informations recueillies. L'assistant en surface, de préférence un spécialiste en corrosion, peut ainsi guider le scaphandrier dans son inspection.

Cela facilite également le repérage des pathologies.

Lors de l'inspection visuelle, il est nécessaire de décrire le plus précisément possible les pathologies observées tant du point de vue de leur aspect, de leur forme, de leurs dimensions que de leur densité et de leur répartition.

Pour être intelligible et universelle, la description des pathologies doit faire appel à une terminologie précise et nuancée. Pour cela, il convient d'utiliser les termes définis dans le glossaire du présent guide et dans la norme NF EN ISO 8044 relative à la terminologie employée pour la corrosion des alliages métalliques et alliages[1]. En tout état de cause, la terminologie est à établir avant le début de l'inspection pour éviter les incompréhensions et contre-sens entre les différents intervenants (donneurs d'ordres, scaphandriers et experts en corrosion).

L'inspection visuelle, bien que documentée par des photographies ou des vidéos, est marquée par la subjectivité de l'observateur et ne permet pas toujours de juger de la gravité des pathologies observées. Il est donc indispensable de compléter l'inspection par le recueil de données chiffrées comme les valeurs d'épaisseurs résiduelles de métal.

3. MESURES D'ÉPAISSEURS RÉSIDUELLES

3.1 Intérêt

La mesure des épaisseurs résiduelles par ultrasons est une technique non destructive qui permet, à partir des épaisseurs nominales d'origine, d'évaluer la perte d'épaisseur et donc la vitesse de corrosion moyenne de l'ouvrage depuis sa construction.

Les résultats obtenus donnent une indication sur la corrosivité de l'environnement et sur l'espérance de vie de l'ouvrage. Ils permettent également de planifier les opérations de maintenance à envisager à plus ou moins long terme en fonction de l'état d'avancement de la corrosion (réparations locales ou étendue, réfection de revêtement, renouvellement d'une protection cathodique insuffisante ou inefficace).

Conformément au diagramme de la [figure I.3.14](#), les pertes d'épaisseur les plus importantes se retrouvent là où la vitesse de corrosion généralisée est théoriquement la plus élevée.

Ainsi, elles sont généralement maximales au niveau de la zone des éclaboussures et des plus basses eaux.

Les phénomènes de corrosion localisée, notamment ceux résultant de la formation de piles d'aération différentielle, génèrent, hors de ces zones, des pertes d'épaisseur souvent beaucoup plus importantes.

3.2 Principe de la mesure

Les ultrasons sont des ondes mécaniques capables de se propager dans les milieux élastiques. Elles sont générées par un transducteur comprenant un élément piézo-électrique qui transforme un signal électrique en onde mécanique et inversement.

Les ondes utilisées sont des ondes longitudinales (les particules du milieu de propagation vibrent parallèlement à la direction de propagation des ondes) de fréquence généralement comprise entre 4 et 15 MHz.

Les ondes émises par le transducteur (ou palpeur) se déplacent dans une direction perpendiculaire à la surface du matériau ausculté et sont réfléchies lorsqu'elles rencontrent une interface entre deux milieux de nature différente. Pour plus d'information, il convient de consulter la norme NF EN 14127[2].

La [figure II.3.1](#) montre le principe de la mesure d'épaisseur d'une pièce par ultrasons. L'échogramme (ou A-scan) montre un pic de réflexion à gauche et un pic de sortie à droite. La distance entre les deux pics correspond à l'épaisseur de l'acier.

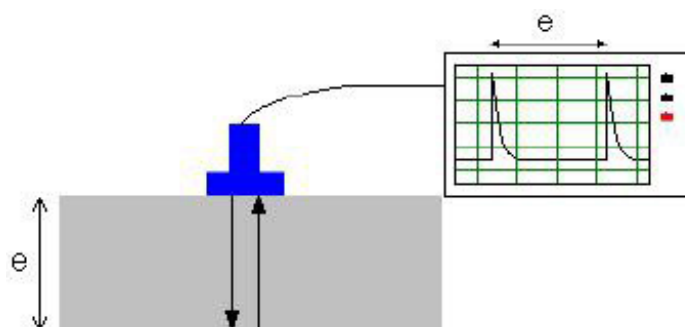


Figure II.3.1 - Schéma de principe de mesure d'épaisseur par ultrasons

La vitesse de propagation des ondes dépend de la nature du milieu de propagation. Pour les aciers doux habituellement utilisés pour la construction des ouvrages maritimes et fluviaux, la vitesse de propagation des ondes ultrasonores est d'environ 5900 m/s. Cette vitesse étant connue, l'appareil de mesure calcule la distance parcourue par l'onde, soit l'épaisseur d'un alliage métallique, en mesurant le temps mis par l'onde pour faire l'aller-retour.

Un milieu de couplage, communément appelé couplant, permet d'assurer une bonne transmission des ondes du transducteur au matériau. Dans le cas de mesures aériennes, le couplant peut-être de la graisse. Les mesures en immersion ne nécessitent pas de couplant car c'est l'eau qui joue ce rôle.

3.3 Protocole de mesure sur site

3.3.1 Recherches préalables

Avant le début d'une campagne de mesures, il est judicieux d'effectuer une recherche documentaire afin de retrouver les épaisseurs nominales des palplanches ou des pieux qui constituent l'ouvrage. Cela est utile pour le choix du matériel le plus adapté à la gamme d'épaisseur à mesurer et permet une fois les mesures commencées de vérifier la pertinence des valeurs obtenues.

Attention, il faut être vigilant : selon les profils, l'épaisseur n'est pas constante sur toute la largeur d'une palplanche. Il existe généralement une différence de quelques dixièmes de millimètres entre ailes et âmes.

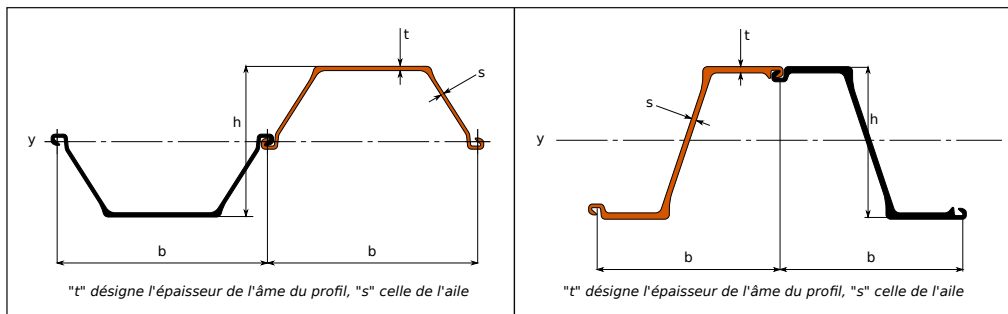


Figure II.3.2 - Palplanches avec profil en U (gauche) et en Z (droite) - crédit : Arcelor Mittal

3.3.2 Échantillonnage

L'échantillonnage des mesures d'épaisseurs est généralement défini en amont de toute intervention sur site. Il peut donc ne pas être pertinent. Les mesures d'épaisseurs venant généralement en complément d'une inspection visuelle, il faut mettre à profit cette dernière pour ajuster l'échantillonnage des mesures en fonction des observations faites.

Il est en effet inutile de réaliser des mesures d'épaisseurs dans une zone où l'inspection visuelle n'a détecté aucune pathologie grave de corrosion. D'autant plus que cela conduirait, pour un volume prédéfini de mesures, à réduire le nombre de mesures dans les zones plus atteintes où il serait au contraire plus judicieux de les concentrer.

Avantageusement, les mesures d'épaisseurs sont réalisées au niveau des fenêtres où le métal a été nettoyé dans le cadre de l'inspection visuelle. Il peut être nécessaire de brosser la surface afin d'éliminer la couche de produits de corrosion qui s'y est développée depuis le nettoyage afin d'avoir un métal propre et prêt à accueillir le palpeur.

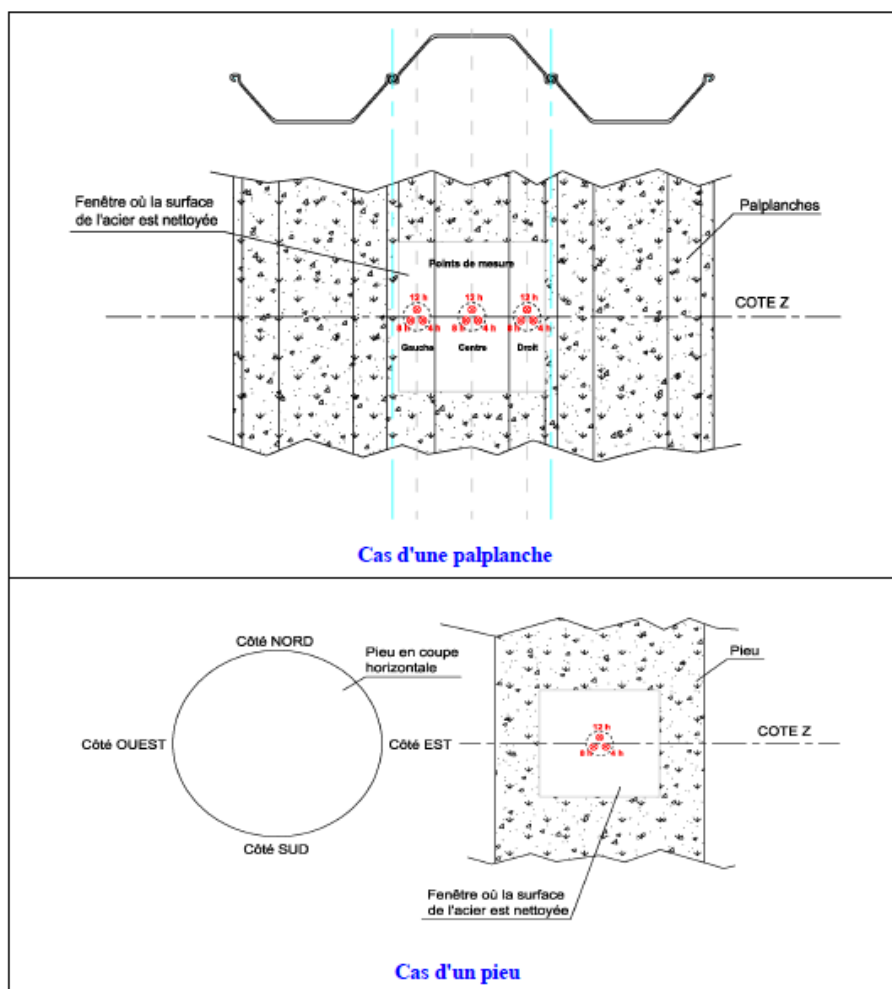


Figure II.3.3 - Repérage des mesures d'épaisseur résiduelle d'une fenêtre d'inspection - crédit : A-CORROS

Cas des palplanches

Sur chaque palplanche inspectée à une cote déterminée, trois points de mesure sont définis sur la largeur : point à gauche, point au centre et point à droite (figure II.3.3).

Sur chacun de ces points de mesure, trois mesures d'épaisseur sont réalisées. Celles-ci sont repérées de façon horaire à 12h, 4h et 8h.

La moyenne arithmétique des trois mesures donne l'épaisseur résiduelle moyenne au point de mesure correspondant.

Cas des pieux

Sur chaque pieu inspecté à une cote déterminée, quatre points de mesure sont définis aux quatre points cardinaux le long du périmètre (figure II.3.3).

Sur chacun de ces points de mesure, trois mesures d'épaisseur sont réalisées. Celles-ci sont repérées de façon horaire à 12h, 4h et 8h.

La moyenne arithmétique des trois mesures donne l'épaisseur résiduelle moyenne au point de mesure correspondant.

3.3.3 Étalonnage et calibration du matériel

Préalablement à la campagne de mesures, l'appareil à ultrasons doit être étalonné par un laboratoire spécialisé.

Au cours de la campagne de mesures, la calibration doit être réalisée au moyen d'une cale étalon dont l'épaisseur est connue et correspond à la gamme des épaisseurs à mesurer. La vérification de la calibration de l'appareil consiste à faire calculer à la chaîne de mesure le temps que met l'onde ultra-sonore pour traverser la ligne de retard et autre composant positionné entre l'élément piézoélectrique et la surface du métal.

Elle permet de s'assurer que la vitesse de propagation des ondes ultra-sonores considérée est correcte et permet à l'appareil de mesurer la bonne épaisseur de la cale. Cette vérification de la calibration se fait de préférence avec une cale dont la nuance est identique à celle de l'acier constituant l'ouvrage à inspecter.

Cependant, la vitesse de propagation dans les différentes nuances d'acier doux variant peu, l'utilisation d'une cale fabriquée dans une nuance différente est acceptable.

Une calibration à plusieurs points, réalisée avec différentes épaisseurs de cale, permet de s'assurer que l'appareil donnera des indications pertinentes si les épaisseurs varient de façon importante sur un même ouvrage (fortes disparités de corrosion d'un alliage métallique).

Au cours des mesures, l'appareil doit également être calibré régulièrement, environ toutes les cinq fenêtres ou toutes les quinze mesures. Cette calibration permet de s'affranchir de toute dérive de l'appareil au cours de son utilisation.

3.3.4 Mesures

Les mesures sont réalisées selon la technique d'échantillonnage présentée précédemment dans cette section.

La plus grande attention doit être portée au contact du palpeur sur la surface d'un alliage métallique.

Si la surface d'un alliage métallique est très irrégulière ou si des pathologies de corrosion localisée sont présentes et empêchent d'appliquer convenablement le palpeur sur la surface, l'utilisation d'un palpeur de plus petit diamètre peut être une solution.

Dans le cas où une mesure par ultrasons n'est pas possible, au creux d'un chancre par exemple, il convient d'utiliser un moyen de mesure classique (pige graduée d'un pied à coulisse) afin d'en estimer la profondeur.

3.3.5 Qualification de l'opérateur

L'opérateur réalisant les mesures doit être compétent. Il est donc recommandé qu'il possède une certification COFREND (confédération française pour les essais non destructifs) suivant la norme NF EN 473[3] attestant qu'il a été formé et qu'il est apte à réaliser et à interpréter des contrôles non destructifs par ultrasons.

3.3.6 Présentation des résultats et traitement des données

Les résultats doivent être présentés de manière à être facilement interprétables et exploitables. La présentation sous forme de tableaux est la plus commune. L'utilisation d'un tableur permet alors de tirer des statistiques des mesures réalisées et d'établir des règles de mise en forme des résultats afin de faire ressortir, par un code couleur par exemple, les zones de l'ouvrage les plus fortement atteintes.

De plus, une représentation des résultats, suivant le même code couleur, sur des vues en coupe de l'ouvrage facilitera la visualisation spatiale des épaisseurs résiduelles.

Outre les valeurs d'épaisseur mesurées, les rapports d'intervention doivent, si possible, contenir les échogrammes correspondants (ou A-scans). Les échogrammes permettront éventuellement de lever un doute sur une valeur suspecte ou aberrante.

Les rapports d'intervention doivent également comprendre un plan de repérage clair et précis des fenêtres inspectées. Ce plan doit faire apparaître la localisation des fenêtres sur l'ouvrage, leur désignation et leur position verticale par rapport à une cote définie (cote marine ou autre).

Les rapports d'intervention doivent par ailleurs préciser (liste non exhaustive) :

- la date de réalisation des mesures ;
- le nom de l'opérateur ;
- le matériel utilisé : marque et modèle de l'appareil et du palpeur ainsi que les caractéristiques techniques de ce dernier (fréquence, diamètre) ;
- la nature du couplant pour les mesures aériennes ;

- la nuance et l'épaisseur de la cale étalon utilisée et la vitesse de propagation des ondes dans celle-ci en fonction des différents couplants effectivement utilisés ;
- le certificat d'étalonnage de l'appareil à jour lors de l'intervention ;
- l'attestation de qualification de l'opérateur valide lors du contrôle.

Outre l'inspection visuelle, qui recense et décrit les pathologies présentes sur un ouvrage, et les mesures d'épaisseurs résiduelles de métal, qui donnent une estimation des vitesses de corrosion moyennes, il existe d'autres techniques et outils de diagnostic. Ils sont intéressants par le fait, d'une part, qu'ils complètent la connaissance du couple ouvrage/ environnement et, d'autre part, qu'ils permettent de déterminer les origines possibles des corrosions observées.

4. MESURES DE POTENTIEL ÉLECTROCHIMIQUE

4.1 Définition

Un métal placé dans un milieu électrolytique se polarise spontanément par rapport à celui-ci et prend un potentiel donné. La mesure de la différence de potentiel entre le métal et une électrode de référence, de potentiel connu, donne la valeur du potentiel d'abandon ou potentiel de corrosion libre d'un alliage métallique.

Pour un métal donné, le potentiel de corrosion libre dépend de différents paramètres comme son état de surface ou les caractéristiques physico-chimiques du milieu électrolytique. Les variations du potentiel de corrosion libre observées sur un ouvrage résultent donc toujours de l'existence d'hétérogénéités, que celles-ci soient dues au métal, à l'état d'oxydation de sa surface, ou à l'environnement.

Lorsqu'un courant électrique continu passe du milieu électrolytique au métal ou d'un alliage métallique au milieu électrolytique, le métal n'est plus à l'abandon. Il se polarise pour prendre respectivement un potentiel plus négatif (polarisation cathodique) ou plus positif (polarisation anodique) que son potentiel de corrosion libre. Dans ce cas, on parle simplement de potentiel de corrosion.

Le courant électrique circulant dans un milieu électrolytique est de nature ionique, c'est-à-dire qu'il correspond au déplacement d'ions, alors qu'il est de nature électronique (déplacement d'électrons) lorsqu'il circule au sein d'un métal.

4.2 Intérêt

4.2.1 Généralités

La valeur instantanée du potentiel de corrosion en un point donné d'un ouvrage est difficilement exploitable et interprétable.

En revanche, le suivi du potentiel de corrosion au cours du temps, en un point donné d'un ouvrage, permet de caractériser l'évolution électrochimique de la surface d'un alliage métallique qui est liée aux réactions électrochimiques impliquées dans les processus de corrosion.

Un suivi temporel permet principalement de déceler la présence d'influences électriques (modifications temporelles du potentiel résultant de la circulation d'un courant électrique dans le milieu électrolytique à proximité de l'ouvrage). La durée d'un tel suivi dépend de la périodicité de l'activité suspectée d'être influençante. Elle peut être de 24 ou 48 heures à plusieurs jours ou semaines.

De plus, la mesure du potentiel en plusieurs points d'un ouvrage, horizontalement le long de l'ouvrage ou verticalement le long de la colonne d'eau, permet d'obtenir une cartographie qui renseigne sur l'activité de corrosion par l'identification des zones anodiques et cathodiques sur l'ouvrage.

Ce type de mesure permet également de déceler la présence de couplages galvaniques résultant de la continuité électrique et électrolytique entre deux métaux différents. Les couplages galvaniques se retrouvent essentiellement au niveau des assemblages et sont problématiques car ils conduisent à la corrosion accélérée d'un alliage métallique le moins noble, c'est-à-dire celui dont le potentiel de corrosion est le plus électronégatif.

La mesure du potentiel de corrosion peut donc servir également à contrôler la continuité électrique entre deux parties ou éléments d'un même ouvrage, ou à détecter l'existence d'une continuité fortuite entre l'ouvrage et une autre masse métallique placée soit dans le même électrolyte, soit dans un autre électrolyte (sol, remblai) en continuité avec le premier.

4.2.2 Cas des ouvrages protégés cathodiquement

La mesure du potentiel d'un ouvrage sous protection cathodique, qu'il s'agisse de protection par anodes galvaniques ou par courant imposé, permet d'évaluer son niveau de polarisation et donc de statuer sur l'efficacité de la protection. La norme NF EN 12473[4] stipule que le potentiel mesuré sur un ouvrage en acier protégé cathodiquement doit être inférieur ou égal à -850 mV, potentiel mesuré par rapport à une électrode du type argent/chlorure d'argent /eau de mer.

Dans le cas des ouvrages non protégés mais destinés à l'être, le relevé du potentiel de corrosion sur l'ensemble de l'ouvrage est un prérequis indispensable. En effet il permet de détecter les zones anodiques, ce qui peut aider au dimensionnement et à la conception du système de protection, notamment en optimisant la répartition des anodes. Et surtout il constitue un point zéro de l'ouvrage auquel il sera possible de se référer au moment de la mise en service de la protection, notamment pour le suivi de l'évolution de la polarisation.

4.3 Principe de la mesure

Le potentiel d'un métal se mesure au moyen d'un voltmètre et d'une électrode de mesure (type électrode Ag/AgCl/eau de mer) en raccordant :

- le métal à la borne positive du voltmètre ;
- l'électrode de référence au pôle négatif.

Pour un métal donné dans un électrolyte donné, le potentiel mesuré dépend de l'électrode utilisée. Il est donc indispensable de préciser, pour chaque mesure, la nature de l'électrode employée.

4.3.1 Métrologie

Afin de garantir l'exactitude des mesures réalisées, il est indispensable que les éléments de la chaîne de mesure, électrodes et voltmètres, subissent un contrôle métrologique régulier. Le contrôle doit conduire à l'établissement d'un certificat qui devra être fourni au donneur d'ordre avant le début de la campagne de mesures.

Le contrôle des électrodes doit s'appuyer sur la recommandation PCRA 005[5] du CEFACOR (Centre français de l'anticorrosion).

4.3.2 Matériel à utiliser

Les exigences que doivent respecter les voltmètres utilisés concernent essentiellement l'impédance d'entrée qui doit être suffisamment importante (1 M Ω au minimum, habituellement 10 M Ω). La gamme de mesure et la précision doivent être compatibles avec les valeurs attendues (voir la recommandation PCRA 008[6] du CEFACOR).

Le choix de l'électrode dépend de la nature de l'électrolyte et du caractère permanent ou ponctuel de la mesure.

Pour les ouvrages enterrés ou immergés dans l'eau douce, il est recommandé d'utiliser une électrode du type cuivre/sulfate de cuivre saturé (Cu/CuSO₄(sat.)).

Pour les ouvrages à la mer, il est habituel d'utiliser l'électrode argent/chlorure d'argent/eau de mer (Ag/AgCl/Edm). Une électrode argent/chlorure d'argent/chlorure de potassium saturé (Ag/AgCl/KCl(sat.)) ou une électrode en zinc (Zn) peuvent également être employées.

Contrairement aux électrodes Cu/CuSO₄(sat.) et Ag/AgCl/KCl(sat.) qui sont de vraies électrodes de référence, les autres électrodes citées sont des électrodes de mesure au sens de la norme NF EN 13509[7].

Pour les ouvrages immergés pour lesquels des scaphandriers sont mobilisés, il peut être avantageux d'utiliser des systèmes de mesure intégrés (pistolet de type Batycorrometer Roxby) rassemblant en un seul appareil une électrode, un voltmètre et une pointe de prise de masse.

Ce type d'appareil est notamment utile lorsque la prise de masse en surface est impossible ou lorsque la continuité entre le point de mesure et le point de prise de masse prévue n'est pas assurée (chaînes par exemple).

Dans certains cas, la mise en œuvre de systèmes robotisés téléguidés de type ROV (Remotely Operated Vehicle) est envisageable. Ces systèmes constituent une alternative intéressante lorsque l'intervention de scaphandriers est délicate ou périlleuse.

4.4 Protocole de mesure sur site

4.4.1 Préparation et vérification du matériel

Avant chaque série de mesures, l'intégrité des câbles utilisés doit être vérifiée afin de détecter tout défaut d'isolation qui pourrait fausser les valeurs mesurées. Cette vérification doit être effectuée sur l'ensemble des câbles, câbles de connexion à l'ouvrage et câble d'électrode.

Le moyen de vérification le plus simple et le plus rapide consiste à :

- immerger les câbles dans un récipient rempli d'eau en prenant garde de ne pas immerger les extrémités libres ;
- mesurer leur potentiel au moyen d'un voltmètre et d'une électrode de référence :
 - si les câbles sont bien isolés, il est impossible de mesurer un potentiel puisque le cuivre qui les constitue est isolé électriquement de l'eau par la gaine ;
 - si un potentiel est mesuré, le câble est défectueux et il ne doit pas être utilisé.

Si une électrode argent/chlorure d'argent/eau de mer (Ag/AgCl/Edm) doit être utilisée, il convient de l'immerger dans l'eau de mer et de l'y laisser tremper pendant au moins une heure avant de commencer les mesures. Ce temps est nécessaire pour que le potentiel de l'électrode se stabilise.

Stockage du matériel

Toutes les types d'électrodes connaissent des variations de leur potentiel en fonction de la température. Il faut donc prendre garde aux conditions de stockage afin d'éviter toute dérive. Il est notamment recommandé d'éviter toute exposition prolongée au soleil ou au froid.

Pour vérifier de la valeur du potentiel de l'électrode de référence, il est recommandé de suivre les instructions de la *norme NF EN 12473:2014-03*.

4.4.2 Connexion à l'ouvrage

La connexion à l'ouvrage (ou prise de masse) est une phase cruciale car elle conditionne en partie la pertinence des valeurs mesurées.

