

Solutions

béton

Particularités des ouvrages en site maritime	P. 2
Principaux ouvrages en site maritime	P. 3
Risques de corrosion des armatures en site maritime	P. 4
Ciments pour bétons en site maritime	P. 5
Quelques principes de prévention	P. 5
Choix des classes d'exposition	P. 6



Les ouvrages en béton en site maritime

L'élargissement de l'Union européenne, l'essor économique de nombreux pays, la mondialisation des échanges et l'augmentation du tourisme nautique et du transport multimodal génèrent un essor important du trafic maritime. La France, avec sa très grande façade maritime, bénéficie d'une situation géographique privilégiée. Ce contexte est favorable à un développement important des aménagements en site maritime et une modernisation de l'ensemble des infrastructures portuaires.

Les bétons sont utilisés pour la réalisation de très nombreux ouvrages ou structures situés en site maritime qui participent à l'aménagement des infrastructures et installations portuaires de pêche ou de commerce, des bassins, des terminaux à conteneurs, des terminaux céréaliers, des bases nautiques, des ouvrages de protection et de défense des côtes (épis, brise-lames), de protection des ports (digues, jetées), des ouvrages de mise à l'eau de navires ou de construction navale, des quais et appontements pour le chargement et le déchargement. ...

Texte : Patrick Guiraud

Particularités des ouvrages en site maritime

Photo : Patrick Guiraud



Les ouvrages en béton construits en site maritime présentent de multiples particularités induites par une très grande variété :

- des types de structures et des solutions constructives offertes par le matériau ;
- des utilisations des ouvrages ;
- des techniques et des méthodes de construction ;
- des types de béton utilisés : béton coulé en place, éléments en béton préfabriqués en usine ou sur le site ;
- des contraintes climatiques lors des phases de construction, qui imposent la mise en œuvre de dispositions adaptées.

DES AGRESSIONS SPÉCIFIQUES

La principale spécificité de ces ouvrages est liée aux conditions et contraintes environnementales et climatiques qu'ils doivent subir pendant leur durée d'utilisation :

- attaques et agressions chimiques de l'eau de mer ;
- impacts physiques des déplacements

de l'eau : vagues, houle, courants, variations de niveau ;

- agressions liées aux vents, aux taux élevés d'humidité et à l'ensoleillement.

De plus, les structures sont souvent complexes, parfois fortement ferrailées, et doivent fréquemment être réalisées en présence d'eau, voire sous l'eau et sous l'action de la houle et des vagues, avec des conditions d'accès difficiles et des variations de niveau des eaux induites par les marées. Il en résulte des contraintes importantes de bétonnage et de stabilité des coffrages, ce qui impose l'utilisation de bétons offrant des propriétés adaptées (pompabilité, « autoplaçance », maniabilité, absence de ségrégation...).

Les parties des ouvrages sollicitées par des agressions physiques et chimiques varient en fonction de leur situation par rapport au milieu marin. Elles peuvent être regroupées en 5 zones :

- la zone immergée : partie d'ouvrage constamment sous l'eau ;

- la zone de marnage : partie d'ouvrage soumise aux marées ;

- la zone d'aspersion par l'eau de mer ;

- la zone soumise aux embruns ;

- la zone exposée à l'air véhiculant du sel marin.

À chaque zone correspondent des agressions spécifiques de l'eau de mer générant des risques de pathologie différents du béton.

Un béton exposé en site maritime peut être l'objet de plusieurs types d'agressions :

- agressions mécaniques dues à l'action des vagues, de la houle et des marées, abrasion due aux chocs des corps flottants et érosion due aux effets des vagues ;

- agressions chimiques dues à l'action en particulier des chlorures présents dans l'eau de mer et des sulfates, mais aussi des nombreux sels dissous dans l'eau de mer et, dans certains cas, à la pollution des eaux ;

- agressions climatiques dues aux variations de température ;

- agressions biologiques de micro-organismes.

