

FICHE THÉMATIQUE

N°1

Février 2026

La durabilité des ouvrages

Protection contre les effets de l'environnement marin

Au cours de la concertation préalable liée au projet Éole, un atelier était dédié aux techniques de construction du quai et des dispositifs de stockage des flotteurs sur le plan d'eau. Les participants ont demandé à disposer d'informations complémentaires sur la durabilité de ces ouvrages soumis à l'environnement marin. Nantes Saint-Nazaire Port a conçu cette fiche thématique afin d'expliquer les procédés et solutions.

Les parties métalliques des ouvrages qui sont soumises aux embruns marins et celles qui sont alternativement au contact de l'eau salée puis exposées à l'air (contenant de l'oxygène) sont susceptibles de subir une corrosion importante. Celle-ci conduit à une perte d'épaisseur de l'acier de structure, pouvant aller jusqu'à le percer, et donc génère un risque vis-à-vis des structures.

Il est important de comprendre les mécanismes en jeu, d'identifier les zones à risque, de prévoir, dès la conception, les marges de sécurité nécessaires et de définir des moyens de protection pour empêcher ou ralentir cette corrosion. À cela s'ajoutent, en amont, la méthodologie de surveillance et de suivi dans le temps, ainsi que les moyens de réparation si besoin.

Les mécanismes en jeu



La corrosion des matériaux métalliques en site aquatique relève essentiellement de processus dits électrochimiques, dus aux propriétés de conduction électrique entre la phase métallique (conduction électronique) et la phase aqueuse, appelée également électrolyte. Il s'agit d'un transfert d'électrons entre le fer (Fe) contenu dans l'acier (alliage métallique composé en majorité de fer et de carbone), le sel (NaCl), l'oxygène (O₂) de l'air (ou dissout dans l'eau) et la solution aqueuse H₂O.

Cette fiche thématique se concentre sur les effets de l'environnement marin (corrosion, dégradations) sur les structures métalliques exposées (pieux et palplanches). Les parties d'ouvrage en béton sont également soumises aux agressions de l'environnement marin par le phénomène de pénétration des ions chlorure (Cl⁻) dans le béton armé.

Les ouvrages en béton armé comportent des armatures métalliques essentielles au maintien de l'intégrité de ces structures, censées être isolées 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.

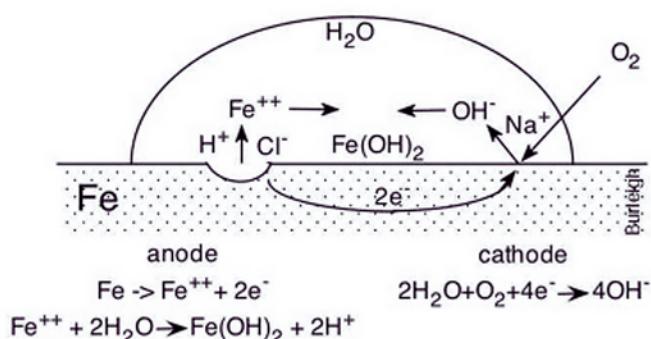


Figure 1 - Principe de l'action corrosive avec présence aqueuse.

Extrait du manuel CEREMA de corrosion et protection des ouvrages en sites aquatiques (janvier 2020)



Zones à risque et marges de sécurité en conception

Le processus de corrosion peut varier en fonction du type d'exposition à l'électrolyte (immersion permanente, temporaire) et de ses caractéristiques physicochimiques (interfaces d'oxygénéation, concentrations en sels). Sur un site marnant, comme à Saint-Nazaire, on décompose les zones d'exposition comme suit : zone atmosphérique, zone d'éclaboussure, zone de marnage, zone des basses-eaux et de sub-surface, zone d'immersion, zone sédimentaire.