Il est impératif de réaliser un nettoyage minutieux de la surface du métal afin d'obtenir un bon contact électrique. Les salissures marines, les produits de corrosion, la calamine et, le cas échéant, le revêtement doivent être éliminés afin d'atteindre le métal sous-jacent.

Si la réalisation d'une prise de masse directe sur l'ouvrage est impossible ou délicate, il est possible de réaliser une prise de masse indirecte en se connectant à un élément métallique dont la continuité avec l'ouvrage est certaine : échelle, garde-corps, mise à la terre.

La connexion doit être réalisée par un moyen permettant de se prémunir contre toute déconnexion fortuite. Pincés crocodiles, pincés étaux, aimants, perçage et boulonnage, soudure sont autant de moyens qui sont susceptibles d'être mis en œuvre. Le choix de l'un ou l'autre dépend de la nature de l'ouvrage, de sa géométrie, de son accessibilité et de la pérennité souhaitée pour la connexion.

Il peut d'ailleurs s'avérer intéressant de réaliser des connexions permanentes (ou prises de potentiel) qui serviront lors de campagnes de mesures successives.

Il est préférable que la connexion soit réalisée dans la zone atmosphérique afin que la mesure du potentiel ne soit influencée ni par le nettoyage de la surface, ni par le moyen de connexion utilisé (risque de création de couplage galvanique).

Dans le cas où les mesures sont réalisées par un scaphandrier au moyen d'un pistolet, la prise de masse est assurée au droit du point de mesure par l'intermédiaire d'une pointe. Le scaphandrier doit veiller à ce que la pointe soit en contact direct avec le métal en exerçant une pression suffisante.

Dans la mesure du possible, il convient alors d'éviter de nettoyer la surface d'un alliage métallique car sa mise à nu modifierait la valeur du potentiel.

Si le revêtement a été éliminé pour réaliser la connexion, il convient de reboucher la zone concernée avec un matériau adapté à l'environnement (résine époxyde par exemple).

Le câble assurant la liaison entre le point de connexion et le voltmètre doit avoir une section lui garantissant une résistance mécanique suffisante (2,5 mm² au minimum) et ne présenter aucun défaut d'isolation.

Si la continuité de l'ouvrage est certaine, la mesure du potentiel peut se faire avec une prise de masse très éloignée (plusieurs centaines de mètres) du point de mesure (qui correspond à la position de l'électrode de mesure). La limite de distance est alors imposée par la longueur de câble disponible et par la possibilité de le tirer jusqu'au point de mesure éloigné sans mettre en danger son intégrité.

Le choix entre une prise de masse unique ou des prises de masse multiples dépend de la continuité de l'ouvrage dans le cas d'une prise de masse directe et de la continuité des éléments successifs dans le cas d'une prise de masse indirecte mais aussi de la configuration du site et des moyens d'accès. Ainsi, dans le cas de mesures de potentiel à réaliser sur une forêt de pieux depuis une embarcation, il est plus judicieux de réaliser une prise de masse directe sur chacun des pieux car cela évitera d'une part, d'emmêler le câble au risque de le rompre, et d'autre part, d'avoir à vérifier la continuité entre les différents pieux et le pont de prise de masse indirecte.

4.4.3 Réalisation des mesures

Les ouvrages maritimes et fluviaux étant généralement non ou partiellement revêtus, le potentiel mesuré par une électrode immergée correspond au potentiel moyen de l'ensemble de la surface d'acier que voit l'électrode. Dans ces conditions, il est impossible de mesurer des variations locales du potentiel et donc il peut être difficile de distinguer les zones anodiques des zones cathodiques.

Afin de limiter ce phénomène et d'obtenir une valeur locale du potentiel, il faut rapprocher au maximum l'électrode de la surface du métal. L'idéal est que le corps de l'électrode la touche.

Faire réaliser les mesures en immersion par un scaphandrier muni d'un pistolet est par conséquent une alternative intéressante à la réalisation des mesures depuis la surface, dite à la pêche à la ligne.

Cependant, dans la majorité des cas, les mesures depuis la surface sont suffisantes pour réaliser un profil de potentiel avec un pas de l'ordre du mètre.

Dans le cas des ouvrages protégés cathodiquement, les mesures sont plus délicates à effectuer et il est recommandé qu'elles soient réalisées par un personnel certifié au sens de la norme NF EN 15257[8].

Si la protection est assurée par un système à courant imposé, les mesures de potentiel sont réalisées à courant coupé (potentiel OFF), c'est-à-dire immédiatement après la coupure du générateur de courant, afin que le potentiel mesuré ne soit pas faussé par la chute de tension résultant de la circulation du courant de protection dans l'eau ou le sol (selon la position du déversoir).

Par mesure de précaution, il n'est pas recommandé de faire exécuter des mesures de potentiel par des scaphandriers sur les ouvrages protégés par courant imposé, surtout si le gradient de potentiel généré est supérieur à 1 V/m[10]. Les mesures sont donc réalisées depuis la surface en prenant garde à ce que l'électrode soit le plus près possible de la surface de l'ouvrage.

Si la protection est assurée par des anodes galvaniques, il n'est pas possible de mesurer un potentiel à courant coupé car cela impliquerait de déconnecter simultanément toutes les anodes placées sur l'ouvrage. Par conséquent, on limite la prise en compte de la chute de tension en plaçant l'électrode au plus près d'un alliage métallique. Ce qui peut être fait par un scaphandrier car il n'y a pas, dans le cas d'une protection par anodes galvaniques, de restriction à intervenir en immersion.

Par ailleurs, afin d'obtenir une valeur la plus proche possible du potentiel réel de polarisation de l'ouvrage, il faut éviter que les gradients de potentiel générés par les anodes ne faussent la mesure. Pour cela, il convient de placer l'électrode suffisamment loin des anodes et au contact d'un alliage métallique. Si les mesures sont réalisées depuis la surface et que la position exacte des anodes n'est pas connue, la réalisation d'un relevé exhaustif du potentiel permettra de les localiser approximativement puisque leur position correspondra aux valeurs de potentiel les plus électronégatives.

4.4.4 Présentation des résultats et traitement des données

Les résultats des mesures de potentiel sont généralement présentés sous forme de tableaux ou de graphiques dans lesquels le potentiel est donné en fonction de la position et de la cote du point de mesure sur l'ouvrage.

Il peut être intéressant également de visualiser par un code couleur les variations du potentiel sur des vues en coupe de l'ouvrage.

Les rapports d'intervention doivent par ailleurs préciser (liste non exhaustive) :

- la date de réalisation des mesures ;
- le nom de l'opérateur ;

- le matériel utilisé : type et caractéristiques techniques du voltmètre (notamment son impédance d'entrée) et nature de l'électrode ;
- le ou les points de connexion sur l'ouvrage ;
- la manière dont la prise de masse a été réalisée sur l'ouvrage.

4.4.5 Conclusion

La réalisation, l'analyse et l'interprétation de ces données sont réalisées par des personnes compétentes, qui ont reçu une formation adéquate leur permettant une approche pertinentes des problématiques visées. Il est recommandé de se rapprocher de personnes présentant les certifications requises dans la *norme NF EN ISO 15257 : 2017*.

5. DÉTECTION DES MICRO-ORGANISMES INFLUENÇANT LA CORROSION

La corrosion induite par les microorganismes et notamment par les bactéries peut être détectée au moment de l'inspection visuelle par l'examen des faciès de corrosion. En effet, la corrosion influencée par les microorganismes génère des faciès très particuliers qu'un œil averti peut identifier (surface mâchée, rongée, brillante).

Nota bene : Il est important de préciser que l'action des bactéries et des autres microorganismes ne conduit pas à une nouvelle forme de corrosion. Elle provoque plutôt une modification de la cinétique des réactions de corrosion ou favorise un type de corrosion qui, en l'absence de microorganismes, ne se serait pas manifesté.

Outre les faciès de corrosion, d'autres signes peuvent indiquer une implication des bactéries dans les pathologies de corrosion, comme par exemple le décollement par plaques des produits de corrosion avec écoulement d'un liquide noir entre ces plaques et l'acier rendu brillant. On peut également observer la présence localisée de tubercules et de dépôts mous de couleur orangée. Une odeur forte d'œuf pourri, caractéristique du sulfure d'hydrogène (H_2S), se dégageant des produits de corrosion une fois prélevés, est un autre révélateur caractéristique de l'implication possible des microorganismes dans les mécanismes de corrosion.

Une sensibilisation des scaphandriers est nécessaire, notamment lors de la phase de nettoyage, afin qu'ils soient attentifs à ces signes révélateurs d'une corrosion possible par les bactéries.

La confirmation d'une suspicion de corrosion influencée par les micro-organismes passe inévitablement par le prélèvement et l'analyse des produits de corrosion présents au droit des faciès suspects. L'objectif est de détecter des produits de corrosion soufrés (sulfures de fer) résultant de l'action de la flore sulfurogène (bactéries sulfato-réductrices (BSR) et thiosulfato-réductrices (BTR)).

La spectroscopie RAMAN est la technique analytique la plus couramment utilisée pour détecter la présence de sulfures de fer dans les produits de corrosion.

Une attention particulière doit être apportée lors du prélèvement, du conditionnement et de l'analyse des produits de corrosion afin qu'ils ne soient pas dénaturés.

Nous rappelons que les bactéries sont partout présentes et que leur simple comptage ne permet pas de prouver leur implication dans la corrosion.

La méthodologie à suivre pour le prélèvement et le conditionnement d'un dépôt de corrosion destiné à une analyse physico-chimique est la suivante :

- prélever le dépôt de corrosion dans toute son épaisseur ;
- le mettre dans un flacon ou un sachet propre et hermétique ;
- le congeler immédiatement sur site.

Quand il n'est pas possible de le congeler sur site :

- Si le dépôt est solide : le prélever, le mettre dans un flacon ou un sachet propre et hermétique que l'on remplit avec de l'eau du site afin de limiter le contact avec l'oxygène, le transporter à 4°C jusqu'au laboratoire où il sera congelé après que l'eau aura été éliminée.
- Si le dépôt est mou et risque de se dissoudre dans l'eau : le prélever, le mettre dans un flacon ou un sachet propre et hermétique sans eau, le transporter à 4°C jusqu'au laboratoire où il sera congelé en attendant l'analyse.

Avant l'analyse, les produits de corrosion qui ont été en contact direct avec l'air ou avec un liquide sont éliminés car ils ont pu se modifier.

6. MESURES PHYSICO-CHIMIQUES DU MILIEU

Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau environnant un ouvrage sont directement impliquées dans les mécanismes de corrosion puisqu'ils en déterminent la corrosivité.

Cependant, réaliser des relevés exhaustifs des différents paramètres physico-chimiques sur l'ensemble de l'ouvrage ne présente pas un intérêt fondamental dans la plupart des cas.

Par contre, focaliser la prise de mesure de certains paramètres dans des zones particulières où des différences de comportement du point de vue de la corrosion sont observées ou suspectées est plus pertinent. Ce peut être le cas :

- de zones de ressacs,
- de zones stagnantes,
- de zones parcourues par de forts courants,
- de zones estuariennes (hétérogénéités dans la masse d'eau),
- du point de rejet d'un émissaire (eau de pluie, eau souillée, eau traitée).

Il est préférable que la mesure de ces paramètres soit réalisée in situ mais des mesures en laboratoire sur des prélèvements correctement collectés et conditionnés sont tout à fait satisfaisantes.

Dans le cas où il est envisagé de mettre sous protection cathodique un ouvrage, il est indispensable que l'étude de dimensionnement s'appuie sur des données concernant certains des paramètres physico-chimiques du milieu. Ceci est d'autant plus important s'il existe de fortes hétérogénéités de ces paramètres sur l'ensemble de l'ouvrage.

Parmi ces paramètres, le plus important est la résistivité (ou la conductivité) car ce paramètre influe directement sur le dimensionnement des anodes.

Les vitesses d'écoulement et la teneur en dioxygène dissous peuvent également aider au dimensionnement de la protection en orientant le choix des densités de courant de protection à considérer.

6.1 Température

La température est un paramètre qui influe sur la corrosion. Il est ainsi admis que les structures se trouvant dans les eaux chaudes, sont plus rapidement corrodées que celles se situant dans des eaux froides, à paramètres équivalents.

6.2 pH

Le pH influe sur la corrosivité de l'environnement.

Cependant, l'eau de mer étant un milieu tamponné (pH de l'ordre de 8,2), son pH n'a pas de réel impact sur la corrosion. En revanche, localement sous les produits de corrosion, il est possible que le pH soit très bas du fait de la production d'acide par l'activité de certaines bactéries ou de certains mécanismes de corrosion (corrosion cavernueuse).

Les eaux douces sont plus acides que l'eau de mer mais globalement moins corrosives car moins conductrices.

6.3 Teneur en dioxygène dissous

Le dioxygène dissous étant le principal moteur de la corrosion, sa teneur dans le milieu et surtout sa disponibilité à la surface du métal jouent un rôle crucial dans la corrosion.

Il est habituel de constater des corrosions plus importantes dans les zones fortement oxygénées (présence de courants, brisants ou remous). C'est donc dans ces zones qu'il peut être utile d'en mesurer la concentration.

Phénomènes de brassage mis à part, la teneur en oxygène dissous dépend de la température et de la salinité. Pour une température de 15°C et une salinité de 35‰, elle est d'environ 8 mg.L⁻¹, soit 8 ppm.

6.4 Salinité

La salinité correspond à la masse de sels dissous que l'on trouve dans un kilogramme d'eau.

Pour une eau de mer standard, la salinité est d'environ 35 ‰, soit 35 g de sels pour un kilogramme d'eau.

La salinité a une grande influence sur la corrosion et la protection cathodique notamment dans les zones d'estuaire ou de rejet d'eau douce (eaux saumâtres) puisqu'elle détermine la valeur de la conductivité.

6.5 Conductivité

La corrosion est intimement liée à la conductivité de l'électrolyte : ce paramètre joue un rôle direct dans les transferts de charges et le transport ionique qui sont impliqués dans les réactions électrochimiques à l'origine de la corrosion.

Pour une température de 15°C et une salinité de 35 ‰, la conductivité est de l'ordre de 40 mS.cm⁻¹.

La conductivité est directement liée à la salinité puisqu'elle dépend de la concentration et de la mobilité des ions contenus dans l'eau.

La mesure de la conductivité est indispensable dans le cas où une mise sous protection cathodique est envisagée notamment pour les eaux douces et estuariennes.

6.6 Turbidité

La turbidité mesure la teneur des particules en suspension dans l'eau.

La turbidité joue un rôle dans la corrosion puisqu'elle contribue à la formation de dépôts à la surface d'un alliage métallique. Ces dépôts peuvent être protecteurs en constituant une barrière à la diffusion de l'oxygène dissous mais ils peuvent également générer des phénomènes de corrosion sous dépôt du fait même de l'appauvrissement en oxygène qu'il génère (création de piles d'aération différentielle).

Les particules en suspension, selon leurs propriétés et la vitesse d'écoulement de l'eau, peuvent également être à l'origine de corrosion-abrasion.

6.7 Vitesse d'écoulement de l'eau

La vitesse d'écoulement de l'eau a une influence sur son oxygénation et favorise les phénomènes de corrosion-érosion et de corrosion-abrasion.

Elle se mesure au moyen d'un courantomètre.

7. DÉTECTION DES COURANTS VAGABONDS

Dans sa démarche de détection et de lutte contre les courants vagabonds des systèmes à courant continu, le lecteur s'appuiera sur les informations présentées dans ce paragraphe, et par ailleurs sur les normes suivantes :

- NF EN 50162 - *Protection contre la corrosion due aux courants vagabonds des systèmes à courants continus*[9].
- NF EN 50122-2 - *Applications ferroviaires – Installations fixes. Partie 2 : Mesures de protection contre les effets des courants vagabonds issus de la traction électrique à courant continu*[10].

7.1 Définitions et présentation de la problématique

On désigne par courants vagabonds des courants continus échappés de leur source qui circulent dans le sol ou l'eau pour y revenir, généralement en un point distant, en empruntant des chemins de moindre résistance.

Par conséquent, les courants vagabonds peuvent trouver avantageux d'emprunter des ouvrages et structures métalliques, enterrés ou immergés, offrant une faible résistance à leur circulation.

Les points d'entrée de ces courants sur l'ouvrage sont rendus cathodiques (abaissement du potentiel) alors que les points de sortie sont rendus anodiques (augmentation du potentiel). Les points de sortie subissent une corrosion accélérée dont la vitesse dépend de leur surface et de l'intensité des courants vagabonds. Une faible surface de sortie et un courant important résultent en une densité de courant de corrosion, et donc une vitesse de corrosion, élevées.

7.2 Sources

Les sources de courants vagabonds sont diverses et variées mais les plus communes sont :

- les systèmes de traction à courant continu ;
- les systèmes de protection cathodique par courant imposé d'un ouvrage tiers ;
- les réseaux d'alimentation en courant continu.

Nous tenons à préciser ici que les systèmes de protection cathodique par anodes galvaniques généralement rencontrés ne peuvent en aucune manière être la source de courants vagabonds susceptibles de générer des problèmes de corrosion.

Les courants unitaires correspondants sont en effet trop faibles, même dans le cas d'anodes imposantes.

Par ailleurs, contrairement aux anodes à courant imposé qui peuvent être éloignées des ouvrages, les anodes galvaniques y sont directement fixées. Par conséquent, les lignes de courants y sont confinées et risquent peu d'influencer un autre ouvrage.

7.3 Détection

La détection des courants vagabonds repose sur la mesure directe ou indirecte des gradients de potentiel que génère leur circulation dans l'électrolyte dont la résistance est non nulle. Ces gradients sont d'autant plus importants que la conductivité (ou la résistivité) de l'électrolyte est faible (élevée).

Détection directe par mesure du gradient de potentiel entre deux électrodes appariées déplacées entre l'ouvrage et un point éloigné.

En l'absence de courants vagabonds et de protection cathodique sur l'ouvrage concerné, l'écart de potentiel entre les deux électrodes reste inchangé quelle que soit leur position par rapport à l'ouvrage.

Détection indirecte par mesure du potentiel de l'ouvrage au moyen d'une électrode déplacée de la surface de l'ouvrage à une distance éloignée.

La mise en œuvre de cette technique est similaire à une mesure ordinaire du potentiel de corrosion si ce n'est que l'on déplace l'électrode dans plusieurs directions à partir d'un point choisi à la surface de l'ouvrage. Selon l'étendue de l'ouvrage, il sera nécessaire de prendre plusieurs points de départ sur l'ouvrage.

En l'absence de courants vagabonds et de protection cathodique sur l'ouvrage concerné, les valeurs de potentiel mesurées le long d'une direction ne doivent pas fluctuer avec la position de l'électrode.

Si le potentiel présente des variations de l'ordre de plusieurs dizaines de millivolts lorsque l'électrode est déplacée, cela signifie que la mesure du potentiel de corrosion de l'ouvrage inclut une chute de tension. Celle-ci résulte de la circulation d'un courant dans l'électrolyte entre le point de mesure initial et le point où se situe l'électrode lorsque la variation est détectée.

Les lignes de courant (chemins suivis par les courants vagabonds) sont perpendiculaires aux lignes équipotentielles (lignes joignant les points de même potentiel) et sont orientées dans le sens des potentiels décroissants. Plus les équipotentielles sont rapprochées, plus l'intensité du courant est importante.

L'établissement d'une cartographie à partir des mesures réalisées permet donc de déterminer les zones de l'ouvrage où les courants vagabonds sont les plus intenses ainsi que le sens de leur déplacement.

Lorsque les ouvrages influencés par des courants vagabonds sont protégés par des anodes galvaniques, celles-ci sont les sites préférentiels d'entrée et de sortie de courant car leur résistance par rapport à l'eau est bien plus faible que celle de l'acier qui est recouvert d'une couche de dépôt calco-magnésien.

L'acier est donc généralement plutôt préservé alors que certaines anodes peuvent être consommées de façon exceptionnellement rapide (sorties de courant) et d'autres quasiment pas (entrées de courant). L'observation des anodes peut donc aider à détecter et diagnostiquer les effets des courants vagabonds.

Une fois les courants vagabonds détectés, il est nécessaire de s'assurer qu'ils ont une influence néfaste sur l'ouvrage concerné car leur présence n'implique pas forcément que l'ouvrage subisse des entrées et sorties de courants.

Pour cela, toute une batterie de techniques de mesure peut être mise en œuvre.

Étant donné la spécificité de ces techniques et la complexité d'interprétation des résultats, il est recommandé aux gestionnaires de faire appel à des prestataires habitués à traiter ce genre de problématique.

7.4 Atténuation des courants vagabonds

La lutte contre les courants vagabonds nécessite d'identifier leur source possible. Une étude méticuleuse des environnements immédiat et éloigné de l'ouvrage permettra de lister les sources potentielles : présence de grues ou autres équipements alimentés en courant continu, présence de navires, de canalisations ou tout autre structure protégée cathodiquement, proximité d'un site industriel ou d'une voie de chemin de fer électrifiée à proximité.

Une fois la source identifiée, la supprimer constitue le moyen le plus évident pour éliminer les effets des courants vagabonds. Si cette solution est théoriquement très simple, sa mise en œuvre s'avère des plus délicates, notamment quand la source des influences n'est pas du ressort du maître de l'ouvrage influencé.

La seule solution réellement envisageable consiste donc à limiter les influences ou leurs manifestations.

Lorsque les influences résultent de systèmes de traction à courant continu, il est possible de :

- mettre en place des drainages afin de créer des circuits préférentiels de retour des courants vagabonds à leur source (rails).
- mettre l'ouvrage influencé sous protection cathodique ou renforcer la protection s'il est déjà protégé.

Dans le cas où les courants vagabonds sont générés par un système de protection cathodique par courant imposé, plusieurs solutions peuvent être envisagées :

- Mettre en continuité l'ouvrage influencé et l'ouvrage protégé cathodiquement influençant. Ce peut-être le cas d'un navire protégé par courant imposé amarré à un quai (que ce dernier soit ou non protégé). Mais, attention une telle mise en continuité, selon sa durée et la nature de la protection, n'est pas sans conséquence sur l'efficacité et la durée de vie de la protection cathodique en question.
- Réduire au strict minimum l'intensité du courant de protection afin de limiter les influences.
- Mettre en place des écrans diélectriques. Cette solution n'est réellement envisageable que si l'influence est extrêmement localisée. Par ailleurs, toute solution consistant à dévier les courants vagabonds sans réellement les canaliser risque simplement de déplacer le problème.
- Si un tiers installe un système de protection cathodique par courant imposé sur un ouvrage voisin d'un ouvrage risquant de ce fait d'être influencé, il est tenu de mettre en œuvre toutes les dispositions permettant de maintenir les interférences dans des limites préalablement définies en concertation avec le gestionnaire de l'ouvrage influencé (voir norme NF EN 50162[9]).

Si les courants vagabonds proviennent de réseaux d'alimentation en courant continu, les solutions envisageables consistent à :

- modifier l'alimentation de certains équipements (alimentation en alternatif et redressement du courant au niveau de l'équipement),
- améliorer l'isolation des réseaux afin de limiter les fuites.

8. AUTRES TECHNIQUES D'APPRÉCIATION OU DE DÉTECTION

8.1 Recherche de continuités défavorables

Les continuités sont défavorables lorsque l'acier est couplé à un métal ou un alliage plus noble.

Dans le cas des ouvrages maritimes et fluviaux, de telles continuités existent surtout avec des éléments ou structures en aciers inoxydables (boulonnerie, échelles) ou en cuivre (réseaux de mise à la terre).

Rappel : les couplages galvaniques impliquent qu'il existe une continuité électrique (contact métal-métal direct ou indirect) et une continuité électrolytique (métaux placés dans le même électrolyte ou dans des électrolytes différents mais en contact) entre les deux matériaux métalliques dissemblables considérés.

La dangerosité des couplages galvaniques résultant de ces continuités dépend du rapport de surfaces entre l'ouvrage en acier et la structure ou l'élément plus noble. Généralement, le rapport de surfaces est favorable à l'ouvrage en acier et les pathologies résultant de ces couplages se limitent à des corrosions très localisées au point de contact entre les éléments en matériaux dissemblables. Dans le cas où le point de contact est aérien et où les éléments sont éloignés, le couplage affecte le plus souvent une surface d'acier importante et est donc peu problématique.

Cependant, dans certaines situations (cas d'un ouvrage en acier revêtu avec de petits défauts de revêtement par exemple), ce type de couplage peut conduire à des perforations.

La recherche des continuités défavorables se fait d'abord de façon documentaire à partir des plans de l'ouvrage car les couplages galvaniques sont avant tout des problèmes de conception. Elle se fait ensuite sur site que ce soit visuellement (cas des contacts directs évidents) ou par des mesures de potentiel (contacts indirects entre des éléments éloignés). Ces dernières sont utiles car elles aident à la détection de continuités non suspectées (par conséquent la détection est souvent accidentelle et se fait au cours d'une campagne de mesures ordinaire) et permettent de confirmer ou infirmer une continuité suspectée.