Les structures situées en site maritime sont exposées à plusieurs types de configurations. Elles peuvent être :

- continuellement immergées (béton situé sous le niveau de la mer, même à marée basse). Les bétons situés dans cette zone sont rarement l'objet de dégradations importantes ;

- alternativement émergées ou immergées en fonction du niveau de la mer (zones de marnage déterminées par les niveaux de marée haute et basse). Les bétons situés dans les zones de marnage sont soumis 2 fois par jour à des imprégnations d'eau de mer alternant avec un essorage et donc à des cycles humidification-dessiccation. Ce sont donc les plus agressés ;

- soumises aux éclaboussures provoquées par les vagues. Ces zones de hauteur variable sont situées au-dessus du niveau de l'eau à marée haute ;

- continuellement émergées, donc sans contact direct avec le milieu marin, mais soumises aux embruns et brouillards marins contenant des chlorures. Les bétons situés dans cette zone peuvent subir de légères agressions ; pour les bétons de structure, la norme NF EN 206/CN étend cette zone jusqu'à 1 km de la côte ;

- soumises à l'air véhiculant du sel marin uniquement.

TOUS LES TYPES DE BÉTON

Les ouvrages peuvent être :

- coulés en place, à l'air libre ou sous l'eau ;

- constitués de produits préfabriqués en béton ;

- préfabriqués en cale sèche (puis mis en eau et acheminés par flottaison jusqu'à leur emplacement définitif).

Le béton peut être armé ou précontraint. ■

Principaux ouvrages en site maritime

Photo : DR



APPONTEMENT : ouvrage d'accostage permettant le chargement et le déchargement des navires.

BASSIN DE RADOUB, FORME DE RADOUB ou CALE SÈCHE : bassin étanche, mis à sec par vidange, permettant l'entretien et la réparation des bateaux.

BRISE-LAMES : ouvrage de défense longitudinal des côtes, pour les protéger des actions de la mer en amortissant la houle. Il est constitué d'enrochements ou de blocs en béton.

CAISSON : structure en béton armé à section creuse monocellulaire ou multicellulaire, de forme carrée, rectangulaire, trapézoïdale, circulaire... Les caissons sont en général préfabriqués à terre, mis à l'eau, acheminés par flottaison, échoués à leur position définitive et ballastés (par remplissage d'eau ou de sable pour résister aux effets de la houle). Mis côte à côte, ils permettent de constituer des digues.

CALE DE HALAGE : plan incliné sur lequel on entretient à sec un bateau.

CALE DE LANCEMENT : plan incliné permettant de mettre à l'eau un bateau.

OUVRAGE DE DÉFENSE DE CÔTES : ouvrage destiné à protéger les côtes contre les effets de la houle.

DIGUE : ouvrage de protection des zones portuaires contre la houle et les courants. Elle est en général constituée d'un noyau en tout-venant, recouvert par des couches d'enrochements ou des blocs préfabriqués en béton de forme parallélépipédique ou des tétrapodes. Elle est surmontée généralement d'une dalle en béton qui facilite la circulation sur l'ouvrage. Une digue, selon sa conception, peut être accostable, insubmersible ou partiellement submersible.

ÉCLUSE : ouvrage permettant à un bateau de franchir des dénivellations. Elle est située entre deux plans d'eau de niveaux d'eau différents. Dans un aménagement portuaire, elle permet le passage des bateaux du niveau de la mer, qui peut être variable en fonction des

marées, à des bassins où le niveau d'eau est constant.

ÉPI : ouvrage de défense mis en place perpendiculairement à la côte. Il est constitué d'enrochements naturels ou de blocs préfabriqués en béton.

ENROCHEMENT ARTIFICIEL : bloc en béton préfabriqué. Les blocs peuvent être de forme parallélépipédique ou de forme adaptée pour améliorer leur imbrication (tétrapode). Ils sont utilisés pour la réalisation de digues, de brise-lames ou d'épis. Ils sont posés à l'aide d'élingues ou à la pince et forment la couverture extérieure d'un remblai en enrochement.