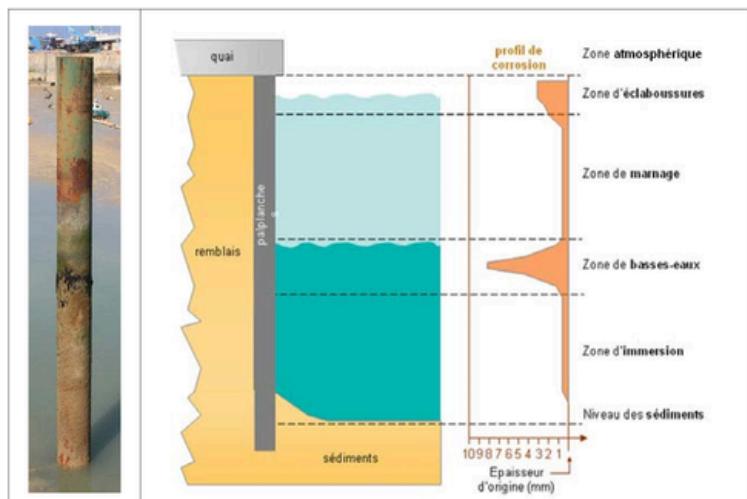


Figure 2 - Illustration des principales zones d'exposition d'un ouvrage métallique en site maritime
 Extrait du manuel CEREMA de corrosion et protection des ouvrages en sites aquatiques (janvier 2020)

Les normes de calculs en vigueur définissent ainsi des estimations théoriques de pertes d'épaisseur attendues en fonction de ces zones d'exposition et en fonction de la durée de vie de l'ouvrage. Dans les calculs de structures, il convient d'effectuer les vérifications des contraintes admissibles, en tenant compte des épaisseurs corrodées pour définir les coefficients de sécurité.



Durée d'utilisation de projet	5 ans	25 ans	50 ans	75 ans	100 ans
Eau douce ordinaire (rivière, canal navigable,), dans la zone d'attaque élevée (ligne d'eau)	0,15	0,55	0,90	1,15	1,40
Eau douce très polluée (eaux usées, effluents industriels,), dans la zone d'attaque élevée (ligne d'eau)	0,30	1,30	2,30	3,30	4,30
Eau de mer sous climat tempéré, dans la zone d'attaque élevée (basses eaux et zone d'embruns)	0,55	1,90	3,75	5,60	7,50
Eau de mer sous climat tempéré, dans la zone d'immersion permanente ou dans la zone de marnage	0,25	0,90	1,75	2,60	3,50

Notes :

- 1) Le taux de corrosion le plus élevé est habituellement observé dans la zone d'embruns ou dans la zone des basses eaux. Cependant, dans la plupart des cas, le moment fléchissant le plus élevé se situe dans la zone d'immersion permanente, voir Figure 4.1.
- 2) Les valeurs données pour 5 ans et 25 ans sont basées sur des mesures, tandis que les autres valeurs sont extrapolées.

Figure 3 - Valeurs recommandées pour perte d'épaisseur (mm) due à la corrosion dans le cas des pieux et palplanches dans l'eau douce et l'eau de mer
 Extrait de l'Eurocode 3-5 servant au dimensionnement des structures en acier



Protections envisageables vis-à-vis de la corrosion

Il existe plusieurs façons de protéger les structures métalliques qui peuvent être couplées (épaisseur sacrificielle + peinture + anodes par exemple) qui présentent toutes des avantages et des inconvénients.