Par exemple, une méthode de vérification de continuité consiste à placer une électrode à un point fixe duquel elle ne devra pas être déplacée et à réaliser une mesure de potentiel en prenant successivement un point de prise de masse sur l'ouvrage en acier et sur l'élément ou la structure dont on veut vérifier la continuité. Si les deux valeurs de potentiel mesurées sont identiques (à 2 mV près, hors présence de courants vagabonds), il peut être considéré une continuité.

8.1.1 Cas particulier

Dans le cas d'un ouvrage destiné à être protégé cathodiquement, des mesures sont entreprises afin de vérifier s'il existe une continuité entre les différents éléments constitutifs de l'ouvrage.

L'intérêt de ces mesures est d'adapter le dimensionnement du système et notamment la répartition des anodes aux résultats obtenus afin qu'aucune zone ne soit non protégée.

8.2 Émission acoustique

L'émission acoustique^[11] est une technique de contrôle non destructive qui permet de détecter les défauts évolutifs au sein ou à la surface d'un matériau. Ces défauts actifs génèrent des ondes dont la signature acoustique permet de les caractériser.

La corrosion humide de l'acier, par les processus électrochimiques et les transformations du matériau qu'elle induit, génère une activité acoustique qu'il est possible de détecter et d'identifier.

8.3 Impédance mécanique

Utilisée pour l'inspection des tirants d'ancrage des palplanches, l'impédance mécanique permet d'en mesurer la longueur et d'évaluer les efforts en tension qu'ils subissent. Elle est donc potentiellement capable de déceler une rupture de tirant induite par la corrosion.

Les possibilités et les limites de cette technique dans la détection, la caractérisation et la localisation de la corrosion sur des tirants ou autres éléments d'un ouvrage maritime ou fluvial restent indéfinies.

III. Les systèmes de protection

1. PRINCIPES ET MÉTHODES DE PROTECTION

1.1 Conception et prise en compte de la corrosion

Le taux de perte d'épaisseur d'une surface métallique exposée à un milieu corrosif varie avec l'agressivité de la zone d'exposition et la nature du milieu en contact (sol, eau de mer, embruns, eaux saumâtres ou eaux douces). Ce taux diminue avec la durée d'exposition mais peut localement prendre des valeurs très élevées sous l'effet d'une corrosion localisée favorisée par un incident (choc, abrasion), une aération importante (remous) ou une variation du pH (pollution, activités bactériennes).

Pour une structure présentant une surface avec différentes zones d'exposition (éclaboussures, marnage, basses eaux, immersion et fiche), le taux de perte maximal ne correspond pas nécessairement à la zone du moment fléchissant maximal. L'épaisseur de réserve dite épaisseur sacrificielle doit ainsi être examinée dès la conception dans la perspective de la stabilité de l'ouvrage ?

Le comportement d'une structure métallique reste sensible aux variations des paramètres influençant la corrosion (conductivité, aération, pH, contact bimétallique ou courants vagabonds). De ce fait, la meilleure protection reste celle produite par un système maintenable (système de peinture ou protection cathodique). À cela, il faut intégrer une épaisseur sacrificielle qui rend pérenne et efficace le système de protection choisi y compris en cas de panne ou d'avarie nécessitant un certain temps pour sa réparation ou son remplacement (fin de vie des anodes, obsolescence et écaillage du système de peinture).

La méthode conventionnelle pour assurer une durée de service donnée pour une structure métallique en site aquatique consiste à concevoir l'ouvrage avec une sur-épaisseur qui est sacrifiée pour la corrosion selon une vitesse en mm/an. Elle a été déterminée expérimentalement par la plupart des sources portuaires selon les façades maritimes et correspond à la zone d'exposition de marnage (0,15 à 0,50 mm/an) et à la zone d'immersion permanente (0,025 à 0,125 mm/an). Pour la façade maritime méditerranéenne le marnage étant inférieur à 1 m, un couronnement en béton armé d'une hauteur de 0,5 à 1,5 m protège les structures métalliques dans la partie des éclaboussures et évite ainsi la corrosion sévère des parties métalliques dans cette zone d'exposition.

Concernant l'ingénierie de la structure, il est question de trouver la corrélation entre la distribution réelle des charges et la répartition des pertes d'épaisseur dues à la corrosion sur toute la hauteur de la structure métallique. La plupart des structures inspectées (visuellement et par mesures d'épaisseur par ultra-sons) montrent une dégradation plus prononcée en zone des basses eaux ou en zone d'éclaboussure.

Aucune technique ne peut conduire à une évaluation correcte des pertes d'épaisseur sur toute la surface d'une structure. Seuls un échantillonnage adapté au site (cotes et positions des points de mesure en fonction des zones critiques d'exposition) et une moyenne des mesures d'épaisseur par ultrasons peuvent fournir une approche de l'état résiduelle de la structure. Il convient alors de vérifier le moment fléchissant maximal en intégrant l'épaisseur résiduelle obtenue. Le moment fléchissant réel est généralement très inférieur au moment admissible et les épaisseurs résiduelles restent acceptables.

Une synthèse des pratiques opérées à ce jour dans la plupart des ports maritimes indique que les réserves d'épaisseur prises en compte dès la conception sont largement suffisantes et assurent la stabilité des structures au-delà des durées de vie initialement considérées. Les dommages relevés sont, pour la plupart, causés par des corrosions localisées avec des vitesses élevées. Ces corrosions apparaissent soudainement. Dans ces cas de figures, la sur-épaisseur n'apporte aucun remède. Seule une solution efficace par système de peinture en zone de marnage et accessible à sec, ou par protection cathodique en zone immergée et en fiche, peut limiter la perte d'épaisseur et éviter des corrosions dommageables et localisées.

Le tableau de la [figure 1.1](#) montre des valeurs de pertes d'épaisseur (en mm/an) issues d'observations dans différents ports de leurs infrastructures soumises aux agressions marines.

Tableau 1.1 Pertes d'épaisseurs en mm/an attendues en fonction du type d'environnement

Durée de vie (années)	25	50	75	100
Eau douce (rivière)	0,041	0,026	0,020	0,017
Eau saumâtres (estuaire) et eaux de mer	0,140	0,120	0,105	0,095
Eau de mer avec agitation, turbidité et courant	0,290	0,280	0,275	0,270
Sol (partie en fiche)	0,010	0,006	0,005	0,004

1.2 Protection passive

La séparation passive d'un alliage métallique de l'électrolyte peut être réalisée par un film imperméable sur toute la surface en contact avec le milieu. L'obtention de ce film protecteur est réalisée généralement par un système de couches successives dont chacune sera caractérisée par une fonction prépondérante.

- La première couche devra adhérer au substrat (surface métallique), ce qui nécessite une certaine rugosité (état de surface obtenu par une bonne préparation telle que le sablage, le grenailage ou un autre nettoyage). Cette couche peut contenir des éléments anodiques (enrichissement en zinc) qui augmenteront la protection en cas de porosité défectueuse.
- La deuxième couche a la fonction de bouche-pores et d'imperméabilisation. Elle devra adhérer à la première (composants compatibles).
- Une troisième couche sera appliquée éventuellement pour assurer la fonction de finition, avec un colorant selon l'esthétique souhaitée.

Toutes ces couches nécessitent une certaine viscosité pour l'application. Ceci implique qu'elles contiennent un solvant qui doit se volatiliser en cours de séchage du produit.

Il est impératif de respecter les conditions hygrométriques lors de l'application, et de limiter les épaisseurs pour un bon résultat à sec.

La maintenance des systèmes de protection par peinture impose des conditions de travail à sec avec possibilité de récupération des produits décapés. De ce fait, ce système est très peu appliqué en zone immergée et son application à la zone de marnage est rendue difficile par le temps restreint de découverte totale de la surface à recouvrir. Un produit s'appliquant humide sur humide est recommandé pour zone de marnage mais non recommandé pour la zone immergée (difficulté d'application et de maintenance), sauf en cas d'utilisation d'un batardeau (au coût généralement élevé).

1.3 Protection électrochimique

Selon la norme NF EN 12473[4] la protection cathodique est un système de prévention électrochimique contre la corrosion fondé sur la diminution du potentiel de corrosion jusqu'à un niveau où la vitesse de corrosion du métal est réduite de manière significative. Elle est obtenue par application d'une tension capable de fournir un courant suffisant à la surface métallique pour diminuer le potentiel. En d'autres termes, la surface est transformée en cathode d'une cellule électrochimique.

La protection par anodes galvaniques (dites sacrificielles) est obtenue par connexion d'une anode galvanique constituée d'un matériau plus électronégatif que le métal de la structure. Cette anode se dissout dans l'électrolyte et débite un courant dans le sens mer – structure qui se trouve ainsi protégée.

La source peut être aussi un générateur de courant continu avec la polarité négative connectée à la structure et la polarité positive à une anode pour faire passer le courant dans le sens mer – structure. L'anode, dans ce cas, est peu sensible à l'électrolyse et est appelée déversoir.

1.4 Combinaison des systèmes de protection

Chacun des systèmes décrits ci-dessus nécessite le respect de règles de conception d'une part, de règles de l'art pour la mise en œuvre d'autre part. En effet, dans le cas d'un système de peinture, la séparation entre l'électrolyte et le métal doit être parfaite et durable. Dans celui d'une protection cathodique, le potentiel de protection de la structure doit être atteint partout et de la façon la plus uniforme possible.

La configuration du site et la zone d'exposition imposent parfois de recourir à la combinaison des deux systèmes, en particulier dans la zone de marnage. Pour une telle combinaison il est considéré que la protection complémentaire (le revêtement) complète le système de protection principal (cathodique)[12]. La difficulté de mise à sec et d'accès dans cette zone tend à réduire l'efficacité du système de peinture, d'une part, et l'alternance émergence — immersion tend à faire varier le potentiel imposé par le système cathodique (celui-ci ne fonctionnant qu'en présence d'électrolyte), d'autre part.

Des dispositions particulières, dans le choix du système de peinture et dans celui du dimensionnement de la protection cathodique, peuvent être utilement et judicieusement prises. La modification du pH et le dépôt calco-magnésien de la protection cathodique peuvent nuire à l'adhérence du système de peinture sur la surface métallique. En revanche, les blessures et avaries limitées du système de peinture peuvent être recouvertes par une protection cathodique.

2. SYSTÈMES DE PROTECTION PAR PEINTURE

2.1 Caractéristiques et conditions d'application

Au-delà de la simple propriété de protection anticorrosion, un système de peinture doit posséder certaines propriétés complémentaires :

- il doit être applicable dans les conditions du chantier ;
- son temps de séchage doit être limité ;
- il doit avoir certaines caractéristiques particulières (résistance à l'abrasion, aux UV) ;
- la peinture doit mouiller la surface telle de sorte que le film sec soit adhérent au support.

Les éléments composant une peinture peuvent être regroupés en cinq catégories : le liant, les composés volatils, les pigments, les charges et les additifs.

L'élément majoritaire de la peinture est un polymère appelé liant. C'est lui qui détermine pour une grande part les propriétés du revêtement (principalement la cohésion, l'adhésion et la flexibilité). On classe en général les peintures par types de liant (époxyde, polyuréthane, alkyde). Les trois liants les plus utilisés sont les époxydes, les polyuréthanes et les silicates d'éthyle.

Les époxydes sont très utilisés car ils sont relativement faciles à mettre en œuvre, ils ont une bonne cohésion, une excellente adhérence, de bonnes caractéristiques mécaniques contre l'abrasion et une grande inertie chimique. Ils ont également une bonne résistance à l'eau en immersion.

Les polyuréthanes sont utilisés pour leur résistance aux UV, propriété que n'a pas l'époxyde. Ils ont aussi une bonne résistance mécanique contre l'abrasion et une grande inertie chimique.

Le silicate d'éthyle, riche en zinc, utilisé comme primaire anticorrosion, présente d'excellentes propriétés, mais il est plus difficile à mettre en œuvre. Il doit être agité en permanence pendant l'application, il nécessite une hygrométrie élevée lors de l'application et il est sensible aux fortes épaisseurs.

Les composés volatils ont pour rôle de favoriser l'application de la peinture. Ils sont de deux types :

- le solvant, qui permet d'appliquer la peinture sous forme liquide (il solubilise le liant) ;
- le diluant, qui permet d'ajuster la viscosité et la vitesse de séchage afin de faciliter l'application.

Le solvant est déjà présent dans les produits fournis alors que le diluant est ajouté au moment de l'application.

Au contraire des autres composants de la peinture, les composés volatils vont s'évaporer et ne feront donc pas partie du film sec.

Les pigments sont des solides finement divisés qui sont répartis dans le liant. Ils assurent plusieurs fonctions dont les plus importantes sont l'opacité, la couleur et le brillant du revêtement. Ils peuvent également avoir pour fonction d'augmenter la dureté et la résistance à l'abrasion ou de diminuer la perméabilité du revêtement.

Exemples de pigments :

- dioxyde de titane (opacité) ;
- phosphate de zinc (inhibiteur de corrosion) ;
- oxyde de fer micacé, écailles de verre (effet barrière, résistance à l'abrasion) ;
- poudre de zinc (effet sacrificiel).

Les charges sont également des solides finement divisés. Cependant, leur fonction principale est d'ajuster les propriétés rhéologiques de la peinture. Elles peuvent également ajuster le brillant et les propriétés mécaniques du revêtement.

Les additifs sont des agents introduits en faible quantité, souvent comme catalyseurs. Dans le cas des alkydes, des siccatifs peuvent être introduits afin d'accélérer la phase de séchage. Dans le cas des polyuréthanes, les catalyseurs ont pour but d'augmenter la vitesse de réticulation.

Les additifs peuvent également être des agents anti-mousse, anti-sédimentation, anti-peau...

En fonction de sa composition, une peinture a des propriétés bien spécifiques. Dans le cas d'une protection anticorrosion, les propriétés attendues ne sont pas exactement les mêmes selon que l'on se trouve à l'interface métal-peinture, au cœur de la peinture ou à l'interface peinture-milieu extérieur.

C'est pourquoi, afin de répondre au mieux à ces besoins, on fait appel à des systèmes de peinture qui sont des combinaisons spécifiques de couches de peinture ayant des formulations différentes. On obtient ainsi un ensemble cohérent du point de vue de la protection anticorrosion.

Les différentes couches d'un système peuvent être regroupées en trois groupes :

- la couche primaire qui assure l'adhérence au support et un rôle de protection anticorrosion ;
- la couche intermédiaire qui assure une protection par effet barrière et qui a une bonne compatibilité avec le primaire et la finition ;
- la couche de finition dont le rôle est de conférer un bel aspect à la surface (couleur, brillance) et un effet écran vis-à-vis des agressions extérieures (résistance aux UV notamment).

La composition chimique de chaque couche est fonction de ces différents rôles.

Typiquement, pour un système utilisé dans un milieu très sévère tel que les zones de marnage ou d'éclaboussure en milieu marin, on peut constater les différences suivantes entre les couches :

- le primaire est riche en zinc dans le but d'assurer une protection anticorrosion par effet sacrificiel si le système de peinture venait à être dégradé ;
- la couche intermédiaire est caractérisée par une forte épaisseur et est chargée en écailles de verre pour renforcer l'effet barrière et l'imperméabilité ;
- le liant de la peinture de finition est un polyuréthane (contre un époxyde pour l'intermédiaire et un époxyde ou un silicate d'éthyle pour le primaire) afin de résister aux agressions extérieures, notamment à l'abrasion et aux UV.

Les conditions d'application du système sont données par le fournisseur ou par des organismes de certification tels que l'ACQPA. Le travail de l'OHGPI (Office d'homologation des garanties de peinture industrielle) consiste à analyser les éléments de chantier, en particulier la description de l'ouvrage, l'environnement, la préparation de surface, les conditions d'application, le système de protection appliqué et les avis du fabricant de peinture et de l'applicateur sur la garantie demandée.

Au vu de ces éléments, l'OHGPI donne son avis sur la garantie maximale pouvant être octroyée en termes d'anticorrosion et de tenue, et sur des garanties particulières éventuelles.

La fiche H alors délivrée résume tous les éléments du chantier et fait référence à un cahier des charges à respecter (fascicule 56 du CCTG) ; elle est signée par les deux garants et validée par l'OHGPI et jointe à l'offre commerciale et au contrat.

Elle est fournie par le titulaire du marché au moment de la demande d'acceptation du système par le maître d'ouvrage.

Cette validation renforce la confiance du maître d'œuvre dans la garantie exigée.

2.2 Choix du système à appliquer

Le choix du système anticorrosion est fonction :

- du type de surface à traiter ;
- de la durée de vie attendue et de la garantie souhaitée ;
- des conditions de remise en peinture ;
- de l'environnement de l'ouvrage et de son agressivité.

2.2.1 La durée de vie attendue et la garantie souhaitée

La durée de vie attendue est une notion technique utile pour définir un programme d'entretien qui corresponde à la durée de vie escomptée jusqu'à la première application importante de peinture d'entretien.

La garantie est une notion juridique faisant l'objet de dispositions précises dans la partie administrative d'un contrat. L'entrepreneur est tenu de maintenir la protection conforme aux exigences du marché pendant toute la durée de garantie.

La durée de garantie est bien sûr inférieure à la durée de vie du système et il n'existe aucune corrélation entre elles.

La garantie est une garantie d'efficacité anticorrosion (enrouillement) et d'aspect (cloquage, craquelage et écaillage).

Par exemple, le fascicule 56 du CCTG (révision de février 2004) fixe les niveaux de performance et les délais de garantie suivants pour des travaux de maintenance sur site (ouvrages avec dispositions constructives acceptables) :

- *enrouillement* : 7 ans pour le niveau Ri2 suivant la norme ISO 4628-3 ;
- *cloquage, craquelage et écaillage* : 4 ans niveau 3(S3) sur une surface < 1 % (3 défauts cumulés) de la surface de référence.

Pour des travaux de peinture sur ouvrage neuf lorsque la totalité du système est appliqué en atelier, les niveaux de garantie fixés par le fascicule 56 du CCTG sont les suivants :

- *enrouillement* : 9 ans Ri1 ;
- *cloquage, craquelage et écaillage* : 6 ans pour le niveau 3 (S3) sur une surface inférieure à 1 % (3 défauts cumulés) de la surface de référence.

Ces niveaux de garantie impliquent de respecter la préparation de surface définie sur les fiches de certification des systèmes ACQPA ou équivalents et la mise en œuvre d'un système ACQPA ou équivalent par des opérateurs certifiés ACQPA ou équivalent.

Toujours dans le cadre de l'ACQPA, du fait de la forte agressivité du milieu et des contraintes associés aux remises en peinture, il est à noter que pour les systèmes C5M et Im2, l'ACQPA ne propose pas de système de maintenance.

Par ailleurs, le domaine d'application du fascicule 56 du CCTG ne couvre pas les travaux de maintenance pour les structures immergées ou enterrées pour lesquelles un entretien périodique n'est pas possible.

2.2.2 Les conditions de remise en peinture

La durabilité d'un système de peinture peut être améliorée en doublant l'application de la couche intermédiaire du système par exemple.

2.2.3 L'environnement dans lequel se situe l'ouvrage

La partie 2 de la norme NF EN ISO 12944[13] définit différents types d'environnement.

Les catégories à considérer en milieu portuaire sont les suivantes :

- CX (ou C5M - version 1998 de la norme) : marine ;
- Im2 : immersion sans protection cathodique ;
- Im4 : immersion avec protection cathodique.

Le système de peinture retenu doit être en concordance avec l'environnement de la zone exposée.

Certains organismes de certification, par exemple l'ACQPA, utilisent directement cette classification.

La marque ACQPA introduit des sous classes dans les systèmes C5M : C5Ma et C5Mm. La première est associée aux parties aériennes des structures marines et la seconde aux parties soumises aux marnages ou aux éclaboussures de ces mêmes structures. Le type de surface

Le choix du système doit tenir compte du type de surface sur laquelle la peinture est appliquée. Dans le cas de l'ACQPA, le domaine d'application de chaque système est précisé dans son numéro de certification. Par exemple :

C5Ma A N V 934

- C5Ma désigne la classe de certification ou le type d'environnement pour lequel le système est certifié (milieu marin, parties aériennes uniquement (C5Mm : voir ci-dessus ; IM2 correspond à l'immersion en eau de mer ou saumâtre)) ;
- A désigne le type de subjectile : acier (G correspond à la galvanisation et Z à la métallisation) ;
- N désigne le type de travaux : neuf (M correspond à la maintenance) ;

- V indique que la peinture est destinée aux parties visibles de l'ouvrage, car elle peut répondre aux performances de stabilité de couleur retenues par l'ACQPA (I correspondrait à des parties non-vues) 934 est le numéro d'enregistrement du système à l'ACQPA.

2.3 Préparation de surface

Pour assurer une protection efficace, le système de peinture doit, en plus de réunir les propriétés intrinsèques et d'adaptation à l'environnement adéquates, être suffisamment adhérent au support pour ne pas laisser passer d'agents agressifs depuis le milieu vers la surface du métal. Les différentes étapes de la préparation de surface visent à obtenir une rugosité et une propreté du support suffisantes à cet effet.

Outre la préparation préalable du support, cinq étapes sont nécessaires pour obtenir un support apte à recevoir la protection anticorrosion :

- *Étape 0 - Réception du support* : cette étape permet de constater que la pièce est conforme au degré de préparation de surface retenu concernant la présence de soudures, d'arêtes et autres imperfections comme les écailles, de zones inaccessibles, de délaminations...
La mise en peinture pouvant cacher certains défauts du support, cette étape, qui fait partie de l'épreuve de convenance, constitue un point critique important où la présence du maître d'œuvre est fortement conseillée. La vérification des résultats de l'épreuve de convenance constitue quant à elle un point d'arrêt devant être levé par le maître d'œuvre avant la poursuite des travaux de protection.
- *Étape 1 – Dégraissage* : les corps gras empêchent la peinture d'adhérer au support, aussi, les graisses doivent-elles être dégradées sous forme de sels solubles par un détergeant.
- *Étape 2 – Élimination des sels solubles* : les sels sont des particules chargées électriquement qui ont donc la propriété d'être hygroscopiques.
Ces sels peuvent provenir de l'environnement (eau de mer notamment) mais également être le résultat de l'étape de dégraissage. Elles attirent l'eau au travers du film de peinture pour former des cloques (cloquage osmotique). Les sels solubles doivent donc être éliminés avant la mise en peinture par un lavage à l'eau.
- *Étape 3 – Séchage* : l'humidité empêche l'adhérence de la peinture sur le support et facilite la corrosion. L'eau peut être éliminée par un séchage de la pièce à l'air comprimé. Le circuit d'air comprimé doit naturellement être propre afin de ne pas envoyer de l'air chargé en humidité ou en particules grasses.
- *Étape 4 – Décapage* : afin d'éliminer la peinture non adhérente, il faut procéder à un décapage de la pièce. Ce décapage peut se faire suivant plusieurs méthodes : à l'abrasif, à l'eau sous ultra-haute pression... Le décapage à l'abrasif présente l'avantage de créer une rugosité pour une meilleure adhérence du nouveau système.
- *Étape 5 – Dépoussiérage* : les poussières empêchent la peinture d'adhérer au support. Elles sont éliminées par un soufflage à l'air comprimé.

Attention : chacune des étapes a un objectif bien particulier et elles ne peuvent pas être réalisées dans un ordre différent, sous peine de perdre tout le bénéfice du travail effectué, voire d'aggraver les conditions (cas du dégraissage après décapage à l'abrasif par exemple : les graisses sont incrustées dans le support par l'abrasif et d'autant plus difficiles à éliminer par la suite).

L'efficacité des différentes étapes de cette préparation peut être contrôlée par des tests décrits dans les normes NF EN ISO 8501[14], NF EN ISO 8502[15] et NF EN ISO 8503[16] :

- *Étape 0 – Réception de la pièce* : NF EN ISO 8501-3[14]- Le contrôle se fait de manière visuelle. La norme indique trois niveaux de préparation. Le contrôleur vérifie qu'il n'y a pas de défauts supérieurs aux tolérances de la norme.
- *Étape 1 – Graisses et huiles* : NF EN ISO 8502-7 - Le contrôle est réalisé en frottant un chiffon propre sur la surface et en évaluant sa propreté ensuite.
- *Étape 2 – Sels solubles* : NF EN ISO 8502-6 et NF EN ISO 8502-9 - Le contrôle consiste à appliquer une pastille évidée de surface exactement connue sur la pièce et d'y injecter de l'eau déminéralisée afin d'extraire les sels solubles. La conductivité de la solution ainsi obtenue est mesurée afin de déterminer la concentration en sels solubles.
- *Étape 3 – Séchage* : le thermo-hygromètre permet de vérifier les conditions thermo-hygrométriques selon les normes NF EN 8502-8 et NF EN ISO 8502-4. La première norme présente une technique qui permet de quantifier l'eau condensée par réflectométrie. La seconde norme est prédictive. Elle est basée sur la mesure des conditions atmosphériques (température de l'air et du support, humidité de l'air) pour déterminer si la surface est en atmosphère condensante ou non.