ESTACADE : ouvrage sur pieux constituant un appontement.

JARLAN : digue de protection des côtes, constituée de caissons en béton qui comportent des orifices permettant de dissiper l'énergie des vagues et de la houle.

JETÉE : ouvrage de protection d'un aménagement portuaire des effets de la houle et des courants.

MÔLE : ouvrage de protection de l'entrée d'un port.

MUR DE QUAI : situé en bordure de mer ou au sein d'un port, il permet l'accostage des bateaux et leur chargement ou déchargement. Il est constitué en général d'une ossature en béton armé fondée sur pieux supportant un hourdis en béton armé.

OUVRAGE D'ACCOSTAGE : ouvrage permettant aux navires de s'amarrer dans un port pour effectuer leur chargement ou déchargement.

PONTON : structure flottante permettant l'amarrage des bateaux dans un port.

QUAI : ouvrage servant à l'accostage des bateaux. Il peut être :

- massif, en béton coulé en place, en paroi moulée ou constitué de blocs ou de caissons en béton préfabriqué ;

- sur appui, constitué d'une plateforme en béton armé reposant sur des piles et des pieux en béton armé.

STRUCTURE OFF SHORE : structure située en mer dans une zone d'exploitation pétrolière.

TÉTRAPODE : bloc en béton préfabriqué, constitué de quatre parties de forme tronconique. Les tétrapodes sont utilisés pour la confection de quais ou de jetées.

WHARF : appontement perpendiculaire à la côte. ■

Source : Dico TP Arcature.

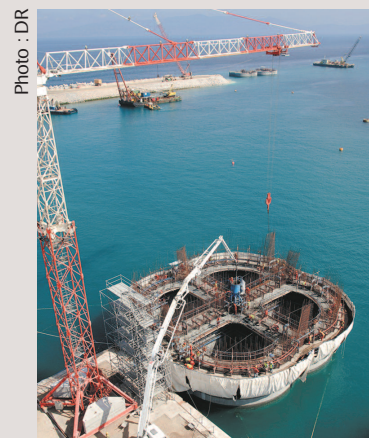


Photo : DR

Risques de corrosion des armatures en site maritime

MÉCANISMES DE CORROSION DES ARMATURES EN ACIER DANS LE BÉTON

Dans des conditions normales, les armatures enrobées d'un béton compact et non fissuré sont protégées naturellement des risques de corrosion par un phénomène de passivation qui résulte de la création, à la surface de l'acier, d'une pellicule protectrice $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{CaO}$ (dite de passivation). Cette protection est générée par l'action de la chaux libérée par les silicates de calcium sur l'oxyde de fer. La présence de chaux maintient la basicité du milieu entourant les armatures (l'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique de pH élevé de l'ordre de 12 à 13). Les armatures sont protégées tant qu'elles se trouvent dans un milieu présentant un pH supérieur à 9.

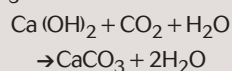
Deux principaux phénomènes peuvent dans certaines conditions détruire cette protection et initier la corrosion des armatures en acier :

- la carbonatation du béton d'enrobage par l'adsorption du gaz carbonique contenu dans l'atmosphère ;
- la pénétration des ions chlorures jusqu'au niveau des armatures.

La plus ou moins grande rapidité d'action de ces agents est fonction de l'humidité ambiante, de la porosité du béton et de la présence de fissures qui favorisent la diffusion des gaz ou des liquides agressifs.

CARBONATION

Le gaz carbonique contenu dans l'air a tendance à se combiner avec le Ca(OH)_2 , selon une réaction produisant du carbonate de calcium CaCO_3 :



La progression de ce phénomène de carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur. La vitesse de propagation est ralentie par la formation des carbonates qui colmatent partiellement la porosité. Elle diminue donc avec la profondeur atteinte. La carbonatation a pour conséquence une neutralisation (chute du pH de la solution interstitielle) du milieu de protection des armatures, qui peuvent alors s'oxyder. La cinétique du processus dépend de la teneur en dioxyde de carbone et de la facilité avec laquelle le gaz carbonique pénètre dans les pores du béton.