	Caractéristiques	Avantages	Limitations
Peinture	Application (en usine) d'un système de peinture multicouche, protection certifiée par l'ACQPA en classe Im2 (adaptée au milieu marin).	Prolonge la durée de vie de l'ouvrage en empêchant la corrosion de s'initier.	Durée de protection garantie à 15 ans seulement. Risque de dégradation lors de l'entrée du tube dans le sol. Sensibilité aux UV et aux frottements mécaniques.
Anodes sacrificielles	Fixation sur la structure d'une anode en métal plus réducteur que l'acier à protéger (zinc par exemple) pour attirer les phénomènes d'oxydoréduction. Il existe également un système à courant imposé.	Système simple à mettre en œuvre.	Durée de protection limitée en fonction de la quantité de zinc dans l'anode. À remplacer régulièrement. Ne peut donc fonctionner que dans certaines zones (immergée dans l'électrolyte).
Épaisseur d'acier sacrificielle	Calcul initial en conception de l'ouvrage en considérant qu'une partie de l'acier n'est plus disponible après une certaine durée de projet d'utilisation, ajout d'une épaisseur sacrificielle, c'est-à-dire non prise en compte dans les calculs.	Très simple et n'impose pas d'opérations de remplacement et de maintenance.	Coûteux en raison du surdimensionnement initial, contrôle nécessaire pour valider les prédictions, aspect extérieur (pouvant inquiéter si pas d'information).
Acier de type Lowcor ou inox	Composition de l'acier modifiée pour empêcher le phénomène de corrosion (limitation de la quantité de carbone et ajout de chrome).	Protection définitive.	Cher, peu répandu, Report éventuel du risque sur les ouvrages voisins, qui ne sont pas inox.
Conception structurelle pour limiter les zones exposées	Noyer les éléments métalliques sensibles dans le béton aux connexions, remplir les tubes de béton	Solution simple et économique, si bien anticipée.	Eventuelles difficultés de mise en œuvre. Concentration de contraintes aux encastrements. Surcoût de l'ouvrage si le béton sert juste de protection.

Méthodes de réparation pour les structures métalliques

Plusieurs techniques existent pour réparer les structures métalliques endommagées par la corrosion, telles que décrites ci-dessous :

	Caractéristiques	Description - Illustration
Décapage, remise en peinture	<p>Décapage à l'abrasif ou à ultra-haute pression. Opération impérative avant toute réparation. Application de plusieurs couches de peinture.</p>	
Système résine, bandes grasses, mortier coffré ou équivalent	<p>Système trenton, denso (bandes grasses), application d'une couche primaire, de bandes anti-corrosion et d'une couche extérieure de résine. Chemisage et mortier. Application d'une couche primaire, d'un mortier béton dans la coque extérieure.</p>	
Réparation lourde, confortement	<p>Démolition partielle éventuelle des structures dégradées et remplacement ou reprise de nouvelles structures correspondant aux besoins structurels de l'ouvrage. Cette approche est coûteuse et parfois complexe techniquement mais elle prolonge la vie de l'ouvrage de manière sécurisée et peut s'adapter à de nouveaux besoins.</p>	



Quelles solutions sont privilégiées pour le projet Éole ?

Au regard de ces différents éléments techniques, l'équipe projet a d'ores et déjà retenu plusieurs principes en conception initiale, notamment :

- Les éléments métalliques les plus exposés disposeront d'une épaisseur sacrificielle de 4 mm ;
- Les zones hors du sol et non protégées par le béton seront recouvertes d'une peinture initiale de classe Im2 ;
- Les têtes de pieux seront insérées de quelques centimètres dans le béton de la structure et un joint hydro gonflant sera mis en oeuvre à la liaison avec le béton (Mapeflex PB25).

Afin d'assurer le suivi et l'auscultation des structures, Nantes Saint-Nazaire Port mobilisera l'équipe en charge de la durabilité des ouvrages, en organisant des campagnes d'inspection et de maintenance régulières. L'équipe portera son attention aux exigences définies dans les cahiers des charges, en termes de protection (système éprouvé, procédures mises en œuvre, personnel qualifié) et de régularité des suivis et des interventions de maintenance.



Quelques repères :

Longueur du quai : 530 m

Portance maximale du quai sous grue : 30 t / m²

2 zones de stockage des flotteurs sur le plan d'eau

**1 poste d'assemblage
1 poste de commissionning (tests)**



Restez informé.e de
l'avancement du projet Éole
en vous connectant à la
plateforme de concertation
en ligne :
www.participez.eole.port.fr