- *Étape 4 – Décapage* : degré de soin et rugosité respectivement selon les normes NF EN ISO 8501-1 et NF EN ISO 8503-2. L'évaluation se fait de manière visuelle :
 - pour le degré de soin : comparaison avec des clichés types de la norme ;
 - pour la rugosité : comparaison avec un cadran viso-tactile (échantillon témoin de quatre profils de rugosité). Le cadran viso-tactile est spécifique au type d'abrasif utilisé.
- *Étape 5 – Dépoussiérage* : NF EN ISO 8502-3. Le test consiste à appliquer un ruban adhésif sur la surface de l'élément afin que s'y colle les poussières présentes puis de le comparer avec des clichés de ruban adhésif type.

La réalisation et surtout l'interprétation de ces tests nécessitent un certain niveau d'expertise. Ce niveau d'expertise est validé par certains organismes après une formation et un examen théorique et pratique. L'ACQPA est l'un des organismes délivrant la certification d'inspecteur ACQPA-FROSIO.

2.4 Application du système de peinture et contrôle

2.4.1 Application du système de peinture

Au-delà du choix du système de protection anticorrosion, les conditions d'application du système sont essentielles pour assurer la tenue de celui-ci.

En effet, si la cohésion du système de peinture est assurée par le système lui-même, l'adhérence entre les couches et sur le support, est principalement gouvernée par les conditions d'application.

Pour assurer de bonnes performances du système, plusieurs critères sont à respecter :

- les conditions thermo-hygrométriques pendant l'application et le séchage ;
- la préparation de surface.

Les spécifications particulières du système de peinture retenu sont les épaisseurs nominales et les délais de recouvrement.

La maîtrise des conditions thermo-hygrométriques est importante pour deux raisons :

- elle permet de s'assurer qu'il n'y a pas d'humidité sur le métal, ce qui empêcherait la peinture d'adhérer,
- les conditions thermo-hygrométriques gouvernent la vitesse de séchage de la peinture : une température trop basse ou une humidité trop élevée bloquent le séchage de la peinture (hormis dans le cas particulier de l'éthylsilicate).

Pour chaque système de peinture, des épaisseurs de peinture contractuelles sont spécifiées sur les fiches de certification ACQPA pour chaque couche, ainsi qu'un délai de recouvrement minimum et maximum entre couches. Les épaisseurs contractuelles sont nécessaires pour assurer la durée de vie du système. Le temps de recouvrement entre couches permet d'éviter les problèmes d'adhérence entre deux couches successives.

Il est totalement exclu, même dans une volonté de gain de temps, d'appliquer plusieurs couches (même identiques) en une fois. En effet, plus la couche est épaisse, plus le temps de diffusion des composés volatiles est long et plus le risque est important d'emprisonner ces composés. De plus, en respectant le nombre de couches, on diminue le risque de porosité du système de peinture.

Il est important de noter que les épaisseurs données par les fiches des fabricants sont des épaisseurs sur subjectile lisse. Dans le cas où une rugosité a été créée sur le subjectile, il faut tenir compte de la quantité de peinture nécessaire pour combler cette rugosité (par exemple, 25 μm dans le cas d'une rugosité Moyen-G).

2.4.2 Organisation du contrôle qualité

Au-delà de l'aspect technique des contrôles évoqués ci-dessus, l'assurance qualité définit deux types de contrôle : le contrôle intérieur et le contrôle entre lesquels il est essentiel de faire la différence.

Le contrôle intérieur est de la responsabilité de l'entreprise, qui doit vérifier que le travail effectué est en concordance avec le travail commandé.

Il est divisé en deux parties :

- le contrôle interne, réalisé en général par l'opérateur qui s'assure du bon déroulement des opérations ;
- le contrôle externe réalisé par une personne extérieure à la production, qui peut être sous-traité.

Il s'agit d'un contrôle final de production.

Le contrôle extérieur, réalisé pour le maître d'ouvrage, lui permet de s'assurer de l'efficacité du contrôle intérieur.

Il est effectué par lui-même, le maître d'œuvre ou un organisme extérieur.

2.4.3 Les contrôles de l'application

- *En cours d'application (auto-contrôle par l'opérateur)*
- Outre le fait que les recommandations d'emploi et de mise en œuvre indiquées sur les fiches de certification (ou le cas échéant les fiches techniques du fabricant) doivent être respectées (temps de mûrissement, durée de vie en pot), ce contrôle consiste à :
 - vérifier que les conditions thermo-hygrométriques sont conformes durant toute l'application et la phase de séchage,
 - mesurer les épaisseurs humides à l'aide d'une jauge type peigne.
- *Après l'application et le séchage de chaque couche (contrôles réalisés par le service qualité)*
 - aspect visuel : le film de peinture doit être lisse et bien fermé ;
 - mesure des épaisseurs sèches selon la norme ISO 19840[17] : elles se font avec un appareil électronique qui doit être étalonné avant chaque série de mesures à l'aide de cales étalons. Il faut tenir compte de la rugosité dans la mesure des épaisseurs.
 - Il existe d'autres essais qui ne sont pas réalisés aussi systématiquement :
 - essai non destructif : contrôle de l'absence de porosités débouchantes par le test à l'éponge. Il s'agit d'un boîtier électronique relié électriquement à la pièce à contrôler et à une éponge humide qui est déplacée sur la surface de la pièce. Une sonnerie retentit lorsque des porosités sont détectées.
 - essai destructif : test d'adhérence par essai de traction selon la norme NF EN ISO 16276-1[18] (sur système complet) ou de quadrillage selon la norme NF EN ISO 16276-2[19]. Ces essais ont pour but de vérifier l'adhérence du système de peinture sur le substrat. L'essai de quadrillage est utilisé pour les systèmes dont l'épaisseur est inférieure à 250 μm environ. L'essai de traction est privilégié pour des épaisseurs plus importantes.

2.5 Gestion des résidus de décapage

La remise en peinture de structures génère plusieurs types de déchets :

- abrasifs souillés (ou déchets de peinture dans le cas d'un décapage à l'eau) ;
- pots de peinture ;
- absorbants, matériaux filtrants, matériels de protection, chiffons... ;
- cartons et emballages.

Tous ces déchets sont à la charge de l'entreprise excepté les déchets provenant directement du décapage, les abrasifs souillés (ou les déchets de peinture dans le cas d'un décapage à l'eau), qui, eux, sont à la charge du maître d'ouvrage.

Il est indispensable de pouvoir caractériser les déchets de décapage lors de l'essai préalable afin d'en assurer une gestion adéquate et économique.

D'après le Code de l'environnement, les déchets industriels peuvent être de deux types :

- déchets dangereux (DD) : déchets présentant un risque potentiel pour l'environnement,
- déchets non dangereux (DND) : déchets non dangereux, non toxiques.

L'annexe II de l'article R541-8 du code de l'environnement donne la codification de chaque type de déchet. Quand un code est suivi d'un astérisque, cela signifie que le déchet est dangereux.

Les codifications concernant les déchets issus du décapage des peintures sont selon le code de l'environnement :

- 08.01.17* : déchets provenant du décapage de peintures ou vernis contenant des substances organiques ou autres substances dangereuses,
- 08.01.18 : déchets provenant du décapage de peintures ou vernis autres que ceux visés à la rubrique 08.01.17*.

Les critères CMR sont définis par la réglementation CLP (Classification, Labelling, Packaging). Afin de caractériser la dangerosité du déchet, des analyses doivent être réalisées sur les déchets de décapage bruts.

Afin de déterminer l'admission du déchet en installation de stockage, des tests de lixiviation sont effectués.

2.5.1 Choix de la filière d'élimination

Le traitement des déchets repose sur trois modes d'élimination, choisis non seulement selon des critères techniques (nature, volume, etc..), mais également selon le meilleur compromis technico-économique local :

- le recyclage : cette solution est considérée comme prioritaire par les pouvoirs publics mais les filières de valorisation rentables n'existent pas actuellement pour des résidus de décapage par projection d'abrasifs ;
- l'incinération : cette solution présente l'avantage de réduire considérablement les volumes de déchets organiques et d'introduire des minéraux dans les cimenteries. Néanmoins, l'exploitant peut refuser certains déchets s'ils ne sont pas répertoriés dans l'arrêté préfectoral délivré pour le fonctionnement de son installation classée pour l'environnement ;
- le stockage permanent : cette solution consiste à ne déposer que la fraction ultime du déchet, en respectant les critères d'acceptation du centre d'enfouissement technique (CET). Il existe trois catégories de CET selon la dangerosité des déchets : installation de stockage pour déchets dangereux (ISDD), installation de stockage pour déchets non dangereux (ISDND), installation de stockage pour déchets inertes (ISDI non utilisée pour les déchets de peinture).

Pour être admis dans une installation de stockage, les déchets doivent satisfaire :

- à la procédure d'information préalable avec délivrance du certificat d'acceptation préalable ;
- au contrôle de réception, à l'entrée du site, qui vérifie la pertinence des informations entre la portée du certificat d'acceptation préalable et la dangerosité des déchets prêts au stockage.

2.6 Maintenance du système, durabilité et rénovation

Suivant l'état de l'ouvrage considéré, plusieurs stratégies peuvent être envisagées. Ces stratégies influent sur le choix du procédé de préparation de surface ainsi que sur le type et la mise en œuvre du système.

Le choix de telle ou telle stratégie est fonction :

- du type de défaut observé sur la structure ;
- de l'étendue des défauts ;
- de la qualité du système de peinture en place ;
- des conditions dans lesquelles peuvent se faire les opérations de maintenance ;
- du budget alloué à cette opération.
- Trois stratégies peuvent être envisagées :
- reprises très locales du système ;
- reprise générale de l'ensemble du système avec mise à blanc de l'acier pour les points les plus endommagés de la structure et avivage pour le reste ;
- reprise complète du système de l'ouvrage.

2.6.1 Reprise localisée

Les reprises très localisées du système sont utilisées lorsque l'ensemble du système est dans un excellent état mais que certaines zones de faibles dimensions sont dégradées du fait de chocs répétitifs, par exemple. Pour préserver ces zones, on procède alors à une remise en peinture dans le but de conserver une protection jusqu'à la remise en peinture généralisée de l'ouvrage.

Pour le faire, on procède à des opérations de décapage, *via* des moyens mécaniques (brosses mécaniques ou disque abrasif) et d'application manuelle *via* un pinceau ou un rouleau à poils (selon la fiche technique de la peinture).

Nota bene : il est essentiel de faire attention à la transition avec le système qui sera laissé en place en périphérie de la zone traitée. Pour assurer une bonne liaison, il faut procéder à un décapage étagé. Cette technique consiste à appliquer une pression de moins en moins forte en s'éloignant de la zone traitée pour mettre progressivement en évidence les différentes couches de peinture alentour.

2.6.2 Avivage

Cette technique est utilisée lorsque qu'il existe une variation importante de tenue entre les différentes couches ou encore lorsque le primaire est un minium de plomb. En effet, ce primaire a une excellente tenue mais il est toxique, on préfère donc souvent le laisser en place.

L'avivage consiste à éliminer sélectivement la ou les couches externes. Généralement la dégradation du système n'est pas homogène et l'avivage est associé au décapage à nu de l'acier sur des zones enrouillées très restreintes.

Il doit être effectué par des opérateurs expérimentés et peut se faire à l'abrasif ou à l'eau sous pression (HP ou UHP). Il n'est pas nécessaire ici de recréer la rugosité initiale puisqu'on n'atteint pas le subjectile. L'avantage de l'eau sous pression est qu'elle génère moins de déchets. En contrepartie, elle ne permet pas d'obtenir de rugosité sur les zones nécessitant une mise à nu d'un alliage métallique.

Dans le cas de l'avivage, la remise en peinture se fait le plus souvent à l'«*airless*», comme dans le cas d'une mise en peinture classique.

2.6.3 Reprise générale du système

La reprise générale du système consiste à se remettre dans les conditions du neuf, c'est-à-dire à décaper l'ensemble de l'ancien système et à appliquer le nouveau système directement sur l'acier. Dans le cas d'une reprise générale, il est donc indispensable de faire un décapage à l'abrasif pour retrouver la rugosité. La rugosité et le degré de soin recherchés sont les mêmes que pour les travaux neufs.

3. SYSTÈMES DE PROTECTION CATHODIQUE

3.1 Principe de protection et zones d'exposition concernées

Le potentiel naturel de l'acier nu dans l'eau de mer est généralement de l'ordre de -650 mV (électrode de référence argent/chlorure d'argent). La protection contre la corrosion est obtenue par diminution du potentiel de la surface du métal en appliquant un courant suffisant. La différence de potentiel est de l'ordre de -780 mV (électrode Ag/AgCl).

C'est une protection active qui nécessite une source de charges électriques dans un milieu conducteur (sol humide, eau de mer, eau saumâtre et eau douce).

L'abaissement du potentiel jusqu'à sa valeur d'immunité peut avoir deux origines :

- dans le cas de la protection par anode sacrificielle, le métal devient une cathode lorsqu'il est en contact électrique avec un métal plus électro-négatif placé dans un même milieu électrolytique ;
- dans le cas de la protection par courant imposé, le métal devient la cathode en étant placé au pôle négatif d'un générateur redresseur. Le pôle positif est alors constitué d'un matériau plus noble et cette anode est appelée déversoir. Anode et cathode sont placées dans le même milieu électrolytique.

Le système de protection cathodique repose sur des échanges anode/cathode (transfert d'électrons) et anode/milieu électrolytique (migration ionique et dissolution d'un alliage métallique et formation d'oxyde). L'ensemble forme un circuit fermé avec une circulation de courant de conduction (déplacement d'électrons dans un milieu métallique (anode vers cathode)) et un courant par migration d'ions dans le milieu électrolytique (eau de mer ou milieu aqueux).

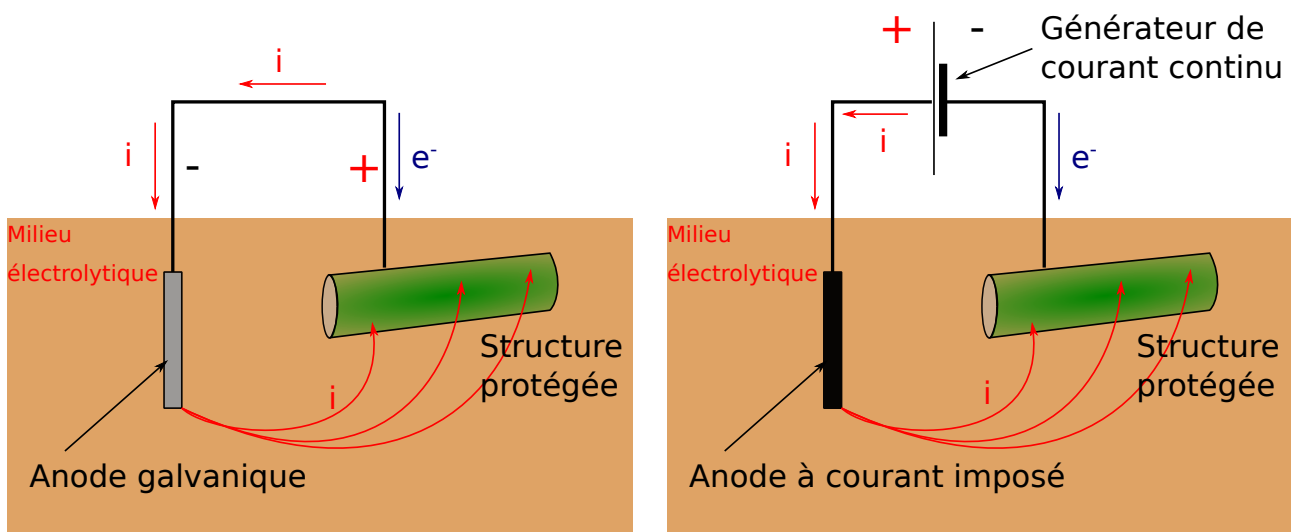


Figure III.3.1 - Principe de la protection cathodique par anode sacrificielle (gauche) et par courant imposé (droite)

Le principe de fonctionnement de la protection cathodique exclut les parties de structures non exposées à un milieu conducteur (immergées ou enterrées) car l'atmosphère n'est pas un milieu électrolytique continu. Les surfaces exposées à l'atmosphère sont protégées par un revêtement anticorrosion.

Les deux procédés de protection cathodique (par anodes galvaniques ou par courant imposé) offrent le même niveau de protection dès lors que l'intensité de courant délivrée est suffisante vis-à-vis de la surface à protéger et que la surface d'un alliage métallique est maintenue en permanence au potentiel d'immunité, y compris lors des variations des paramètres du milieu électrolytique (salinité, oxygène dissous, température, activité bactérienne(notamment BTR et BSR)).

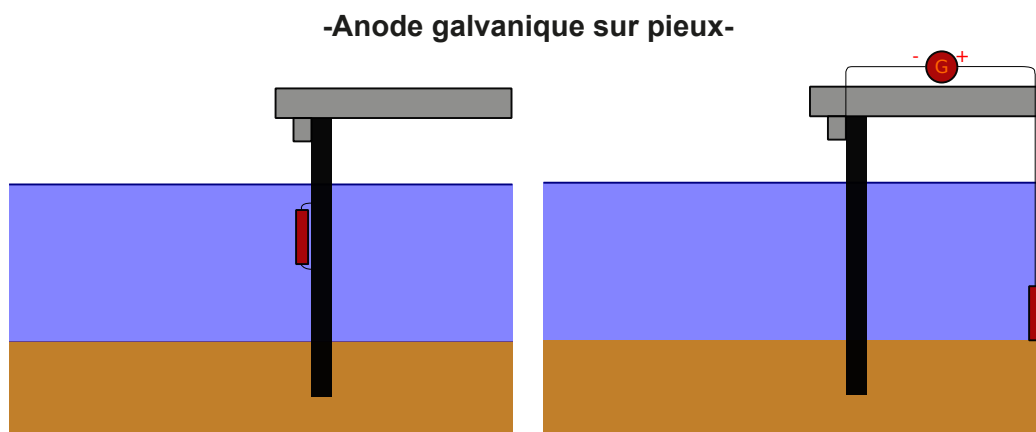


Figure III.3.2 - Dispositifs de protection cathodique par anodes sacrificielles (gauche) et par courant imposé (droite)

Pour plus de précisions concernant ce système de protection, il est recommandé la lecture de l'ouvrage *Prévention et lutte contre la corrosion* de Bernard Normand, Nadine Pébère, Caroline Richard, Martine Wery, eds, chapitre 13 - La protection électrochimique : Protection cathodique et passivation anodique. De plus, la norme *NF EN 12473 de mars 2014 - Principes généraux de la protection cathodique en eau de mer* apporte des informations utiles pour le cas de protections de structures portuaires et maritimes.

3.2 Paramètres du milieu à maîtriser ou à surveiller

3.2.1 Potentiels et électrodes de référence

Un métal placé dans un milieu électrolytique se polarise spontanément par rapport à celui-ci et prend un potentiel. La différence entre celui-ci et le potentiel connu d'une électrode de référence donne la valeur du potentiel d'abandon ou potentiel de corrosion libre d'un alliage métallique. Ce potentiel dépend de différents paramètres comme l'état de surface d'un alliage métallique ou les caractéristiques physico-chimiques de l'électrolyte.

Les variations du potentiel de corrosion d'une structure métallique résultent de l'existence d'hétérogénéités quelles qu'elles soient (état de surface d'un alliage métallique, milieu en contact, paramètres physico-chimiques de l'électrolyte).

Lorsqu'un métal est traversé par un courant électrique continu, il se polarise. Si ce potentiel est plus négatif que le potentiel de corrosion libre, il s'agit d'une polarisation cathodique, dans le cas contraire, d'une polarisation anodique.

La corrosion d'une structure est réduite significativement lorsqu'elle est polarisée cathodiquement jusqu'à atteindre le potentiel de protection. Pour chaque couple métal/milieu électrolytique, un critère de protection peut être retenu selon la norme NF EN 12473[4].

En général, les électrodes de référence utilisées sont constituées d'un métal en contact avec une solution saturée en ions du sel du même métal.

L'électrode de référence est adaptée en fonction du milieu pour optimiser sa stabilité et sa sensibilité. Ainsi pour la mesure du potentiel de structures, on utilise couramment les électrodes suivantes :

- argent/chlorure d'argent en milieu d'eau de mer ;
- cuivre/sulfate de cuivre en milieu terre (structures enterrées) ;
- mercure/chlorure de mercure (au calomel saturé) en laboratoire.

Les potentiels mesurés doivent impérativement être donnés en précisant l'électrode de référence utilisée. Ceci permettra une comparaison aisée des relevés d'une campagne à l'autre et de s'assurer de la fiabilité des mesures.

Tableau 3.1 - Recommandation de potentiels de protection d'après la norme NF EN 12473 pour la protection cathodique de différents matériaux en eau de mer

Matériau	Potentiel de protection	Potentiel maximum
	(mV/AgAgCl/eau de mer)	
Fer et acier aérobie	-800	-1100
Fer et acier anaérobie	-900	-1100
Acier à haute résistance	-800	-950
Alliages d'aluminium	-800	-1100
Acier inoxydable austénitique	-300 à -600	Pas de limite
Alliage cuivreux : sans aluminium avec aluminium	-450 à -600	Pas de limite
	-405 à -600	-1100
Bases nickel	-200	Éviter les potentiels trop négatif

Les normes suivantes peuvent compléter utilement les informations présentes dans ce paragraphe :

- Norme NF EN 12443 - *Principes généraux de la protection cathodique en eau de mer* ;
- Norme NF EN 13173 - *Protection cathodique des installations portuaires*.

3.2.2 Facteurs à prendre en compte pour la conception de la protection

De nombreux paramètres influencent l'amorçage, la cinétique, l'étendue et l'intensité de la corrosion et par là même la réaction électrochimique. Les principaux facteurs sont les suivants :

- la teneur en oxygène dissous ;
- la salinité (teneur en NaCl) ;
- la concentration des sels dissous (favorisant la conductivité du milieu) ;
- toute hétérogénéité dans le milieu électrolytique en contact (aération différentielle, concentration en sel) ou sur la même structure (qualité métallurgique, état de surface) : il est courant de rencontrer des structures fortement corrodées à la limite de zones avec présence d'aération différentielle (marnage et basses eaux) :
 - des eaux de qualités différentes (mélange d'eau douce et d'eau de mer en estuaire ou en bord de ports de plaisance) ;
 - des assemblages (soudure ou boulonnage) de métaux de natures différentes, le moins noble se comporte comme une anode et se dissout plus ou moins rapidement selon le rapport des surfaces cathode/anode ;
 - des hétérogénéités d'état de surface tel que palplanches battues avec présence de calamines, ou surfaces soumises à des chocs (enrochements en protection de talus en contact avec des pieux, navires à l'accostage, embâcles et autres flottants) qui provoquent des éraflures et créent ainsi des zones anodiques ;
 - des sorties d'émissaires et rejets d'eaux polluées pouvant acidifier localement le milieu et provoquer des corrosions localisées ;
 - des retombées de matières organiques en bas de quais de transbordement de vrac (céréales, engrais et autres composants organiques) pouvant favoriser une activité bactérienne intense et développer des corrosions localisées par bio détérioration (avec présence de BTR et BSR).

Quel que soit le type de protection utilisé (par anode sacrificielle ou par courant imposé), la conception, la mise en place et la maintenance nécessitent l'intervention exclusive de spécialistes tout au long du projet (N1, N2 et N3 selon CEFRA-CERTIFICATION ou équivalent).

Lors de la conception, le N3 apportera la solution la mieux adaptée aux besoins du client. Le N2 quant à lui garantira la bonne exécution de l'installation du système de protection qui sera réalisée par des N1. Les N1 seront chargés de réaliser une mise en place conforme aux plans établis et, éventuellement, d'apporter des correctifs exigés par les conditions de site ou de chantier.

3.3 Protection par anodes galvaniques

Les anodes galvaniques se sacrifient par dissolution dans l'eau de mer au profit d'un alliage métallique à protéger en apportant les électrons nécessaires à la constitution d'une barrière de potentiel suffisante. Ce système s'autorégule et ne nécessite aucune intervention extérieure. Seules la qualité des anodes, leur positionnement et leur masse, déterminent le potentiel atteint par la structure associée dans un milieu donné.

Les anodes seront caractérisées par leur composition (essentiellement un métal ou un alliage plus électronégatif que celui de la structure à protéger), leurs dimensions et leur forme géométrique, et par la qualité du contact avec l'insert qui sera relié (mécaniquement et électriquement) à la structure.

3.3.1 Conception d'une protection par anodes galvaniques

La protection par anodes galvaniques se révélera efficace si la conception, qui implique le choix des anodes, le dimensionnement et le positionnement vis-à-vis de la structure à protéger, est correctement menée.

Elle doit intégrer les paramètres du milieu en contact, ceux de la structure à protéger (la forme, le matériau constitutif et le mode de fonctionnement) et les éléments suivants :

- la qualité des anodes en termes de capacité en courant ;
- le potentiel obtenu par la structure en eau de mer (électrode de référence Ag/AgCl) ;
- la forme et les dimensions des anodes appropriées à la structure et à une meilleure distribution des courants ;
- la disposition des inserts et leur bonne adhérence à l'alliage ;
- la fixation à la structure pour assurer la bonne connexion électrique et la bonne résistance mécanique afin d'éviter toute rupture avant la fin de vie ;
- la répartition spatiale des anodes pour assurer des recouvrements corrects, en évitant les potentiels élevés et en éliminant les zones d'ombre (potentiel bas) ;
- la masse de l'anode qui peut assurer un débit pour une durée donnée en fonction de la capacité en courant (Ah/kg).