Cette progression est fonction de paramètres liés aux caractéristiques du béton (nature et dosage du ciment, dosage en eau, porosité et perméabilité) et au milieu environnant. Plus le béton est compact, le dosage en ciment élevé, le rapport eau/ciment (E/C) faible et la résistance du béton élevée, plus la progression du front de carbonatation est lente. Tout ce qui conduit à diminuer la porosité du béton retarde donc l'échéance de dépassivation des armatures.

L'humidité relative de l'air joue, en particulier, un rôle important : la vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité relative de l'ordre de 60 %, pratiquement nulle en atmosphère sèche ou pour des bétons complètement saturés en eau. L'alternance d'humidité et de séchage favorise le phénomène de carbonatation.

La cinétique et la profondeur de carbonatation d'un béton sont donc fonction de sa composition, de sa structure poreuse et de l'humidité relative dans laquelle est situé l'ouvrage. Elle dépend aussi de la

concentration en dioxyde de carbone et de la température de l'atmosphère environnante. Pour un béton courant, l'épaisseur de la couche carbonatée augmente proportionnellement à la racine carrée du temps.

La porosité totale du béton et la distribution de la taille des pores sont les paramètres déterminants pour la diffusivité du dioxyde de carbone.

L'augmentation de la compacité est obtenue en particulier en réduisant le rapport E/C. Ce rapport conditionne la perméabilité du béton donc l'interconnexion du réseau poreux et, par conséquent, la vitesse ainsi que la possibilité de diffusion des gaz et des ions dans le béton. La diminution du rapport E/C permet donc d'accroître la résistance du béton à la carbonatation. Une cure prolongée permet d'augmenter la résistance du béton à la pénétration du dioxyde de carbone en améliorant les propriétés de surface du béton.

ACTION DES CHLORURES

L'action des chlorures est spécifique à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton comme les ouvrages soumis aux sels de déverglaçage ou situés en site maritime (zone de marnage, surfaces soumises aux embruns...). Les ions chlorures peuvent pénétrer par diffusion ou migrer par capillarité à l'intérieur du béton, franchir la zone d'enrobage, atteindre les armatures, « dépassiver » l'armature acier et provoquer des corrosions d'abord ponctuelles (corrosion par piqûres) puis généralisées à toute la surface de l'acier (corrosion généralisée). La vitesse de pénétration des chlorures dépend en particulier de la porosité du béton. Elle décroît lorsque le rapport E/C diminue.

La dépassivation des armatures s'amorce dès que la teneur en chlorures au niveau des armatures atteint un certain seuil après avoir traversé la zone d'enrobage. Ce seuil est fonction du pH de la solution interstitielle et de la teneur en oxygène au niveau des armatures ; il est de l'ordre de 0,4 % par rapport au poids du ciment.

La pénétration des ions chlorures est maximale dans les zones de marnage qui sont soumises à des cycles d'humidification et de séchage.

EFFETS DE LA CORROSION

Le développement de la corrosion des armatures peut provoquer par gonflement une poussée au vide sur le béton d'enrobage (les oxydes de fer étant plus volumineux que l'acier, ils génèrent des contraintes internes dans le béton qui peuvent être supérieures à sa résistance en traction) et donc une altération de l'aspect extérieur de l'ouvrage (éclatement localisé, formation de fissures et d'épaufrures, apparition en surface de traces de rouille et éventuellement mise à nu de l'armature) et une réduction de la section efficace de l'armature et de son adhérence au béton.

Les enrobages et les caractéristiques des bétons préconisés dans les normes NF EN 206/CN et NF EN 1992-1-1 sont suffisants pour garantir la protection naturelle des aciers durant la durée d'utilisation de l'ouvrage, sous réserve d'une mise en œuvre soignée.