Les métaux et alliages généralement utilisés pour des structures en mer sont :

1. L'alliage d'aluminium activé à l'indium dont le potentiel est de -1150 mV sans débit ou -1050 mV en débit. La capacité de courant est de 2570 à 2680 Ah/kg et a une densité de $2,73$ kg/dm³.
2. L'alliage de zinc dont le potentiel est de -1150 mV sans débit ou -1050 mV en débit. La capacité de courant est de 780 à 800 Ah/kg et a une densité de $7,15$ kg/dm³.
3. Le magnésium, employé temporairement pour son potentiel plus élevé (favorisant une polarisation rapide) en période de maintenance ou d'intervention provisoire.

L'alliage d'aluminium activé à l'indium reste le matériau le plus fréquemment utilisé pour sa capacité et sa légèreté.

La norme NF EN 12496 - Anodes galvaniques pour la protection cathodique dans l'eau de mer précise les réglementations à respecter pour les anodes et leurs potentiels.

3.3.2 Recommandation pour une bonne installation

Il est recommandé de fixer les anodes à des cotes d'immersion permanente afin de faciliter la dissolution des produits de corrosion. Dans le cas contraire, la formation de ces produits limiterait le débit en courant et perturberait le fonctionnement de la protection (l'anode qui se dissout est un bon signe de débit).

Dans le projet d'installation d'une protection par anodes galvaniques il convient de fixer quelques points d'arrêt pour réaliser des contrôles liés.

- Concernant les approvisionnements en anodes, il convient de contrôler :
 - la qualité de l'alliage (composition, fabrication et performances électrochimiques) en exigeant une traçabilité pour chaque lot d'anodes ;
 - la préparation et le soin apporté aux inserts avant moulage ainsi que l'adhérence à l'alliage (vérification par contrôle destructif sur échantillons de 1 % selon les normes) ;
 - la présence éventuelle (contrôle visuel) de fissures profondes ou de défauts inquiétants pour le bon fonctionnement de l'anode (débit, fixation et durée de vie) ;
 - la forme qui doit être la mieux adaptée à la structure pour recouvrir efficacement la surface à protéger ainsi que la répartition des anodes, en hauteur, sous la ligne des basses eaux, et en profil longitudinal de la structure (sans créer de zones de sur-protection ou d'absence de protection).

- Concernant les assemblages des anodes à la structure, il convient de prendre en compte les critères suivants :
 - points de fixation solides et insensibles aux actions mécaniques et hydrauliques (chocs, houle, courant et remous), en évitant les zones de chocs avec navires ou embâcles et flottants et en consolidant les attaches (un boulonnage est préférable) ;
 - connexions électriques à la structure (éventuellement point de soudure en complément du boulonnage) ;
 - positionnement à des cotes de fixation en immersion permanente.
- Il convient d'effectuer des tests de débit et de potentiel électrochimique avec possibilité d'isolation des surfaces des anodes en vis-à-vis proche de la structure ;
- Il est nécessaire de contrôler les continuités électriques des parties à protéger et aux isolations des parties hors zone de protection recherchée.

3.3.3 Débit des anodes galvaniques

Le dimensionnement des anodes galvaniques et le choix de leur répartition requièrent la connaissance des caractéristiques chimiques du milieu, de la géométrie de la structure et des contraintes d'exploitation et de maintenance. Le dimensionnement consiste à calculer la masse d'anodes nécessaires pour assurer la protection d'une surface développée de la structure et leur positionnement pour obtenir le potentiel d'immunité de la structure.

La surface développée de la structure à protéger (S en m^2) permettra de déterminer pour une densité de courant requise (J en mA/m^2 qui dépend de la zone d'exposition) un courant total (I en A). Avec la durée de vie donnée (D en h), la quantité de courant à fournir (Q en Ah) permettra, à partir de la capacité en courant du type d'anode choisi (c en Ah/kg), de déterminer la masse totale utile. On applique un coefficient d'utilisation (85 à 90 %) pour obtenir la masse réelle utile. Ce coefficient compense l'affaiblissement du débit de l'anode en fin de vie, suite à sa dissolution.

La répartition de la masse totale se fera selon les sites en plusieurs unités couvrant une surface dédiée à chacune avec des recouvrements par chevauchement des champs électriques propre à chacune des anodes. Le choix de la masse unitaire est fonction de la géométrie de la surface à protéger, de l'encombrement autorisé et de la facilité de manipulation des anodes par les plongeurs. Une répartition sur plusieurs anodes de faibles masses nécessiterait un grand nombre d'opérations par les plongeurs et des points de fixation multiples entraînant des surcoûts. Un faible nombre d'anodes de grandes masses peut s'avérer peu efficace en recouvrement de surfaces avec le potentiel requis et par ailleurs fort encombrant et pénible à manipuler par les plongeurs. Un compromis doit donc être recherché entre encombrement, efficacité de recouvrement et facilité de manipulation et de fixation en plongée.

Une installation réussie nécessitera peu de maintenance durant la durée de vie fixée pour les anodes mais devra quand même faire l'objet d'une surveillance annuelle ayant pour objet la constatation de la présence de toutes les anodes débitantes. En fin de vie une installation à l'identique ou améliorée sera réalisée.

Le courant débité par une anode dépendra du potentiel requis (E_c) atteint par la structure ou cathode (c), du potentiel de l'anode (E_a) et de la résistance de contact anode/électrolyte (R). La loi d'Ohm s'écrit :

$$(E_c - E_a) = RI \quad (3.1)$$

avec :

- E_c (V) : potentiel de la structure, qui risque de varier avec les marées et la température de l'eau et qui va diminuer au fur et mesure que la structure se polarise. Le courant débité va décroître (autorégulation de l'anode) ;
- E_a (V) : potentiel de l'anode en position de débit qui peut varier dans le temps avec les variations du milieu ou à cause de la passivation partielle ou totale après dépôt de produits de corrosion (ceci dépend de la qualité des anodes et de leur exposition à l'air) ;
- R (Ω) : la résistance du milieu qui dépendra de la résistivité de l'eau (par exemple : $\rho = 33 \text{ Ohm.cm}$ pour une salinité de 25 g/l à 12°C) et de la surface de contact de l'anode avec le milieu électrolytique. Au fur et à mesure de la dissolution de l'anode, cette résistance va diminuer. Aussi le rapport surface/volume de l'anode doit être minimal au départ.

Des formules empiriques ont été établies selon les formes des anodes et sont prises en compte dans les normes et cahiers de recommandation type DNV ou NACE.

3.4 Protection par courant imposé

La protection contre la corrosion par abaissement de potentiel (accumulation de charges négatives pour la barrière de potentiel dans le métal à protéger) nécessite une connexion de la structure à une source d'énergie électrique. Un courant continu obtenu par redressement du courant alternatif sera utilisé en connectant la polarité négative à la structure et la polarité positive à une anode immergée dans le même milieu électrolytique que celui de la structure à protéger. Cette anode non ou très peu soluble est appelée déversoir (car elle sert à disperser les ions dans le milieu).

Ce procédé consomme de l'énergie à partir du réseau public et requiert des coffrets avec un générateur-redresseur dimensionné convenablement pour porter le potentiel de la structure à un potentiel d'immunité.

L'efficacité en termes de protection contre la corrosion est strictement identique à celle obtenue par anodes galvaniques dimensionnées pour le même potentiel de protection.

La densité de courant requise par une surface peut être asservie au potentiel atteint permettant ainsi de réaliser une protection parfaitement efficace et peu énergivore. C'est une souplesse qui tient compte des modifications du milieu électrolytique (température, houle et aération, pollution). Cette option n'est pas réalisable avec un système à anodes galvaniques.

Les anodes utilisées dans ce système sont de type graphite, ferro-silicium, niobium platiné ou titane platiné. Elles sont très peu encombrantes et leur durée de vie est longue. Le générateur-redresseur peut nécessiter des opérations de maintenance liées notamment au fonctionnement de ses composants. Une maintenance et une surveillance plus régulières sont donc requises pour ce type d'installation, qui nécessite la compétence d'électriciens formés et de préférence certifiés en rapport avec la protection cathodique.

La disposition des déversoirs peut s'avérer encombrante pour les quais compte tenu de l'éloignement nécessaire vis-à-vis de la structure afin de permettre un bon recouvrement des surfaces à protéger.

L'espace ouvert à la navigation, aux accostages et aux autres manœuvres de navires peut se situer dans la zone séparant les anodes de la structure métallique du quai et provoquer une exposition aux lignes de courant de la structure métallique des navires, ce qui entraînera une augmentation du débit et une probable corrosion de zones anodiques (sorties de lignes de courant) pour des expositions prolongées. Le bilan global des deux systèmes reste peu différent sinon par la qualité des interventions requises durant la première installation ou au renouvellement de l'installation.

3.5 Comparaison des deux systèmes

Ci-dessous est proposé un tableau rendant compte d'une comparaison entre les systèmes de protection cathodique par courant imposé et ceux par anodes cathodiques. Ce tableau a pour but d'offrir un aperçu synthétique des avantages et inconvénient de chaque technique en fonction de paramètres types tels que la surface à protéger, le milieu dans lequel se fait la protection ou encore les besoins de maintenance.

Tableau 3.2 Comparaison des systèmes de protection cathodique - crédit : cours de certification N2 MER - Marcel Roche et Retour d'expérience (Brahim Benaïssa)

	Protection par anodes galvaniques	Protection par courant imposé
Mise en oeuvre et installation (compétence)	Fixation des anodes sur la structure (plongeurs)	Installation électrique et connexions à la structures et aux anodes (spécialisée)
Énergie à courant continu	Anodes galvaniques (massives)	Générateur relié à un réseau de distribution électrique
Distribution du courant sur la structure	Homogène (isolation/surface en vis à vis)	Hétérogène (rechercher position des anodes)
Grandes surfaces métalliques à protéger	Surcharge en poids ou en nombre	Positionnement et nombre d'anode
Milieu (résistivité ou salinité)	Non envisageable en eau à très grande résistivité (5000 Ohm/cm)	Adaptable avec choix d'anodes et densité
Débit des anodes	Faible auto réglable selon milieu	Élevé et réglable en fonction du milieu
Nombre d'anodes	Faible mais massive ou élevé et légère	Faible
Flexibilité avec variation de courant	Aucune	Possible
Influence sur autres structures métalliques	Aucune en absence de connexion	Forte dans le champ entre anodes et structures protégées
Risque de sur-protection	Nul sauf avec anode au magnésium	Probable si mauvais réglage
Risque à la personne	Aucun	Possible si tension anode élevé
Maintenance et surveillance Requise	10 à 15 ans + renouvellement à l'identique avant consommation presque totale du métal anodique	15 à 20 ans + entretien et remplacement composants électriques (5 à 10 ans) et des masses anodiques

Pour comparer les deux systèmes, il faut intégrer :

- l'opération de renouvellement des anodes (cas d'anodes galvaniques) ou de simple remplacement de composants électroniques (cas du courant imposé) ;
- les conditions de surveillance et de maintenance fréquentes :
 - surveillance régulière pour le courant imposé (présence de tension et courant à surveiller au moins hebdomadairement) ;
 - surveillance très étalée dans le temps pour les anodes galvaniques (présence des anodes sur leurs suspentes ou fixations) ;
- l'encombrement et la surcharge des structures des quais par les suspentes, le nombre, le volume et la masse des anodes galvaniques ;
- l'encombrement, la distribution et le positionnement des câbles de connexion, des anodes déversoirs éloignées des quais et des coffrets d'alimentation positionnés sur les quais.

3.6 Maintenance du système de protection

La maintenance du système de protection comprend :

1. La surveillance de la présence permanente de la source de courant :
 - s'assurer des fixations des anodes galvaniques et des connexions électriques avec la structure et vérifier l'état de surface et le volume des anodes qui doivent en principe diminuer avec la durée (un bon fonctionnement passe par la dissolution des anodes) ;
 - vérifier la présence de tension et de courant en sortie du générateur-redresseur en s'assurant des bonnes connexions électriques entre le générateur-redresseur et les anodes d'une part et la structure d'autre part ;
 - s'assurer de la continuité électrique de toutes les parties métalliques à protéger pour éviter la corrosion de celles qui ne sont pas reliées à la source et isoler celles qui sont à exclure du champ de protection sous peine de surconsommation.
2. La vérification de l'état de protection de la structure :
 - détecter les zones de corrosion et de non protection éventuellement par inspection visuelle ;
 - mesurer les niveaux de potentiel atteints par la structure selon un échantillonnage bien réparti en hauteur sous l'eau et en profil longitudinal en s'assurant de détecter les zones d'ombre pour apporter une correction dans la disposition des anodes.
3. Le remplacement et la mise à niveau de la source :
 - cas des anodes galvaniques : en fin de vie (durée de vie fixée lors de la conception pour déterminer les masses installées), renouveler à l'identique ou avec amélioration de la quantité, de la qualité et de la répartition (optimisation des consommations et adaptation aux modifications de la structure éventuellement) ;
 - cas du courant imposé : remplacement des composants électroniques en fin de vie et vérification des anodes (généralement peu solubles).

3.7 Retour d'expérience

Le système de protection cathodique de loin le plus employé dans les ports est le système par anodes galvaniques. Celui-ci est retenu essentiellement pour sa mise en œuvre, l'encombrement réduit au plus près des quais et surtout l'absence d'une surveillance et d'une maintenance fréquentes.

Sur le plan de leur efficacité, les deux systèmes permettent, une fois les règles de l'art respectées, l'obtention des mêmes résultats.

Densités de courant recommandées

En France, les densités de courant pratiquées restent limitées à des valeurs se situant dans les plages suivantes : 80 à 100 mA/m² pour la zone d'immersion et 20 à 30 mA/m² pour la zone de fiche.

Ces valeurs de protection par les anodes galvaniques peuvent être considérées par limites supérieures par mesure de précaution (courant fourni non réglable). En courant imposé, le réglage est toujours possible pour adapter l'intensité selon la demande, à condition de disposer d'un générateur-redresseur avec une puissance suffisante. Le générateur-redresseur doit donc également être dimensionné à l'aide des valeurs supérieures.

4. AUTRES TECHNIQUES DE PROTECTION

Dans certains cas de construction en bord de mer ou en milieu aquatique, le recours à l'assemblage de métaux différents est nécessaire pour des raisons de solidité (fixations et ancrages), de mise en place d'une chaîne cinématique (brimbales, crémaillère et autres arbres ou liaisons mécaniques) ou de supports de connexions électriques entre structures métalliques adjacentes ou voisines. Dans ces cas, la protection contre la corrosion nécessite un soin particulier ou l'emploi de pièces spécifiques avec une protection par métallisation (tiges de vérins chromées, gardes-corps en acier galvanisé, tiges d'ancrage traitées).

La réalisation de pièces ou structures traitées en surface constitue un assemblage bimétallique. Ce traitement consiste à recouvrir le métal principal (structure à protéger) d'un dépôt métallique servant de protecteur par isolation du milieu ou par effet anodique.

Comme exemple courant, citons l'acier blanc obtenu par étamage ou dépôt d'une fine couche d'étain (Sn) sur l'acier pour éviter la corrosion des emballages en acier des aliments. Pour les structures d'ouvrages en milieu aquatique, c'est l'usage de l'acier zingué (terme générique qui comprend plusieurs procédés de dépôt de zinc à la surface de l'acier) qui est répandu.

Tableau 4.1 - Comparaison des systèmes de protection cathodique - crédit : cours de certification N2 MER - Marcel Roche et Retour d'expérience (Brahim Benaïssa)

Or, Platine	Argent	Brasure argent	Cuivre laiton	Brasure Pb /Sn	Acier inox 18/8	Fonte	Acier doux	Alu	Zinc	Magnésium
Au	Ag		Cu		Fe+Cr+Ni		Fe+Cr	Al	Zn	Mg

Les métaux sont caractérisés par un potentiel électrochimique propre qui se mesure par création d'une demi-pile composée d'un alliage métallique plongé dans une solution d'un de ses sels ($Ag/AgCl$, $Cu/CuSO_4$). L'association de deux métaux différents plongés dans le même électrolyte (eau de mer) forme un couple galvanique qui va entraîner la corrosion d'un alliage métallique le moins noble (ci-dessous une échelle allant du plus noble au plus vil). Il est recommandé de ne pas dépasser une différence de potentiel de 850 mV.

4.1 Revêtement métallique

La métallisation consiste à déposer sur un substrat métallique (partie de la structure ou pièce mécanique) une fine couche, de 2 à 120 μm , de métal différent pour une protection contre la corrosion par isolation du milieu électrolytique.

Ceci implique un recouvrement de surface parfait, sans porosité ni fissures ni autres déchirures.

Plusieurs procédés sont utilisés dans la réalisation d'un dépôt de surface. Parmi ceux qui entrent dans la réalisation des structures métalliques ou pièces mécaniques pour les ouvrages maritimes ou fluviaux, l'acier galvanisé est le plus répandu.

Il est important de souligner la particularité du procédé de déposition de zinc, afin d'éviter des erreurs constructives ou des mauvais choix de matériaux requis selon les applications et le milieu environnant.

Les procédés de zingage sont multiples et produisent des dépôts différents en épaisseur, homogénéité et efficacité dans la passivation.

Le traitement de surface recherché doit entraîner la formation d'un revêtement métallique de zinc sur toute la surface sans aucune porosité ni défaut de surface (éraflures, poinçonnages ou autres déchirures de la pellicule de protection) entraînant le contact de l'acier avec l'électrolyte.

Le procédé de traitement de surface se réalise par l'une des opérations suivantes :

- immersion de la pièce dans un bain de métal en fusion. Le dépôt d'une couche de zinc comprenant une couche superficielle d'oxyde de zinc recouvre l'acier et le produit est un acier galvanisé ;
- déposition électrolytique de zinc. Les produits ainsi revêtus sont appelés produits électro-zingués ;
- dépôt thermochimique de diffusion superficielle de zinc dans l'acier (appelé shérardisation) ;
- projection à chaud : recouvrement par projection de zinc fondu au pistolet. Les produits ainsi revêtus sont appelés métallisés au zinc ;
- application de peintures contenant de la poudre ou poussière de zinc. Le terme correspondant à ce procédé est peinture métallique au zinc ou peinture métallique riche en zinc pour éviter toute confusion avec les procédés de galvanisation, projection à chaud, dépôt électrolytique ou application thermochimique (shérardisation).

Seule la galvanisation peut offrir le maximum de recouvrement et permettre une bonne protection par la couche de zinc servant d'anode en cas de rupture d'isolation et ceci pour des applications en milieu aquatique.

En milieu aérien, la peinture riche en zinc peut suffire à protéger efficacement les structures.

Le dépôt électrolytique est souvent appliqué sur des pièces métalliques appelées à être peintes une fois mises en place (structures métalliques fluviales ou maritimes de type vannes d'aqueducs, clapets de barrages, portes d'écluses).

4.2 Combinaison protection cathodique et peinture ou revêtement

La protection contre la corrosion est souvent réalisée par l'un ou l'autre des deux principaux systèmes présentés ci-avant.

La protection par séparation physique entre la surface métallique de la structure concernée et le milieu électrolytique est réalisée par application d'un système de peintures multicouche.

Les objectifs principaux sont d'éviter une grande porosité du système et de garantir une bonne adhérence au substrat (soin dans la préparation de surface et respect des conditions d'application du système choisi).

Les conditions d'application en plusieurs couches et avec un temps de recouvrement requis selon la nature du produit à appliquer excluent la mise en peinture en présence d'eau (immersion et zones de marnage, sauf à mettre à sec la structure).

La protection cathodique exige la présence d'électrolyte au contact de la surface à protéger. Ce système s'applique aux zones de fiche, d'immersion et de contact avec des remblais humides.

La zone de marnage nécessite la mise en œuvre des deux systèmes pour assurer une protection cathodique jusqu'à marée haute en présence d'eau et une protection par isolation sur les parties accessibles jusqu'à marée basse. La durée d'application doit rester inférieure au temps de recouvrement requis pour la mise en œuvre des différentes couches. La préférence va au choix d'un système basé sur un produit pouvant s'appliquer mouillé sur mouillé. L'expérience réussie du chantier de mise en peinture des pieux métalliques du port de Brest est à retenir.

La mise en place d'un système de protection cathodique viendra compléter le système de peinture en assurant le recouvrement et la protection pour la partie basse (où l'application peut s'avérer difficile ou incomplète) et les parties subissant des dégradations (chocs des flottants, frottements et abrasion).



Figure III.4.1 - Pieux peints sur la partie accessible à marée basse - première et deuxième couches

Le risque de décollement du système de peinture est réel si l'adhérence est défaillante ou si des blessures importantes apparaissent. En effet la protection cathodique tend à provoquer un dépôt calco-magnésien qui favorise le milieu alcalin. Cette alcalinité est préjudiciable à l'adhérence sur acier du système de peinture.

Les bons résultats enregistrés aux ports de Boulogne-sur-Mer et à Brest sont essentiellement dus à un choix approprié des produits, ainsi qu'au soin apporté à l'application du système de peinture d'une part, et au positionnement et au dimensionnement de la protection cathodique d'autre part.

4.3 Association de métaux et méthode de protection

Dans le cas de chocs ou d'éraflures sur le matériau métallique, l'étamage ou la galvanisation ne seront pas efficaces, car la couche de recouvrement sera altérée.

La corrosion peut être d'autant plus rapide qu'il y a une différence de potentiel entre les deux métaux et qu'il y a un rapport de surfaces défavorable pour le métal de structure.

Nota bene : le rapport de surfaces est défavorable pour le métal lorsque sa surface d'exposition est nettement inférieure à celle de l'autre métal et que son potentiel le place en tant qu'anode.

En revanche, il n'est pas à craindre une apparition de corrosion dans le cas d'une juxtaposition, sans contact électrique (pas de liaison mécanique ou avec isolant intermédiaire), dans le sol (en fiche) ou dans l'eau de mer, de deux structures métalliques différentes telles que l'acier (palplanches ou poutres en acier) et l'aluminium (échelles ou pontons), même si les deux structures sont proches l'une de l'autre.

Dans le scellement d'une pièce métallique sur une poutre en béton armé, il faut veiller à éviter tout contact électrique (par conséquent mécanique) avec les armatures en acier.

IV. Retour d'expériences

1. REMISE EN ÉTAT DU QUAI DE L'ESCAUT DU PORT DE DUNKERQUE

1.1 Description de l'ouvrage et de son environnement

Affecté à l'exportation des produits sidérurgiques, le quai de l'Escaut assure un trafic de 1,0 à 1,5 Mt par an. Il s'agit donc d'un quai hautement stratégique pour le grand port maritime de Dunkerque (GPMD).

Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

- rideaux de palplanches
- longueur : 650 m
- tirant d'eau : 11,50 m

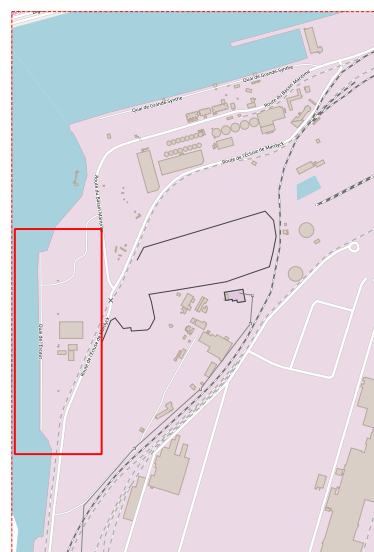


Figure IV.1.1 - Vue générale et implantation du quai de l'Escaut du port de Dunkerque

1.2 Pathologies

Des visites subaquatiques ont mis en évidence de nombreux percements et des pertes d'épaisseur du rideau de palplanches qui n'avait fait l'objet d'aucune protection contre la corrosion depuis sa construction dans les années 1970.

La [figure IV.1.2](#) illustre l'état du rideau avant travaux. Toutefois elle ne montre pas bien la réalité de l'ampleur des dégradations : perte généralisée d'épaisseur moyenne notamment dans la zone de battillage et sous cette zone, nombreux percements...



Figure IV.1.2 - Aspect du rideau avant travaux - quai de l'Escaut du port de Dunkerque

1.3 Diagnostic

Le GPMD s'est fait assister par le CETE Nord Picardie pour préciser le diagnostic, contrôler la capacité de l'ouvrage à reprendre les charges d'exploitation malgré les pertes d'épaisseur enregistrées et élaborer le programme de travaux de remise en état.

En complément des relevés subaquatiques initiaux, les principaux contrôles suivants ont été réalisés pendant la phase de diagnostic :

- contrôle d'épaisseur des tirants ;
- analyse de la nature de l'acier des tirants.

1.4 Choix de la solution

Suite à différentes notes de calcul établies par la société ARCADIS, le CETE Nord-Picardie a conclu en 2007 que l'exploitation du quai pouvait être poursuivie dans les conditions actuelles sous réserve de la mise en œuvre rapide du programme de travaux suivant :

- réparation des palplanches ;
- peinture anticorrosion de la partie émergée ;
- protection par anodes de la partie immergée.

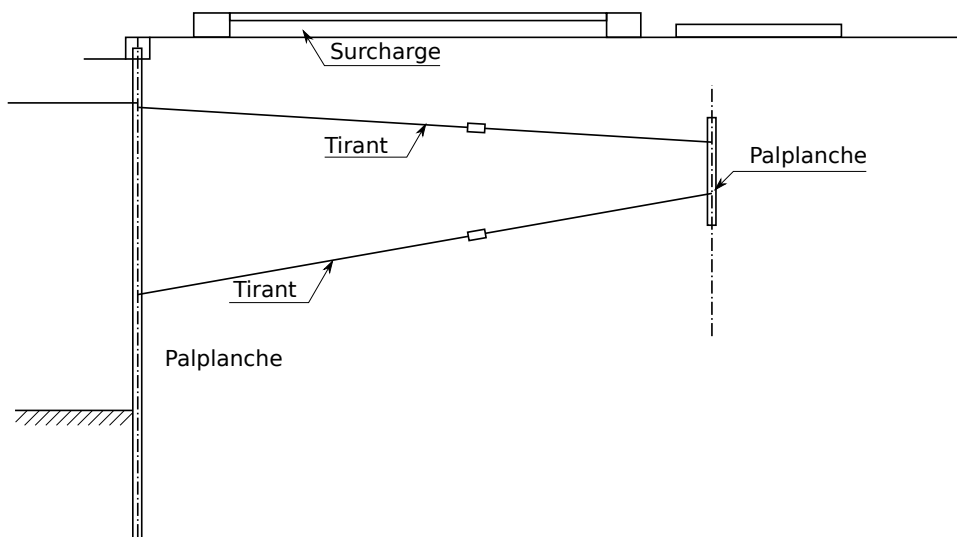


Figure IV.1.3 - Schéma de principe de la réparation - quai de l'Escaut du port de Dunkerque

1.5 Travaux

Les travaux ont été réalisés en trois marchés :

- première phase de travaux de réparation des palplanches et de protection anti-corrosion par peinture de la partie émergée des palplanches en 2008 (montant : 700 000 €) ;
- protection anti-corrosion par anodes sacrificielles de la partie immergée des palplanches en 2008 (montant : 500 000 € pour environ 70 tonnes d'anodes posées) ;
- seconde phase de travaux de réparation des palplanches et de protection anti-corrosion par peinture de la partie émergée des palplanches en 2009 (montant : 700 000 €).

La nécessité de limiter la gêne à l'exploitation pendant les phases de travaux a constitué une des principales contraintes pour l'organisation des travaux sur ce quai.

Les travaux ont été réalisés depuis un ponton où se trouvaient notamment toutes les alimentations nécessaires au chantier, de façon à ce qu'aucun câble ne soit présent sur le quai et limitant ainsi toute gêne d'exploitation durant les travaux.



a) État du rideau après décapage et pose des tôles de renfort



b) Ponton support pour les travaux avec les alimentations nécessaires au chantier

Figure IV.1.4 - Photographies des travaux - quai de l'Escaut du port de Dunkerque

1.6 Contrôle qualité

Le contrôle extérieur a porté sur :

- la mise en œuvre de la peinture de protection anticorrosion (APAVE) ;
- les soudures (Institut de soudure) ;
- la fourniture des anodes sacrificielles.

1.7 Bilan

À l'issue du décapage lors du premier marché de travaux, il est apparu que les dégradations avaient été largement sous-estimées. Pour les réparer, il a été nécessaire de poser 11 tonnes de tôles de réparation, soit environ 3,5 km de soudures, ce qui s'est traduit par des remises en cause des plannings et donc des difficultés pour garantir les conditions d'exploitation du quai.

Lors du second marché, il a pu être tenu compte du niveau de dégradations constaté précédemment et un planning cohérent a été mis en place et a été respecté scrupuleusement (travail par plots de 50 m de quai par semaine).

Ce constat milite pour la réalisation d'un marché test pour des cas similaires : rideau fortement dégradé et très fortes contraintes d'exploitation.

À l'issue de cette opération, le GPMD a déclenché un programme de protection systématique de tous ses quais en palplanches, pour éviter d'atteindre le niveau de dégradation constaté pour le quai de l'Escaut.



Figure IV.1.5 - Vue du rideau de palplanches après travaux - quai de l'Escaut du port de Dunkerque

2. REMISE EN ÉTAT DE L'ÉCLUSE DE WATIER DU PORT DE DUNKERQUE

2.1 Description de l'ouvrage et de son environnement

L'accès au Port est de Dunkerque pour les navires de commerce est assuré par deux écluses maritimes :

- l'écluse De Gaulle
 - longueur : 365 m
 - largeur : 50 m
 - 55 % des sassées
- l'écluse de Watier
 - longueur : 280 m
 - largeur : 40 m
 - 45 % des sassées

Nota bene : une troisième écluse existe, l'écluse Trystram mais celle-ci n'est pratiquement plus utilisée sinon pour la plaisance et les navires de servitude.

L'écluse de Watier a été construite en 1937.

Elle a été partiellement détruite durant la Seconde Guerre mondiale et reconstruite à partir de 1945 :

- environ 40 m de sas sont restés après réparations avec la structure d'origine (rideau de palplanches avec tirants). C'est la partie qui a fait l'objet du programme de réfection ;
- le reste du sas a été reconstruit avec une nouvelle structure en béton armé.

2.2 Pathologies

Les désordres constatés :

- très forte dégradation du parement du rideau de palplanches (présence de nombreux percements) ;
- constat de tassements importants sur le terre-plein arrière.

Les décisions :

- arrêt d'exploitation de l'écluse dans la zone concernée (la longueur admissible des navires dans l'écluse est réduite de 230 à 120 m) dans l'attente de réparations ;
- les études de faisabilité de la réparation des palplanches sont confiées au CETE Nord- Picardie.

2.3 Diagnostic

Le GPMD s'est fait assister par le Cerema Nord Picardie (CETE Nord Picardie) pour préciser le diagnostic et élaborer le programme de travaux de remise en état.

En complément des relevés subaquatiques, les principaux contrôles suivants ont été réalisés pendant la phase de diagnostic :

- contrôle de l'état des tirants supérieurs,
- analyse de la nature de l'acier des palplanches.



Figure IV.2.1 - Vue générale de l'écluse de Watier du port de Dunkerque



Figure IV.2.2 - Vue de l'écluse de Watier à la fin de la seconde guerre mondiale

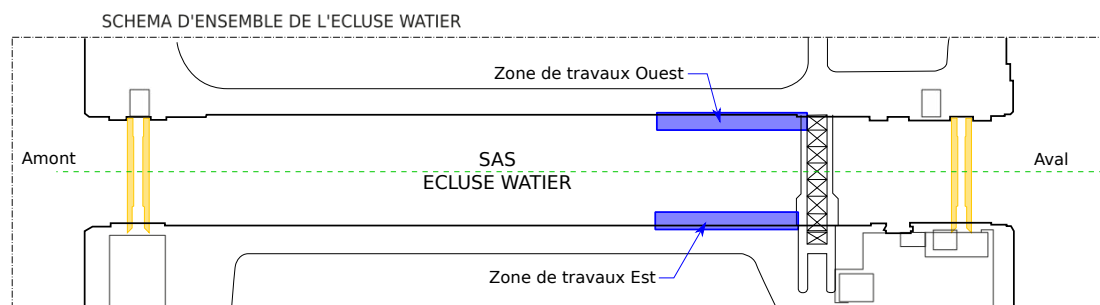


Figure IV.2.3 - Plan de l'écluse de Watier du port de Dunkerque

2.4 Choix de la solution

Dans son rapport de juin 2007, le CETE présentait deux scénarios :

- Scénario 1, Réparation du bajoyer, comprenant les travaux suivants :
 - remplacement des tirants supérieurs, l'étude du Cerema (CETE) ayant mis en évidence que les tirants en place travaillaient au-delà des limites acceptables ;
 - protection par anodes de la partie immergée ;
 - protection par peinture anti-corrosion de la partie émergée du rideau après réparations localisées ;
 - adaptation des défenses du quai pour protéger les navires des nouvelles têtes d'ancrage des tirants supérieurs ;
 - estimation des travaux 1,2 M€.
- Scénario 2, réalisation d'un nouveau rideau de palplanches (rempiètement) :
 - estimation des travaux 3,0 M€.

2.4.1 Choix du scénario

Le GPMD a retenu le scénario 1 de réparation du bajoyer, celui-ci permettant de retrouver une durée d'exploitation importante (20 ans, voire plus) pour un coût 2,5 fois moins important que celui du scénario 2.

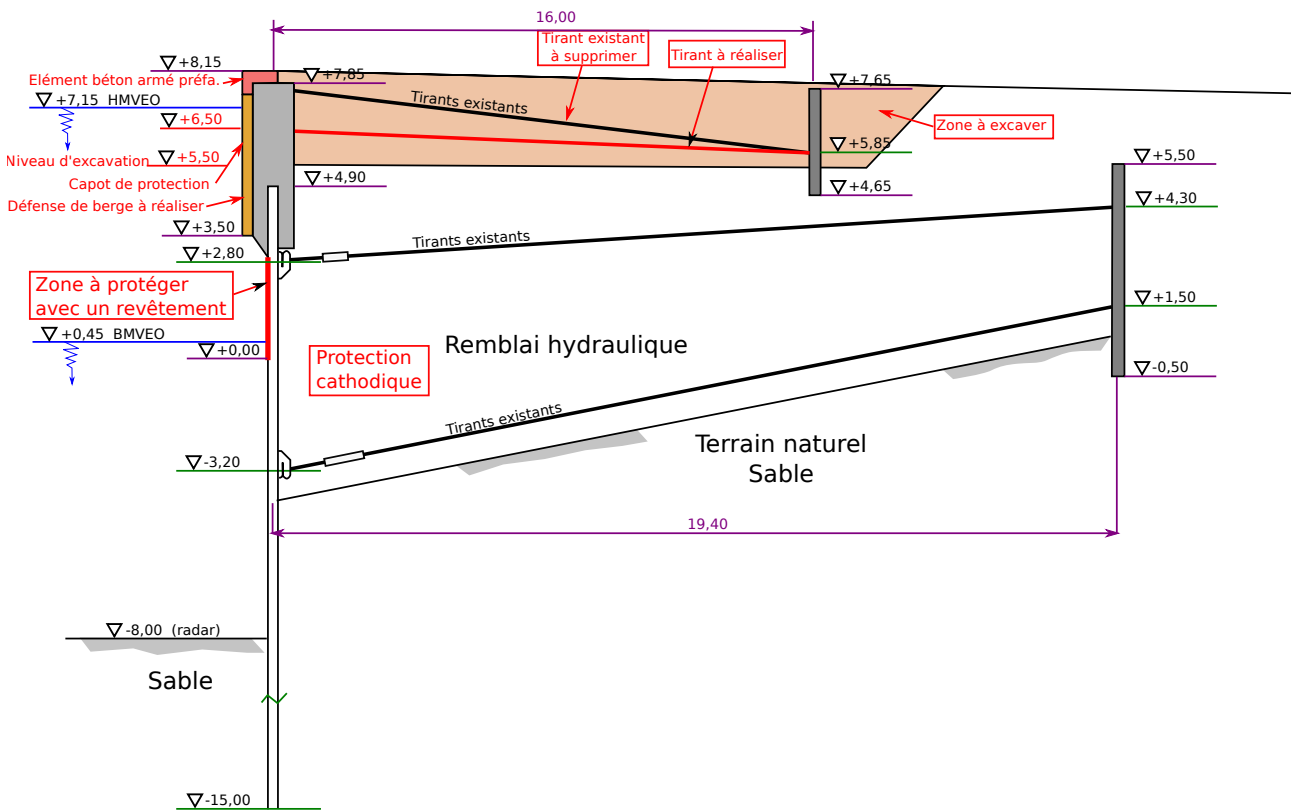


Figure IV.2.4 - Schéma de principe des travaux suivant le scénario 1 - écluse de Watier du port de Dunkerque

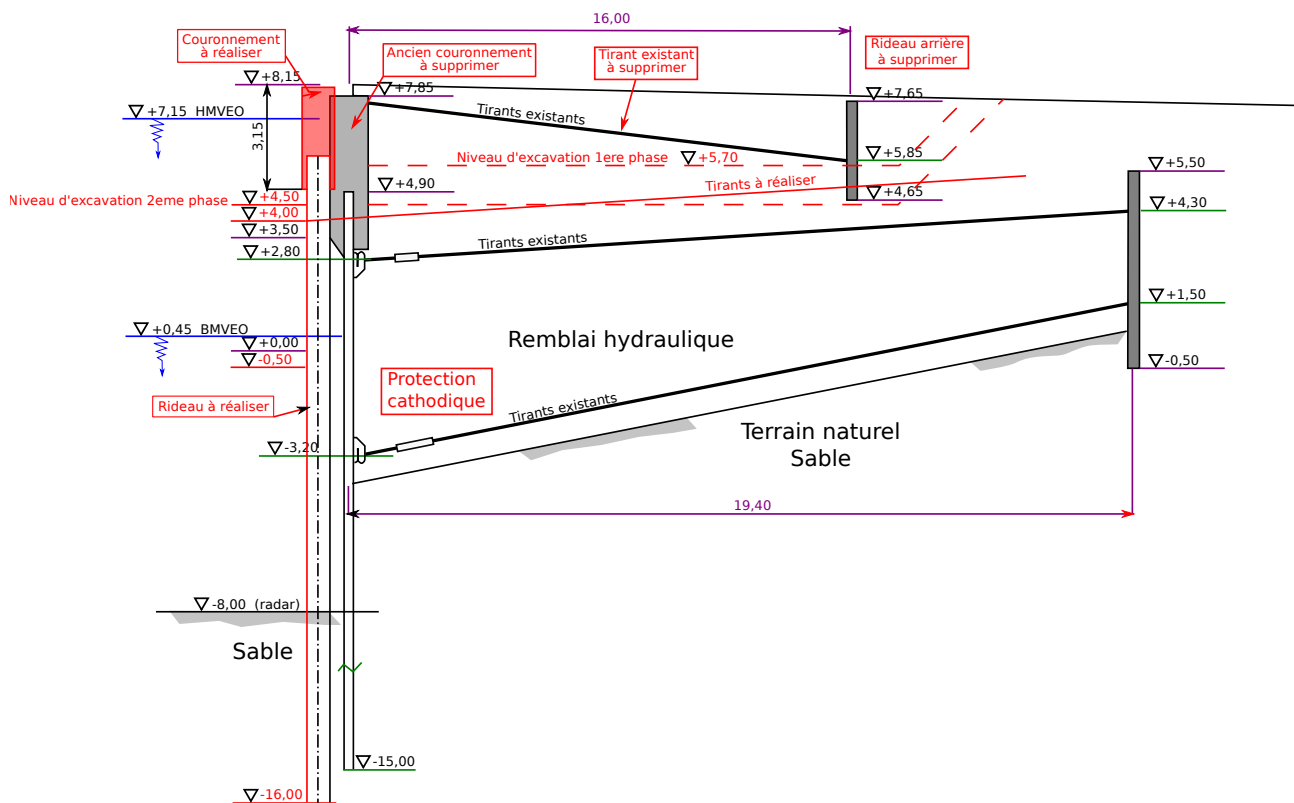


Figure IV.2.5 - Schéma de principe des travaux suivant le scénario 2 - écluse de Watier du port de Dunkerque

2.5 Travaux

Les travaux ont été réalisés en trois marchés :

1. un marché principal comprenant les travaux de remplacement du lit de tirant supérieur et la création d'une lierne de répartition :

Titulaire : SEMEN TP

Montant : 750 000 €

Début des travaux : Septembre 2008

Fin des travaux : Février 2009

Contrôles :

Études d'exécution : CETE

Sécurité : Norisko

Remblais : Arcadis

2. un marché de protection en béton de la partie émergée, cette solution ayant été finalement préférée à la solution de réparation par tôles soudées et peinture anticorrosion, compte tenu des dégradations importantes constatées sur la partie supérieure du rideau de palplanches ;

Titulaire : SPIE

Montant : 250 000 €

Début des travaux : 14 septembre 2009

Délais des travaux : 6 semaines

Contrôles :

Études d'exécution : CETE

Sécurité : DEKRAS

3. un marché de fourniture et pose d'anodes sacrificielles pour protection de la partie immergée des palplanches.

Titulaire : DECO

Montant : 100 000 €

Début des travaux : 14 septembre 2009

Délais des travaux : 6 semaines

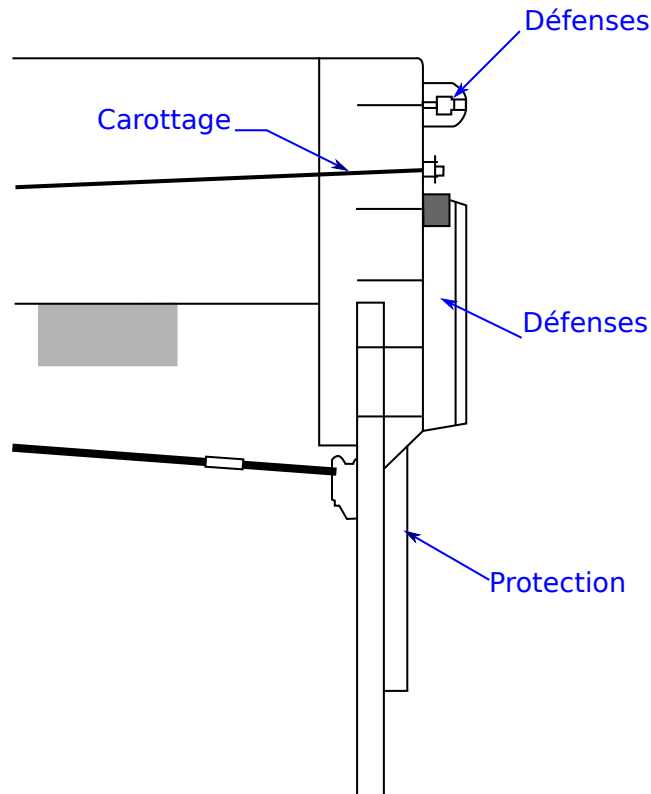


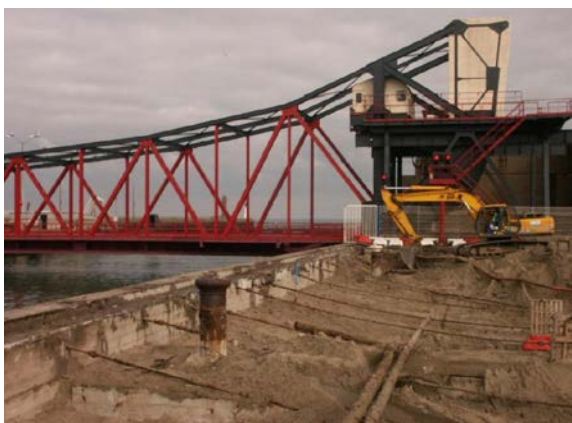
Figure IV.2.6 - Schéma de principe des travaux - écluse de Watier du port de Dunkerque

La figure IV.2.6 présente le schéma de principe des travaux de l'écluse en faisant apparaître :

- la pose du nouveau lit supérieur de tirants et de sa lierne de répartition ;
- la protection en béton de la partie supérieure des palplanches la plus dégradée (hauteur : 2,5 m).

Compte tenu de leur nature, la majorité des travaux a dû être réalisée après consignation totale de l'écluse.

Certaines phases critiques de travaux, comme le remplacement des tirants supérieurs, ont dû être réalisées sous une surveillance renforcée du niveau d'eau dans le sas. En effet, entre le moment où les anciens tirants étaient déposés et le moment où les nouveaux tirants étaient reposés, la stabilité du quai de l'écluse n'était plus assurée quel que soit le niveau dans le sas.



Ancien lit de tirants après terrassement



travaux de terrassement et pose du nouveau lit supérieur



La protection béton de la partie supérieure des palplanches en cours de coulage



Système de protection des têtes de tirants et de la lierne de répartition

Figure IV.2.7 - Photographie des travaux - écluse de Watier du port de Dunkerque

2.6 Contrôle qualité

L'exécution des contrôles qualité est présentée dans les tableaux du paragraphe précédent.

2.7 Bilan

Au-delà de la problématique spécifiquement liée au remplacement du lit supérieur de tirants, cette opération illustre un cas où le niveau de dégradation des palplanches a conduit à préférer une solution de protection en béton (sur la partie la plus dégradée) à une solution traditionnelle de réparation par tôles soudées puis application d'une protection anti-corrosion par peinture.

3. DÉMARCHE INVESTIGATRICE D'IDENTIFICATION DE LA CORROSION DU QUAI DES TELLINES AU PORT DE MARSEILLE-FOS

3.1 Description de l'ouvrage et de son environnement

Le quai des Tellines est situé à Port-Saint-Louis-du-Rhône dans les bassins ouest du port de Marseille-Fos. Ce terminal est dédié au trafic de céréales à proximité de l'embouchure du Rhône en lien avec une forte fréquentation de barges.

Construit en 1975, ses principales caractéristiques sont :

- longueur : 700 m (composés d'un retour ouest de 260 m, d'un retour est de 60 m et d'un quai principal de 380 m)
- hauteur d'eau devant l'ouvrage : -8,50 m (CM)
- type d'ouvrage : gabions de palplanches Rombas 400J fichées à -13,50 m (CM) dans des sables-limoneux.

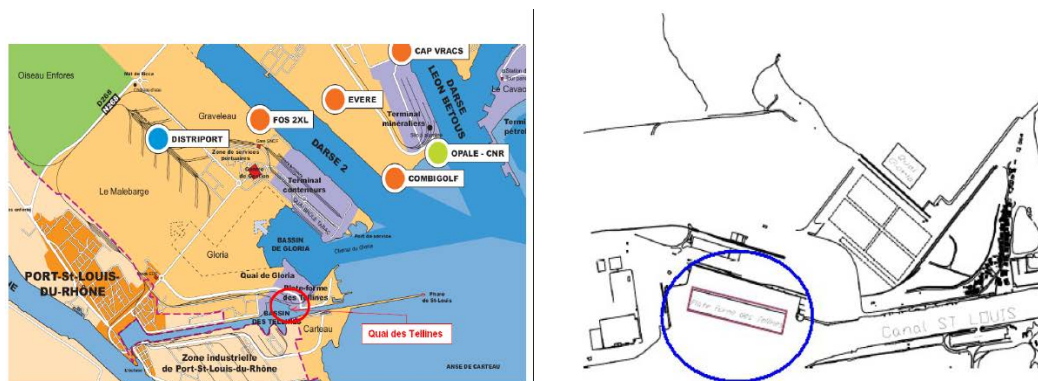


Figure IV.3.1 - Localisation du quai des Tellines du port de Marseille-Fos

3.2 Pathologies

Depuis plusieurs années l'activité de corrosion est plus agressive dans ce lieu que dans les alentours ; le niveau d'attaque de corrosion dans les bassins ouest du port de Marseille-Fos est en effet très faible.

Le rideau de palplanches présente ici une double activité de corrosion :

de type généralisée faible : perte d'épaisseur faible (10 à 20 %) et uniforme sur toute la surface de la structure ;

de type localisée hétérogène importante : forte perte d'épaisseur (50 %) sur des unités circulaires d'une surface de 2 à 3 cm² avec une densité de 6 unités par m de rideau.

La tenue de l'ouvrage n'est pas remise en cause dans l'immédiat et un suivi régulier est mis en œuvre depuis les années 90. Afin d'endiguer le phénomène, il a été décidé en 2011 de mener une campagne d'investigations pour mieux cerner le phénomène. Cette démarche vise à identifier les causes de cette activité si particulière de corrosion pour tenter de trouver la solution la plus adaptée afin de ralentir l'évolution de cette pathologie.

3.2.1 Programme d'investigation

Dans le cadre de sa participation au programme de recherche Corrosion électrochimique maritime – protection cathodique (CEMAR-PC), le GPMM s'est appuyé sur les compétences du groupe de recherche afin de lancer une série d'investigations visant à observer les facteurs environnementaux présents au quai des Tellines.