Toutefois, des défauts d'enrobage, des bétons mal vibrés et, de ce fait, trop poreux, ou des milieux très agressifs risquent de conduire à la dégradation prématurée des armatures en acier. ■

Ciments pour bétons en site maritime

Les ciments courants font l'objet de la norme NF EN 197-1 « Ciment – partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants ». Cette norme définit les constituants des ciments et les différents types de ciments courants. Elle fixe les classes de résistance, les spécifications mécaniques et physico-chimiques et précise les critères de conformité et les fréquences d'essais.

Les ciments courants font l'objet du marquage CE qui atteste de leur conformité à la partie harmonisée de la norme EN 197-1.

La marque NF, complémentaire du marquage CE, atteste que le ciment qui la porte est conforme au niveau de qualité requis par le marché

français, fonction des conditions climatiques et environnementales ainsi que des techniques de mise en œuvre.

Les ciments n'ont pas tous la même résistance face aux agressions chimiques. L'emploi de ciments présentant des caractéristiques adaptées de résistance à ces agressions est donc nécessaire. C'est le cas des ouvrages soumis à l'agression des chlorures présents dans l'eau de mer.

Pour les ouvrages en site maritime, les caractéristiques complémentaires normalisées des ciments font l'objet de la norme NF P 15-317 « Ciments pour travaux à la mer ». Ces ciments présentent des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C_3A) qui leur permettent de confé-

rer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfates en présence d'ions chlorures, au cours de la prise et ultérieurement. Ce sont :

- des CEM I et des CEM II qui possèdent des caractéristiques physiques et doivent respecter des spécificités chimiques complémentaires ;
 - des CEM III/A (si la teneur en laitier est supérieure à 60 %), B ou C et CEM V/A ou B qui sont naturellement qualifiés pour cet usage ;
 - des ciments prompts naturels (CNP) définis par la norme NF P 15-314 et des ciments alumineux fondus (CA) définis par la norme NF EN 14647.
- Ces ciments comportent la mention PM (Prise Mer) sur l'emballage ou le bon de livraison. Les spécificités des ciments PM portent sur la composi-

tion du clinker, sur une limitation de la proportion de constituants autres que le clinker, constituants secondaires (3 %) et additifs (0,1 %). ■

Réaction sulfatique interne

Pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne, toutes les parties des ouvrages sont à considérer en classe XH3. Le niveau de prévention associé est en général Cs, sauf pour les ouvrages considérés comme exceptionnels (de catégorie III) où il s'agira du niveau Ds.

Quelques principes de prévention

Malgré la complexité des réactions chimiques générées par les eaux en site maritime, l'application de quelques principes de prévention élémentaires respectés au niveau de la formulation du béton (dosage adéquat en ciment, faible E/C, béton compact et peu perméable), du choix du type d'armatures, de la conception de l'ouvrage et lors de sa réalisation (vibration, cure) permettant d'obtenir des bétons résistant durablement dans les milieux agressifs.

Une conception de l'ouvrage adaptée

L'ouvrage doit être conçu de manière à éviter, dans la mesure du possible, de créer des zones d'accumulations et de stagnations d'eau et des cheminements préférentiels dus aux ruissellements.

Une formulation à base d'un ciment adapté suffisamment dosé

Le respect des spécifications liées aux classes d'exposition, un dosage

suffisamment élevé en ciment (de type PM), un rapport E/C faible et le respect des exigences sur la composition chimique permettent de maîtriser les principales agressions.

Un béton compact et peu perméable

Les qualités intrinsèques du béton, sa compacité et sa perméabilité conditionnent sa durabilité. Le béton résiste d'autant mieux à l'action des eaux agressives que sa porosité, sa diffusivité (paramètre de résistance à la diffusion des ions agressifs) et sa perméabilité sont faibles.