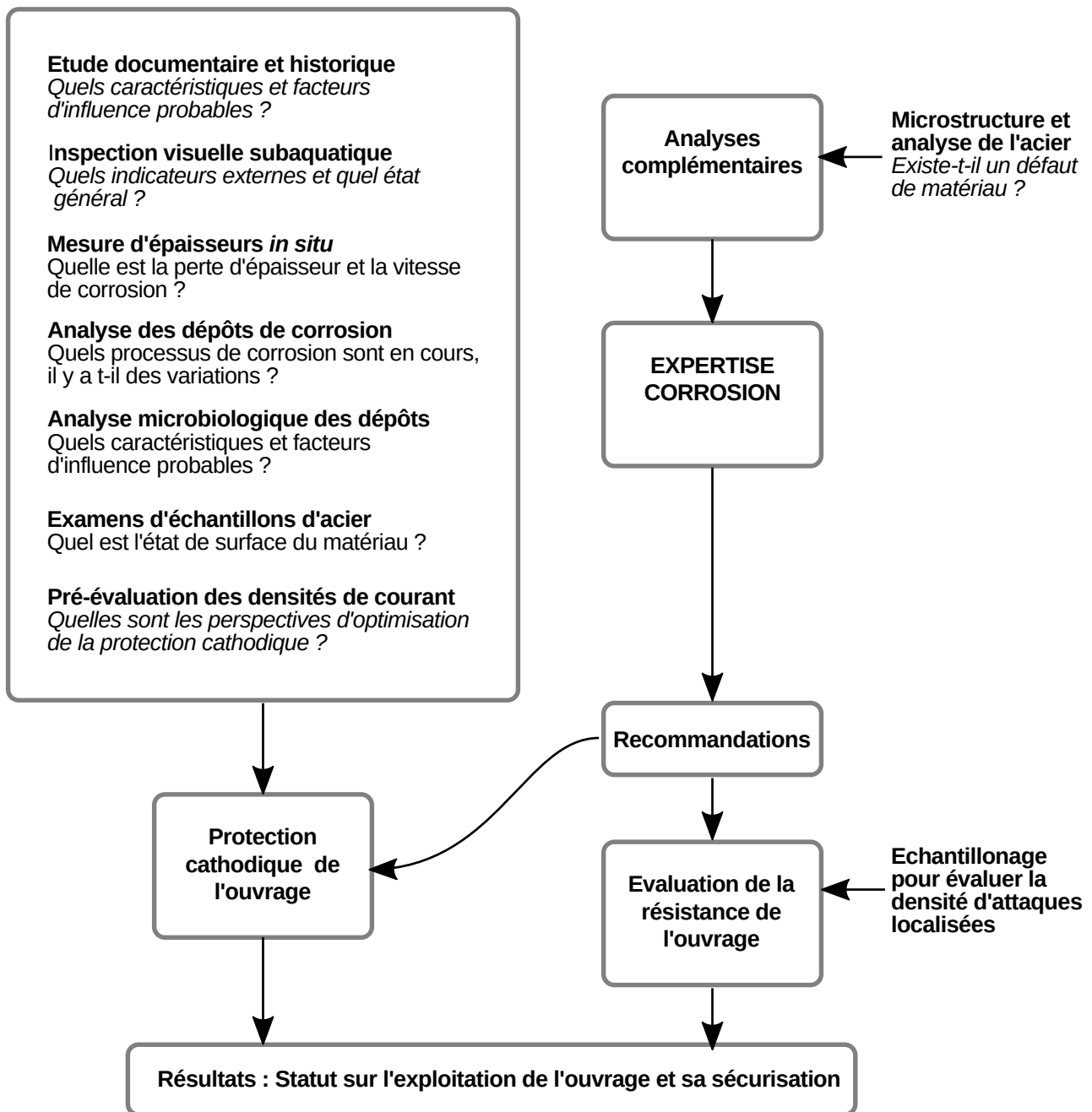


Figure IV.3.2 - Principe de la mission d'investigation - quai des Tellines du port de Marseille-Fos

La figure IV.3.2 schématise le principe de la démarche proposée dans ce programme d'investigation.

La mission d'expertise a mené les actions d'observation suivantes :

- investigation visuelle sur site avec inspection subaquatique, mesures d'épaisseurs résiduelles des palplanches, prélèvements d'échantillons d'acier et prélèvements d'échantillons de dépôts de corrosion ;
- analyses physico-chimiques des dépôts de corrosion ;
- analyses microbiologiques ;
- pré-monitoring électrochimique.

Ces actions avaient pour objectif de :

- évaluer l'état de dégradation des palplanches ;
- définir les processus plausibles ayant conduit à ces dégradations ;
- formaliser les recommandations pour assurer la pérennité de l'ouvrage.

3.3 Diagnostic

Les investigations mises en œuvre, ont permis de dégager le diagnostic suivant :

- Processus de corrosion observés
 - corrosion homogène généralisée électrochimique ;
 - corrosion localisée influencée par les micro-organismes.
- Influence des micro-organismes en lien avec l'activité céréalière (facteur de croissance pour les bactéries) : l'activité de corrosion est toujours influencée par les micro-organismes mais ici les hétérogénéités dans les résultats des analyses microbiologiques (présence d'acide et de soufre) laissent penser que cette influence est importante. Localement les micro-organismes peuvent maintenir des processus anodiques ce qui expliquerait la forte perte d'épaisseur sur des surfaces très réduites.
- Vitesse des processus – stabilisation éventuelle : dans des conditions normales, les processus de corrosion électrochimique tendent à se stabiliser dans le temps ; l'évolution des produits de corrosion va de pair avec la stabilisation de ces processus. Seul un suivi dans le temps de l'évolution des produits de corrosion permettrait de remonter à la cinétique des processus de corrosion et donc de leur stabilisation éventuelle, mais la présence de rouille verte associée à un processus bactérien sulfurogène dans les dépôts prélevés laisse penser que le phénomène est toujours actif.
- Densité de courant : le monitoring électrochimique mis en œuvre très localement sur le site des Tellines (pendant les quelques mois d'hiver qu'a duré l'expertise), et dont le but était de réaliser une étude de faisabilité de la mise en place d'une protection cathodique optimisée a montré des densités de courant faibles sur le site.

3.4 Bilan

En termes d'approfondissement de la connaissance du phénomène, d'autres explications en complément pourraient être recherchées à cette corrosion localisée, comme :

- les caractéristiques du matériau (inclusion et hétérogénéité datant soit de la fabrication soit de la mise en œuvre) ;
- l'influence physico-chimique du milieu avec monitoring in situ aux Tellines et sur d'autres sites à proximité non soumis à ces phénomènes. La moindre agitation de ce bassin peu exposé et la présence d'eau douce du Rhône sont autant d'explications possibles à une différence locale de concentration en oxygène dissous, de salinité, de pH et de température.

En termes de diagnostic structurel, même si la sécurité n'est pas remise en question, une meilleure connaissance de la localisation des attaques (en termes de densité et de perte d'épaisseur) s'avérerait utile pour connaître avec exactitude les limites de robustesse du quai. L'accès à cette connaissance approfondie nécessite l'élaboration au préalable d'un plan d'échantillonnage avec le calculateur (pourcentage de surface investie, zones spécifiques à intégrer dans l'échantillonnage, méthode de décapage, codification simple pour l'identification des attaques).

En termes d'actions correctives du phénomène, la solution la mieux maîtrisée est la mise en œuvre d'une protection cathodique. Les densités de courant mesurées pendant l'expertise laissent penser que le phénomène de corrosion pourrait être jugulé par la mise en œuvre d'un système de protection cathodique optimisée, moyennant un monitoring pour l'ensemble du site des Tellines et sur une durée d'au moins un an.

4. RÉFECTION DE LA PROTECTION ANTICORROSION DU PONT-CANAL DE BRIARE

4.1 Description de l'ouvrage et de son environnement

Le pont canal de Briare a été mis en service en 1896.

Il a été construit pour permettre aux bateaux de traverser la Loire entre Saint-Firmin (Cher) et Briare (Loiret) et il est resté jusqu'en 2003 le plus long canal métallique du monde avec ses 15 travées et ses 662 mètres de longueur totale.

Les entreprises qui sont intervenues lors de la construction sont Gustave Eiffel pour les piles et culées (1890-1896), et Daydé et Pillé pour la cuvette métallique en acier doux.

L'ouvrage est inscrit au titre des monuments historiques depuis 1976.

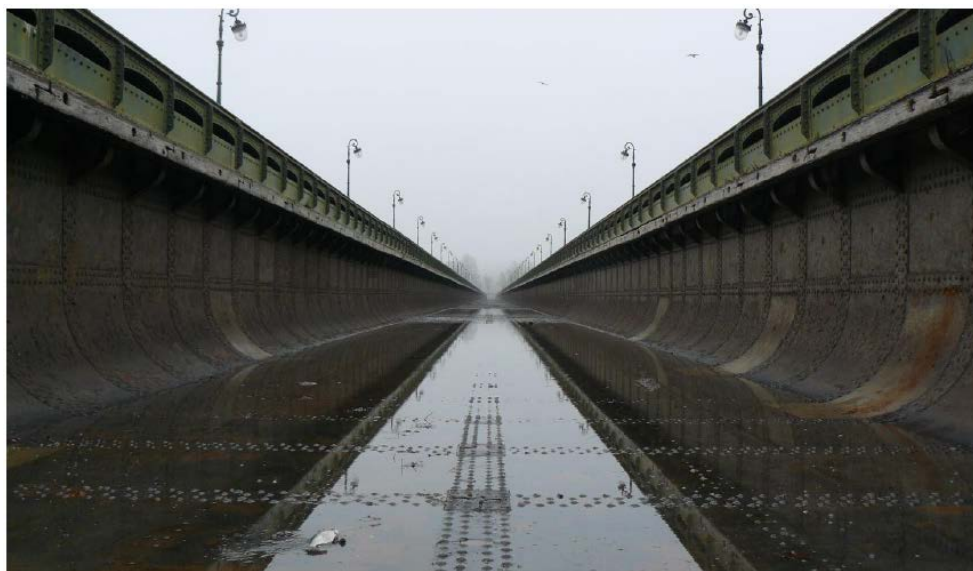


Figure IV.4.1 - Vue intérieure de la bâche côté Briare du pont-canal de Briare - crédit CETE Normandie-Centre

Les principaux chiffres à retenir pour ce pont-canal sont :

- longueur de la grande bâche sur La Loire : 602,78 m
- longueur de la petite bâche sur le bief des Combles : 10,15 m
- largeur interne du canal : 7,25 m
- largeur libre à la navigation : 6,20 m
- mouillage : 2,20 m
- tirant d'eau : 1,80 m
- épaisseur de la tôle pour les bâches : 9 mm

4.2 Pathologies

Il s'agit d'examiner les différentes possibilités en termes de réfection de la protection anticorrosion de l'intérieur de la bâche du pont-canal de Briare en tenant compte des contraintes techniques et financières du maître d'ouvrage.

4.2.1 État des lieux initial : les différents systèmes de peinture à l'intérieur de la bâche

Zone de battillage (voutains situés au-dessus des traverses de bois)

Travaux de peinture effectués en 1985 par la société ANTIROUILLE :

- décapage Sa 2,5 face vue des voûtains, lavage UHP 100 bars à l'intérieur des voutains.
- 1 couche : LPC 31291 Bar rust 235 crème 150 μm
- 2 couche : LPC 31291 Bar rust 235 vert clair 100 μm
- 3 couche : LPC 31303 Panthirethane 239 (vert lakao) 40 μm
- épaisseur totale : 290 μm

Partie sous trottoir

Travaux de peinture effectués en 1979 par la société CONIN :

- décapage Sa 2,5
- 3 couches de brai époxy système de protection TARPOX 170.40 (BITULAC) : 3 x 150 μm
- épaisseur totale : 450 μm

Partie intérieure sous le trottoir jusqu'au dessus de la deuxième ligne de rivets

Travaux de peinture effectués en 1981 par la société PROTECTIL

- décapage Sa 2,5
- 1 couche : CRYOGAL POXEZINC 40 à 45 μm
- 3 couches de TARPOX 170.40 (BITULAC) : 3 x 150 μm
- épaisseur totale : 490 μm

Parties intérieures de la bête sous la deuxième ligne de rivets :

- produit de protection anticorrosion inconnu
- absence d'amiante (trois prélèvements pour analyse effectués en 2004 : fond de cuve, paroi latérale et culée rive droite)
- décollement par plaques de la protection en place



Figure IV.4.2 - Vue du fond de la bête du pont-canal de Briare - crédit CETE Normandie-Centre

Nota bene : en 2004, 22 panneaux inox ont été soudés dans certaines zones (épaisseur de tôle résiduelle inférieure à 5 mm) pour renforcer la cuve avec une protection à base de brai sur le pourtour des plaques et un coulis stabilisateur entre plaque inox et cuve :

- 2 panneaux inox n'ont reçu aucune résine stabilisatrice ;
- 10 panneaux ont reçu une résine époxydique rigide une fois polymérisée ;
- 10 panneaux ont reçu une résine polyuréthane restant souple après polymérisation.



Figure IV.4.3 - Renforcement de la cuve du pont-canal de Briare par des panneaux inox - crédit CETE Normandie-Centre

4.2.2 État de la protection anticorrosion en place

À l'intérieur de la bache dans les parties immergées, il faut distinguer plusieurs zones :

- au-dessous de la deuxième ligne de rivets, le revêtement est soit très friable, soit disparu par plaques ;
- au-dessus de la deuxième ligne de rivets, le revêtement a disparu dans de nombreuses zones ponctuelles à cause de mesures d'épaisseur de métal. Des réparations sont donc à faire d'urgence, car la vitesse de corrosion y est très élevée (effet galvanique dû à des petites zones non protégées entourées de grandes zones protégées). L'ensemble de ces deux zones, d'une surface d'environ 6500 m², doit être entièrement décapé ;
- au-dessus de la deuxième ligne de rivets, sauf dans les zones précédemment citées, la conclusion du rapport d'inspection de 2004 indiquait que le revêtement était extrêmement adhérent au support (surface d'environ 1500 m²). Cette donnée devra être vérifiée avant les travaux.

En conclusion, afin de rétablir une protection anticorrosion homogène, durable et convenablement effectuée, la meilleure solution est de décapier complètement les parties immergées, soit une surface d'environ 8000 m².

4.3 Diagnostic

4.3.1 Contraintes liées à la remise en peinture de l'intérieur de la cuve

Durée de chômage du pont-canal

La période de chômage dure six semaines. Il s'agit d'une période courte imposant un délai de réalisation pour des travaux très serrés, ce qui implique la mise à disposition par l'entreprise titulaire de plusieurs postes de travail. Le système de peinture à appliquer sera de type Im2, à savoir spécifique aux parties immergées, et choisi de préférence parmi ceux nécessitant le moins de couches à appliquer.

Période de chômage du pont-canal

Elle s'étend sur les mois de novembre et décembre, ce qui n'est pas une époque propice pour les travaux de peinture. En effet, pour la plupart des systèmes de peinture certifiés ACQPA, les conditions atmosphériques durant l'application et le séchage des différentes couches de peinture doivent respecter les valeurs spécifiées par l'ACQPA dans le cadre de la mise en œuvre d'un système certifié, à savoir :

- température ambiante de 7°C à 35°C ;
- hygrométrie inférieure à 85 % ;
- température du support supérieure au point de rosée entre 3°C et ≤ 40°C

Ces conditions impliquent un confinement avec ventilation et système de chauffage. Le dispositif de confinement devra respecter les règles d'hygiène, de sécurité et de protection de l'environnement. Il devra comprendre également un dispositif d'éclairage, de ventilation, de dépression et d'aspiration des poussières.

Contrainte liée à l'humidité

Il ne devra rester aucune eau stagnante au fond de la cuve pendant le traitement. Sinon, il est nécessaire de revoir entièrement la stratégie.

4.3.2 Solutions pour la remise en peinture

Préparation de surface

- **Solution 1** : décapage par projection d'abrasif à sec de l'ensemble des surfaces à l'intérieur de la bache jusqu'à la première ligne de rivets avec un abrasif permettant d'obtenir le degré de soin Sa3 et la rugosité Moyen G (la rugosité doit également être Moyen G pour les tôles inox).
- Les déchets d'abrasif seront récupérés et analysés afin de déterminer leur dangerosité et la filière de gestion adéquate :
 - à raison d'environ 60 kg d'abrasif par m² traité, cela représente 480 tonnes de déchets d'abrasif à récupérer et à traiter ;
 - la surface traitée par un opérateur par jour est d'environ 50 m² ;
 - les opérateurs devront être certifiés ACQPA niveau 1 (opérateur) ou 2 (chef de chantier), option A, pour effectuer cette opération.
- **Solution 2** : décapage par projection d'abrasifs métallique recyclé (hors plaques inox). Cette solution présente l'avantage de limiter la quantité de déchets d'abrasifs.
- **Solution 3** : décapage UHP (>170 MPa), degré de soin DHP4 suivi d'un balayage à l'abrasif angulaire à sec (10 kg d'abrasif par m²) afin d'ôter l'oxydation flash et de respecter le degré de soin Sa3.
- Cette préparation de surface impose la récupération des eaux de décapage qui doivent être stockées, décantées, filtrées et analysées avant d'être rejetées dans le réseau d'assainissement.
- Elle présente néanmoins les avantages de pouvoir être robotisée et de diminuer considérablement la quantité de déchets. Cependant, deux types de déchets vont être générés :
 - les boues issues du décapage UHP dont la dangerosité sera à déterminer ;
 - les déchets d'abrasif issus du balayage à sec, environ 80 tonnes, qui ne seront pas dangereux.
- À l'issue de la préparation de surface, le degré de soin Sa3 et la rugosité Moyen G devront être atteints sur toutes les surfaces, y compris sur les tôles inox pour la rugosité :
 - la surface traitée par un opérateur par jour est d'environ 50 m²,
 - pour le décapage UHP, les opérateurs devront être certifiés ACQPA niveau 1 ou 2, option F.

L'abrasif utilisé devra être conforme à la législation en vigueur concernant l'hygiène et la sécurité sur les chantiers (décret n°69-558 du 6 juin 1969).

Traitement des déchets

Les échafaudages et le confinement devront être conçus pour permettre la récupération de la totalité des résidus de décapage.

Les systèmes de peinture au-dessus et en-dessous de la deuxième ligne de rivets sont différents. Hormis le fait qu'ils ne contiennent pas d'amiante, il sera nécessaire d'analyser les déchets de décapage bruts séparément pour savoir s'ils sont dangereux. Pour ce faire, il est nécessaire de rechercher :

- de l'amiante (pour confirmation d'absence) ;
- des HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) ;
- des HCT C10-C40 (hydrocarbures totaux) ;
- des éléments traces métalliques (ETM) : plomb (Pb), cadmium (Cd), chrome VI (Cr VI), antimoine (Sb), strontium (Sr), nickel (Ni), cobalt (Co), zinc (Zn) et aluminium (Al).

Enfin, si le déchet est destiné à être éliminé dans une installation de stockage (ISD), il faut déterminer s'il peut être stocké en ISDD (installation de stockage pour déchets dangereux) ou ISDND (installation de stockage pour déchets non dangereux).

Pour cela, il est nécessaire d'analyser les ETM après lixiviation, sur éluât avec un paramètre L/S = 10l/kg.

Les ETM à doser sur éluât sont : arsenic (As), baryum (Ba), plomb (Pb), cadmium (Cd), chrome total (Cr), cuivre (Cu), mercure (Hg), molybdène (Mo), antimoine (Sb), nickel (Ni) et zinc (Zn).

En conclusion, il est indispensable d'effectuer, pendant la période de chômage de l'année précédant les travaux, un essai préalable de décapage afin de :

- déterminer la dangerosité des déchets (présence ou non de substances cancérigènes mutagènes et reprotoxiques) pour les parties au-dessus et en-dessous de la deuxième ligne de rivets (analyse de peinture dans le cadre H-S) ;
- déterminer la filière de traitement des déchets ;
- confirmer la faisabilité des travaux.

Application d'un système de protection anticorrosion

Le système de peinture à appliquer est de type Im2, à savoir spécifique aux parties immergées. Il est préférable de choisir un système composé du moins de couches possibles afin de s'assurer du respect des délais.

- Recouvrement : 100 m²/h environ ;
- Si ce système devait être appliqué en parties vues comme les voutains, il faudrait prévoir une couche de finition supplémentaire adaptée aux parties vues ;
- Pour cette opération d'application, les opérateurs devront être certifiés ACQPA niveau 1 ou 2, option B (application de peinture au pistolet) ;
- Des pré-touches devront être effectuées sur les têtes de rivets avant l'application au pistolet ;
- Nous préconisons de garder les résidus des anciens fonds qui font une étanchéité naturelle sur le pourtour des têtes de rivets, à condition qu'ils soient bien adhérents.

4.4 Choix de la solution

	Avantages	Inconvénient
Décapage à l'abrasif non métallique	<ul style="list-style-type: none"> ● Utilisation d'un matériau valorisé (scories de fusions par exemple) . ● Facilité d'utilisation . ● Coût (25 à 35 €/m²) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Quantité de déchets générés importante (800 m²x 60 kg/m² soit 480 t → dangerosité à déterminer) ● Pas de séparation possible entre abrasif et déchets de peinture ● Confinement étanche ● Poussières
Décapage à l'abrasif	<ul style="list-style-type: none"> ● - Coût ● - Séparation possible entre l'abrasif et la peinture → quantité de déchets limitée, ● dangerosité à déterminer 	<ul style="list-style-type: none"> ● Confinement étanche ● Poussières
Décapage Ultra Haute Pression	<ul style="list-style-type: none"> ● Faible quantité de déchets (boues et peintures) ● Absence de poussières pendant le décapage 	<ul style="list-style-type: none"> ● Encombrement des unités de traitement (stockage, décantation, filtration, et traitement de l'eau) ● Coût ● Attention à la rugosité ● Oxydation de l'ouvrage → balayage à l'abrasif nécessaire (10 kg/m² soit 80 t → déchet non dangereux) ● Apport d'eau

Le coût du traitement des déchets dépend de leur destination et de l'éloignement des installations auxquelles ils sont destinés :

- installation de stockage des déchets non dangereux ou dangereux : 50 à 200 €/t selon la dangerosité (hors transport).
- incinération : prix variable => valorisation énergétique mais polluante ;
- cimenterie : prix variable selon le comportement du déchet lors de l'incinération, seuils d'acceptation stricts selon la nature du ciment désiré.

La mise en peinture d'un système classique sur une surface ne présentant pas de difficultés particulières peut varier de 20 à 25 €/m² (hors moyens d'accès, chauffage, ventilation et éclairage).

4.5 Bilan

Nous disposons à ce jour d'une idée sur les prix du marché pour les travaux classiques de décapage à l'abrasif perdu suivi d'une mise en peinture, à savoir environ 45 à 60 €/m² (hors coûts d'installation du chantier, de la récupération, du transport et du traitement des déchets, des échafaudages, des confinements, des moyens d'accès).

La deuxième solution consistant en un décapage à l'abrasif métallique recyclé présente les mêmes contraintes au niveau du confinement mais présente l'avantage de réduire considérablement la quantité de déchets, ce qui n'est pas négligeable concernant l'impact sur l'environnement.

Enfin, nous avons beaucoup moins de recul sur le décapage UHP. Il s'agit d'une technique innovante réduisant de façon importante la quantité de déchets mais peu d'entreprises pratiquent cette technique à ce jour.

Globalement, nous pouvons dire que cette technique présente un surcoût par rapport au décapage classique, mais nous ne pouvons pas dire si ce surcoût est compensé par la quantité de déchets à récupérer et à traiter, qui est bien moindre.

V. Bibliographie

- [1] AFNOR, Corrosion des métaux et alliages - termes principaux et définition - NF EN ISO 8044. 2000, p. 58.
- [2] AFNOR, Essais non destructifs - mesurage de l'épaisseur par ultrasons - NF EN 14127. 2011, p. 37.
- [3] AFNOR, Essais non destructifs - qualification et certification du personnel end - principes généraux - NF EN 473. 2008, p. 31.
- [4] AFNOR, Principes généraux de la protection cathodique en eau de mer - NF EN 12473. 2000, p. 33.
- [5] "Recommandation pcra 005 - mai 2007 - rev. 1 : Recommandations pour la vérification des électrodes de référence," 2007.
- [6] "Recommandation pcra 008 - janvier 2010 : Recommandations pour la définition des appareils de mesures utilisés en protection cathodique," 2010.
- [7] AFNOR, Techniques de mesures applicables en protection cathodique - NF EN 13509. 2003, p. 35.
- [8] AFNOR, Protection cathodique - niveaux de compétence et certification du personnel en protection cathodique - nf en 15257. 2007, p. 31.
- [9] AFNOR, Protection contre la corrosion due aux courants vagabonds des systèmes à courant continu - NF EN 50162. 2005, p. 31.
- [10] AFNOR, Applications ferroviaires - installations fixes - sécurité électrique, mise à la terre et circuits de retour - partie 2 : Mesures de protection contre les effets des courants vagabonds issus de la traction électrique à courant continu - NF EN 50122-2. 2011, p. 28.
- [11] D. Caron, M. Cherfaoui, and H. Walaszek, "Contrôles non destructifs pour la surveillance de la corrosion. Corrosion et anticorrosion. Paris : Hermès science publications - 2-7462-0467-3," Paris : hermès science publications, 2002.
- [12] C. Compère, J. M. Fourez, and M. Roche, "Prévention et lutte contre la corrosion," P. Normand B., Ed. Presse polytechniques et universitaires Romandes, 2004, pp. 321–370.
- [13] AFNOR, Peintures et vernis - anticorrosion des structures en acier par systèmes de peinture - partie 1 : Introduction générale - NF EN ISO 12944-1. 1998, p. 20.
- [14] AFNOR, Préparation des subjectiles d'acier avant application de peintures et de produits assimilés - evaluation visuelle de la propreté d'un subjectile - NF EN ISO 8501. 2007.
- [15] AFNOR, Préparation des subjectiles d'acier avant application de peintures et de produits assimilés - essais pour apprécier la propreté d'une surface - NF EN ISO 8502. 2001.
- [16] AFNOR, Préparation des subjectiles d'acier avant application de peintures et de produits assimilés - caractéristiques de rugosité des subjectiles d'acier décapés - NF EN ISO 8503. 1995, p. 69.
- [17] AFNOR, Peintures et vernis - anticorrosion des structures en acier par systèmes de peinture - mesure et critères d'acceptation de l'épaisseur d'un feuil sec sur des surfaces rugueuses - iso 19840. 2012, p. 16.
- [18] AFNOR, Anticorrosion des structures en acier par systèmes de peinture - evaluation et critères d'acceptation de l'adhésion/cohésion - partie 1 : Essai de traction - NF EN ISO 16276-1. 2007, p. 17.
- [19] AFNOR, Anticorrosion des structures en acier par systèmes de peinture - evaluation et critères d'acceptation de l'adhésion/cohésion - partie 2 : Essai de quadrillage et essai à la croix saint-andré - NF EN ISO 16276-2. 2007, p. 17.
- [20] H. Hamada, T. Yamaji, and Y. Akira, "Corrosion protection for steel pipe piles and sheet piles," 2011.
- [21] "Accelerated low water corrosion : Report of working group 44 of the maritime commission, international navigation association," 2005.
- [22] ASTM, Détection des porosités par balais électrique - ASTM D5162-8. 2008, p. 5.

- [23] D. Bailley, R. Lampo, J. Costa, M. Miltenberger, and T. Tehada, "Impact and corrosion prevention using polymer composite wrapping and galvanic cathodic protection system for pilings at kawaihae harbor - corrosion 2009 : 01/01/209," 2009.
- [24] H. Barreda and R. Galliana, "VIIIèmes journées nationales génie civil - génie côtier : Protection anticorrosion par système duplex," Compiègne.
- [25] F. Schoefs, M. Andre, J. Bazin, C. Fouache, and H. Payraudeau, "Techniques de réparation des pathologies de corrosion des structures métalliques - analyse technico-économique - report n°1-2 steel in marine environment."
- [26] B. Benaïssa, "VIIIèmes journées nationales génie civil - génie côtier : La corrosion des structures métalliques en mer - types et zones de dégradations," Compiègne.
- [27] J. Boero, B. Capra, F. Schoefs, O. Bernard, and M. Lasne, "Analyse de risques pour la maintenance des structures portuaires : Exemple de quais gabions soumis à de la corrosion," 2006.
- [28] B. J-E. and M. Siegwart, "Management of accelerated low water corrosion in steel maritime structures. Londres : CIRIA c634," Londres : CIRIA C634, 2005.
- [29] B. Bonin, "Coating applications, muse marketing group," Muse Marketing Group, 2008.
- [30] CEFRACOR, "CEFRACOR - Centre Français de l'Anticorrosion." <http://www.cefracor.org/>, 2018.
- [31] P. Charles, M. J. Bushman, A. D. Beitelman, R. G. Buchheit, and B. J. Little, "Freshwater corrosion in the duluth - superior harbor," 2004.
- [32] G. Clark, D. Bowman, and J. Sharrow, "Accelerated freshwater harbor corrosion study in the duluth-superior harbor," 2007.
- [33] A. Clement, F. Schoefs, J.-B. Memet, and A. Nouy, "Analuse statistique et probabiliste de la corrosion de quais sur pieux de l'estuaire de la loire," 2006.
- [34] COFREND, "COFREND - Confédération FRançaise pour les Essais Non Destructifs — Organismes certificateurs." <http://www.cofrend.com>, 2018.
- [35] "Coatings pro magazine," Coatings Pro Magazine.
- [36] CQPA, "Association pour la Certification et la Qualification en Peinture Anticorrosion — Organismes certificateurs." http://www.acqpa.com/inspecteurs_acqpa-frosio.php, 2018.
- [37] AFNOR, "Corrosion de métaux dans l'eau de mer et dans l'atmosphère maritime - partie 2 : Corrosion libre dans l'eau de mer. 1997, p. 51.
- [38] DNV, "Det Norske Veritas (DNV) — Organismes spécialisés." http://www.dnv.com/services/materials/materials_technology/corrosion_protection/, 2008.
- [39] DNV, "Cathodic protection design (recommended parctice) - CNV-RP-B401," 2010.
- [40] DNV, "Cathodic protection of submarine pipelines by galvanic anodes (recommende practice) - DNV-RP-F103," 2010.
- [41] C. Duret-Thual, "Expertise en corrosion - techniques de l'Ingénieur cor15," 2007.
- [42] Décret n°2011-45 du 11 janvier 2011 relatif à la protection des travailleurs intervenant en milieu hyperbare. 2011, p. 12.
- [43] D. Andre et al., "Entretien de la protection anticorrosion des ouvrages métalliques, laboratoire central des ponts et chaussées," Laboratoires central des Ponts et Chaussées, 2005.
- [44] E. C. P. CETMEF, "Film - «pérennisation des quais du port de Brest»."
- [45] F. Schoefs, B. Gerard, P. Casari, and L. Verdure, "VIIIèmes journées nationales génie civil - stratégie d'instrumentation pour la gestion optimisée des ouvrages portuaires."
- [46] H. Hamada, "Life extension of steel structures by corrosion - prevention technology - especially port and harbor steel structures."
- [47] R. Hicks, "Assessing the role of microorganisms in the accelerated corrosion of port transportation infrastructure in the duluth-superior harbor," 2009.

- [48] "IHS faisplay ports and harbors magazine," IHS Faisplay Ports and Harbors Magazine.
- [49] Z. Kazuaki, "Corrosion and life cycle management of port structures - corrosion science, 2005, 47, 10, 2353-2360.0010-938X," 2005.
- [50] A. Kumar and L. D. Stephenson, "Accelerated low water corrosion of steel pilings in seawater - corrosion 2005," 2005.
- [51] S. Audisio, "Le livre multimédia de la corrosion : Une nouvelles approche de la corrosion, 93.Société des experts-chimistes de france," Société des experts-chimistes de France, 2000.
- [52] R. Melchers and R. Jeffrey, "Corrosion of vertical steel strips exposed in the marine tidal zone and implications fos alwc," 2010.
- [53] J.-B. Memet, "La corrosion marine des structures métalliques portuaire : Étude des mécanismes d'amorçage et de croissance des produits de corrosion - thèse de doctorat de l'Université de la Rochelle - 00 laro s047," Thèse de Doctorat de l'Université de La Rochelle, 2000.
- [54] "Materials performance magazine," Materials Performance Magazine.
- [55] "NACE international : Corrosion journal," NACE International : Corrosion Journal.
- [56] "NACE international - protective coating specialist — organismes spécialisés." <http://web.nace.org/department/Certification/Certification.aspx?id=4038592e-b11d-db11-953d-001438c08dca>, 2018.
- [57] AFNOR, Protection cathodique des structures en acier fixes en mer - NF EN 12495. 2000, p. 32.
- [58] AFNOR, Anodes calvaniques pour la protection cathodique dans l'eau de mer et les boues salines - NF EN 12496. 2013, p. 32.
- [59] AFNOR, Protection cathodique des structures en acier flottant en mer - NF EN 13173. 2001, p. 22.
- [60] AFNOR, Protection cathodique des installations portuaires - NF EN 13174. 2001, p. 22.
- [61] AFNOR, Corrosion des métaux et alliages - essai en immersions alternées en solution saline. 2010, p. 15.
- [62] AFNOR, Peintures et vernis - détermination de la résistance au décollement cathodique des revêtements exposés à l'eau de mer - NF EN ISO 15711. 2005, p. 14.
- [63] AFNOR, Peintures et vernis - détermination de l'épaisseur du feuil - NF EN ISO 2808. 2007, p. 39.
- [64] AFNOR, Peintures et vernis - exigences de performance relatives aux systèmes de peinture pour la protection des structures offshore et structures associées - NF ISO 20340. 2009, p. 24.
- [65] AFNOR, Corrosion des métaux et alliages - corrosivité des atmosphères - classification - NF EN 9223. 2002, p. 23.
- [66] AFNOR, Corrosion des métaux et alliages - corrosivité des atmosphères - valeurs de référence relatives aux classes de corrosivité - NF ISO 9224. 2012, p. 22.
- [67] AFNOR, Exécution des travaux géotechniques spéciaux - ouvrages en gabions en grillage métallique à maille hexagonale double torsion - partie 2 : Ouvrages en site aquatique - NFP94-325-2. 2006, p. 51.
- [68] B. Normand, C. Richard, and M. Wery, "Prévention et lutte contre la corrosion : Une approche scientifique et technique, presse polytechniques et universitaires romandes," Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2004.
- [69] E. Longaygue and F. Daly, "Notice qg 88.2 - recommandations générales pour la conception, le dimensionnement et la réalisation des structures métalliques en site aquatique, cetmef," CETMEF, 1994.
- [70] L. Paugam, D. Festy, S. Pimeau, N. Menard, P. Carpentier, and B. Benaïssa, "Comportement électrochimique des structures métalliques portuaires en site marnant maritime et estuarien : Onitoring de critères de protection cathodique," 2011.
- [71] S. Pineau, "Interactions entre les communautés bactériennes et les processus de corrosion accélérée des structures métalliques en environnement marin - thèse de doctorat de l'Université technique de compiègne - 2006COMP1664," 2006.
- [72] "Port strategy," Port Strategy.

- [73] "Port technology international," Port Technology international.
- [74] G. Rannou, D. Thierry, and N. Lebozec, "Ultrasonic monitoring of steel corrosion during accelerated corrosion testing and outdoor field exposures," San Antonio, TX. NACE International, 2010.
- [75] P. Refait, J. Creus, and R. Sabot, "Corrosion et protection des métaux en milieu marin - techniques de l'ingénieur cor 620," 2004.
- [76] M. Roche, "Protection contre la corrosion des ouvrages maritimes pétroliers, rueil-malmaison, FRANCE : Institut français du pétrole," Rueil-Malmaison, FRANCE : Institut français du pétrole, 1998.
- [77] F. Ropital, "Corrosion et dégradation des matériaux métalliques, compréhension des phénomènes et applications dans l'industrie pétrolière et des procédés - ifp publications," IFP Publications, 2009.
- [78] F. Schoefs, M. Andre, J. Bazin, C. Fouache, and H. Payraudeau, "Techniques de prévention des pathologies de corrosion des structures métalliques."
- [79] C. Vargel, "La corrosion de l'Aluminium, technique et ingénierie. Série matériaux," Série Matériaux, 1999.
- [80] D. G. Weldon, "Failure analysis of paint & coat," 2009.
- [81] K. Wold, S. Hopkins, T. Jakobsen, S. Lilleland, E. Stoen, and B. Roar, "New generation software integrates intrusive and non-intrusive systems for corrosion and sand:Errrosion monitoring," Aberdeen, UK, 2010.

VI. Glossaire et liste des sigles

Types de corrosion

Deux familles de corrosion peuvent être distinguées¹ :

- La **corrosion généralisée** (*general corrosion*) : corrosion progressant sur l'ensemble de la surface d'un alliage métallique exposée au milieu corrosif. Si la progression est approximativement la même sur toute la surface, on parle de corrosion uniforme (*uniform corrosion*) ;
- La **corrosion localisée** : corrosion affectant seulement une partie d'une structure, d'une pièce, voire de la structure d'un alliage métallique qui la compose.

Suivant sa forme et ses origines, on distingue différents types de corrosion. Ceux-ci sont décrits ci-après.

- **Corrosion caverneuse** = **corrosion par aération différentielle** = **corrosion par effet de crevasse** (*crevice corrosion*) : corrosion localisée associée à la présence d'un interstice étroit ou d'un espace restreint existant entre la surface d'un métal et une autre surface (métallique ou non). La corrosion se développe dans cette zone ou dans son voisinage immédiat.
- **Corrosion cavitation** (*cavitation corrosion*) : conséquence de l'effet de bulles de gaz sur la couche passivée d'un alliage métallique qui le rend ainsi sujet à la corrosion.
- **Corrosion galvanique** (*galvanic corrosion*)² : corrosion due à un contact électrique et ionique entre deux métaux différents. Il est à noter que ce type de corrosion dépend fortement de la différence de potentiel et du rapport de surfaces entre les deux métaux.
- **Corrosion intergranulaire** (*intergranular corrosion*) : corrosion située aux joints des grains d'un métal ou à leur voisinage immédiat. Ce type de corrosion entraîne une perte des propriétés mécaniques du matériau sans pour autant entraîner de perte de masse importante.
- **Corrosion influencée par les micro-organismes** = **corrosion bactérienne** (*microbially induced corrosion*) : conséquence de la présence de micro-organismes dans le milieu proche d'un alliage métallique. Ils peuvent ainsi favoriser la corrosion *via* une production de substances corrosives, une dépolarisation cathodique, une modification locale de l'environnement ou encore une dégradation des revêtements.
- **Corrosion par courant vagabond** (*stray-current corrosion*) : corrosion due à l'action d'une source extérieure de courant électrique générant un courant passant par des circuits autres que ceux prévus.
- **Corrosion par piqûres** (*pitting corrosion*) : corrosion localisée se traduisant par l'apparition de piqûres, c'est-à-dire de cavités progressant dans le métal à partir de la surface. Ce type de corrosion touche des aciers ayant des états de surface peu lisses ou des alliages métalliques passivables.
- **Corrosion sélective** (*selective corrosion*) : corrosion préférentielle d'un des constituants d'un alliage.
- **Corrosion sous contraintes** (*stress corrosion*) : corrosion impliquant l'action conjuguée de la corrosion et d'une déformation d'un alliage métallique sous l'effet de contraintes de traction appliquées ou résiduelles.
- **Corrosion sous dépôt** (*deposit corrosion*) : corrosion localisée due à la présence d'un dépôt de produits de corrosion ou d'autres substances, et qui se localise sous ce dépôt ou à son voisinage immédiat. Ce type de corrosion est très proche de la corrosion caverneuse et ces deux phénomènes sont souvent désignés sous le même terme de corrosion caverneuse.
- **Fatigue-corrosion** (*tired corrosion*) : corrosion du matériau impliquant une diminution de sa résistance à la contrainte et, à terme, sa rupture sous des cycles de contrainte répétées.
- **Tribocorrosion** = érosion corrosion (*fretting corrosion*) : processus impliquant l'action conjuguée de la corrosion et du frottement d'un fluide sur la surface d'un alliage métallique.

1 les principaux types de corrosion la traduction anglaise, selon la norme ISO 8044 [1], est donnée entre parenthèse

2 Le terme a souvent été restreint à l'action de piles de corrosion bimétalliques, c'est-à-dire, à une corrosion dans laquelle la pile de corrosion se produit entre deux métaux dissemblables.

Termes associés à la corrosion

- **Anode ou zone anodique** : électrode siège d'une réaction équivalente à un transfert de charges positives d'un conducteur électronique vers l'électrolyte (entrée des électrons dans le métal), appelée oxydation, suivant la réaction : $M \rightarrow M_n^+ + ne^-$.
- **Cathode ou zone cathodique** : électrode siège d'une réaction équivalente à un transfert de charges négatives du conducteur électronique vers l'électrolyte (sortie des électrons d'un alliage métallique), appelée réduction, suivant la réaction : .
- **Couche de passivation** (*passive layer*) : couche fine, adhérente et protectrice formée à la surface d'un métal par réaction entre le métal et le milieu environnant.
- **Électrode** : conducteur électronique (métal la plupart du temps) en contact avec un électrolyte.
- **Électrode de référence** : électrode dont le potentiel est constant quelles que soient les conditions de mesure.
- **Milieu électrolytique** : milieu dans lequel le courant électrique est transporté par des ions. Une solution saline telle que l'eau de mer peut constituer un milieu électrolytique.
- **Potentiel d'abandon** = potentiel de corrosion : c'est le potentiel que prend un métal donné lorsqu'il est en contact avec un électrolyte. Il est dépendant des conditions de mesure et est donné par rapport à une électrode de référence.

Zones d'exposition

- **Zone atmosphérique** : zone ne se trouvant pas directement en contact avec la mer mais où des particules d'origine marine peuvent être présentes.
- **Zone des éclaboussures** : zone située directement au-dessus des marées les plus hautes.
- **Zone de marnage** : zone soumise au marnage, le marnage exprimant la différence de niveau entre une basse mer de vives eaux (BMVE) et une pleine mer de vives eaux (PMVE). 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 l'autre.
- **Zone des basses-eaux** : zone d'un mètre de hauteur située sous le plus bas niveau atteint par la surface.
- **Zone immergée** : partie de la structure en contact permanent avec l'eau de mer située sous la zone des basses-eaux.
- **Zone des sédiments** : partie enfouie de la structure.

Systèmes de peinture

- **Couche primaire** : son rôle premier est d'assurer une très bonne adhésion au subjectile et d'avoir une action inhibitrice de corrosion. Dans le cas d'une métallisation, cette couche primaire est appliquée sur le produit bouche-pores.
- **Couche intermédiaire** : elle a pour buts d'améliorer l'imperméabilité, d'assurer une bonne liaison entre la couche primaire et la finition et de constituer un fond coloré propice à un bon recouvrement.
- **Couche de finition** : ses rôles sont d'obtenir la couleur, la brillance et le recouvrement désirés ainsi que d'assurer un certain nombre de fonctions complémentaires telles que : résistance chimique, action antisalissures, imperméabilisation, résistance aux U.V.

Organismes

ACQPA	Association de certification et de qualification en peintures anticorrosion. Organisme de certification de systèmes, d'opérateurs et d'inspecteurs dans le domaine des peintures anticorrosion.
CEFRACOR	Centre français de l'anticorrosion. Organisme rassemblant les personnes et organismes concernés par le comportement des matériaux dans leur environnement.
CFPC	Conseil français de protection cathodique. Département spécialisé du CEFRACOR chargé de gérer la certification des personnes en protection cathodique.
COFREND	Confédération française pour les essais non destructifs. Organisme de certification des personnels effectuant des contrôles non destructifs selon les référentiels NF EN 473[3] ISO 9712 et EN 4179.
OHGPI	Office d'homologation des garanties de peinture industrielle.
PCRA	Commission du CEFRACOR pour la Protection Cathodique et les Revêtements Associés.

VI. Index des illustrations

I.2.1 Les produits palplanches fonctionnant en flexion et en traction	7	I.3.23 Exemple de corrosion en zone d'assemblage	37
I.2.2 Allure de courbe des moments sur une paroi ancrée par un rideau arrière	8	II.1.1 Méthodes et outils d'évaluation de la corrosion utilisables en fonction de la zone d'exposition	38
I.2.3 Paroi combinée en tubes, raccords et palplanches	9	II.1.2 Fenêtres d'inspection (environ 15 x 15 cm ²) sur un rideau de palplanches	39
I.2.4 Etapes fondamentales de la fabrication des produits palplanches	10	II.3.1 Schéma de principe de mesure d'épaisseur par ultrasons	40
I.2.5 Four électrique	10	II.3.2 Palplanches avec profil en U (gauche) et en Z (droite)	41
I.2.6 Route métallurgique type pour la production de palplanches	11	II.3.3 Repérage des mesures d'épaisseur résiduelle d'une fenêtre d'inspection	42
I.2.7 Schéma d'une installation de coulée continue pour demi-produit type beam blanks	11	III.3.1 Principe de la protection cathodique par anode sacrificielle (gauche) et par courant imposé (droite)	63
I.2.8 Cylindres cannelés d'une cage de laminoir à chaud	12	III.3.2 Dispositifs de protection cathodique par anodes sacrificielles (gauche) et par courant imposé (droite)	64
I.2.9 Illustration du procédé d'obtention de tubes à partir de bobines	12	III.4.1 Pieux peints sur la partie accessible à marée basse - première et deuxième couches	71
I.2.10 Stands de profilage à froid	13	IV.1.1 Vue générale et implantation du quai de l'Escaut du port de Dunkerque	73
I.2.11 Influence de la plage de température de transformation sur la microstructure de l'acier	13	IV.1.2 Aspect du rideau avant travaux - quai de l'Escaut du port de Dunkerque	74
I.2.12 Influence de la teneur en carbone sur les courbes de traction uniaxiale d'aciers non alliés	14	IV.1.3 Schéma de principe de la réparation - quai de l'Escaut du port de Dunkerque	75
I.2.13 Nuances d'acier suivant la norme EN 10248-1	14	IV.1.4 Photographies des travaux - quai de l'Escaut du port de Dunkerque	75
I.2.14 Propriétés mécaniques et compositions chimiques AMLoCor	15	IV.1.5 Vue du rideau de palplanches après travaux - quai de l'Escaut du port de Dunkerque	76
I.3.1 Principe de l'action corrosive avec présence aqueuse	18	IV.2.1 Vue générale de l'écluse de Watier du port de Dunkerque	78
I.3.2 Degrés d'oxydation du fer	19	IV.2.2 Vue de l'écluse de Watier à la fin de la seconde guerre mondiale	78
I.3.3 Illustration de différentes formes de produits de corrosion	19	IV.2.3 Plan de l'écluse de Watier du port de Dunkerque	78
I.3.4 Synthèse des typologies et illustration des faciès de corrosion	21	IV.2.4 Schéma de principe des travaux suivant le scénario 1 - écluse de Watier du port de Dunkerque	79
I.3.5 Principe de la corrosion généralisée	21	IV.2.5 Schéma de principe des travaux suivant le scénario 2 - écluse de Watier du port de Dunkerque	80
I.3.6 Principe de la corrosion galvanique	22	IV.2.6 Schéma de principe des travaux - écluse de Watier du port de Dunkerque	81
I.3.7 Principe de la corrosion cavernueuse	23	IV.2.7 Photographie des travaux - écluse de Watier du port de Dunkerque	82
I.3.8 Principe de la corrosion par piqûres	23	IV.3.1 Localisation du quai des Tellines du port de Marseille-Fos	83
I.3.9 Principe de la corrosion-érosion (à gauche) et de la corrosion cavitation (à droite)	24	IV.3.2 Principe de la mission d'investigation - quai des Tellines du port de Marseille-Fos	84
I.3.10 Principe de la corrosion intergranulaire	24	IV.4.1 Vue intérieure de la bêche côté Briare du pont-canal de Briare	86
I.3.11 Principe de la corrosion sélective	25	IV.4.2 Vue du fond de la bêche du pont-canal de Briare	87
I.3.12 Principe de la tribocorrosion	25	IV.4.3 Renforcement de la cuve du pont-canal de Briare par des panneaux inox	88
I.3.13 Principe de la corrosion sous-contraintes	26		
I.3.14 Illustration des principales zones d'exposition d'un ouvrage métallique en site maritime	30		
I.3.15 Exemples de corrosion en zone atmosphérique	31		
I.3.16 Corrosion en zone d'éclaboussure	32		
I.3.17 Illustration de la corrosion en zone marnante	33		
Figure I.3.18 Illustrations de la corrosion accélérée en zone de basses-eaux	34		
I.3.19 Illustrations des produits de la corrosion en zone immergée	35		
I.3.20 Faciès de la corrosion en zone immergée	35		
I.3.21 Corrosion en zone de jonction sédimentaire se découvrant à basse-mer	36		
I.3.22 Corrosion d'armatures métalliques avec éclatement du béton	36		

© 2020 - Cerema

Le Cerema, l'expertise publique pour le développement et la cohésion des territoires

Le Cerema est un établissement public qui apporte un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre d'études et d'expertise, il a pour vocation de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au cœur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, organismes de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

Coordination-Maquettage : Service éditions Cerema Eau, mer et fleuves

Dépôt légal : Janvier 2020

ISBN : 978-2-37180-419-7

ISSN : 2276-0164

Prix : 29 euros

Illustration couverture ou crédits photos : © Cerema

Editions du Cerema

Cité des mobilités,

25 avenue François Mitterrand

CS 92803

69674 Bron Cedex

Cerema Eau, mer et fleuves

Service Qualité Édition

134 rue de Beauvais

CS 60039

60280 Margny-lès-Compiègne

www.cerema.fr

La collection « Références » du Cerema

Cette collection regroupe l'ensemble des documents de référence portant sur l'état de l'art dans les domaines d'expertise du Cerema (recommandations méthodologiques, règles techniques, savoir-faire...), dans une version stabilisée et validée. Destinée à un public de généralistes et de spécialistes, sa rédaction pédagogique et concrète facilite l'appropriation et l'application des recommandations par le professionnel en situation opérationnelle.

Manuel de corrosion et protection des ouvrages en sites aquatiques

Ce guide présente les phénomènes de corrosion en milieu portuaire ou fluvial ainsi que les structures affectées. Il précise, en fonction des matériaux, les différents mécanismes de corrosion et l'influence du milieu sur les dégradations observées et détaille les outils de surveillance, de mesures de la corrosion. Ce guide passe en revue et donne les principes des systèmes de protection : passive, active et combinaison des deux. Enfin, il rapporte quatre retours d'expériences.

Sur le même thème

Protection cathodique du béton armé - retour d'expérience - Collection Connaissances - Cerema, 2018

Rejointoiement des ouvrages maritimes en maçonnerie - Collection Connaissances - Cerema 2017

Guide Enrochement - L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques - Collection Connaissances - Cetmef 2009

Aménagement et cohésion des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

Prix TTC : 29 €

ISSN : 2276-0164

ISBN : 978-2-37180-419-7