Les principaux facteurs prépondérants au niveau de la formulation d'un béton pour obtenir une compacité élevée (donc une faible porosité) sont :

- un dosage en ciment adéquat ;
- une faible teneur en eau ;
- une granulométrie comportant des éléments fins, en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats.

Le respect des valeurs d'enrobage des armatures

Le respect des épaisseurs d'enrobage permet de maîtriser la corrosion des armatures de béton armé. L'utilisation d'armatures inox est une alternative très intéressante en particulier en zone de marnage.

Une mise en œuvre et une cure soignées

La vibration doit être adaptée et homogène. La cure (à appliquer dès

le décoffrage ou la fin du surfacage) doit être efficace afin d'éviter en particulier tout phénomène de dessiccation excessive du béton au jeune âge.

La température et l'humidité relative pendant la mise en œuvre du béton et les jours suivants sont des paramètres importants conditionnant les performances du béton. ■

Durée d'utilisation de projet

Les normes de dimensionnement Eurocodes accentuent la prise en compte de la durabilité des ouvrages en s'appuyant sur la notion de durée d'utilisation de projet. Ces durées sont définies dans la norme NF EN 1990 Tableau 2.1 (NF).

La durée d'utilisation de projet est la période au cours de laquelle la structure est censée rester normalement utilisable en étant entretenue, mais sans qu'il soit nécessaire de procéder à des réparations majeures.

Pour les ouvrages de Génie Civil, et en particulier pour les ouvrages situés en site maritime dont les travaux d'entretien et de maintenance sont délicats compte tenu des contraintes d'accessibilité, la durée d'utilisation de projet à prendre en compte est de 100 ans.

Choix des classes d'exposition

Les textes normatifs relatifs au béton prennent en compte la durabilité en s'appuyant sur la notion de classe d'exposition. Ils imposent au prescripteur de définir les actions dues à l'environnement auxquelles le béton de chaque partie d'ouvrage va être exposé pendant la durée d'utilisation de la structure.

La norme NF EN 206/CN, en conformité avec l'Eurocode 2 (norme NF EN 1992-1-1), définit 18 classes d'exposition regroupées par risque

de corrosion des armatures (XC, XD, XS) et d'attaques du béton (XF, XA) dépendant des actions et conditions environnementales auxquelles le béton est soumis.

Les classes d'exposition de chaque partie d'ouvrage sont une donnée de base du projet.

La norme NF EN 206/CN fixe, pour chaque classe d'exposition, les valeurs limites spécifiées applicables pour la composition et les propriétés du béton :

- rapport maximal eau efficace/liant équivalent ;
- dosage minimal en liant équivalent ;
- classe de résistance minimale à la compression du béton ;
- teneur minimale en air dans le béton (le cas échéant) ;
- type et classe de constituants permis.

Chaque béton d'une partie d'ouvrage peut être soumis simultanément à plusieurs classes d'exposition.

Le béton doit respecter toutes les valeurs limites applicables pour la composition et les propriétés du béton pour chaque classe d'exposition et donc la sélection des plus sévères exigences et spécifications.

Nota : les classes d'exposition relatives à la corrosion des armatures (XC1 à XC4, XD1 à XD3, XS1 à XS3) permettent aussi de dimensionner la valeur de l'enrobage des armatures. ■

OUVRAGES CÔTIERS ET AUTRES OUVRAGES À LA MER

Type d'ouvrages	Partie d'ouvrage	Corrosion par carbonatation	Corrosion par les chlorures marins	Corrosion induite par les chlorures autres que marins	Attaques gel/dégel	Attaques chimiques	Risque d'abrasion
Ouvrages de défense contre la mer et protection du littoral	Épis	XC4	XS3	—	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾ et ⁽⁹⁾
	Revêtement de talus (par dalles ou éléments préfabriqués)	XC4	XS3	—	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾ et ⁽⁹⁾
	Mur chasse-mer, poutre de tête, couronnement	XC4	XS3	—	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾
	Escaliers et rampes d'accès	XC4	XS3	—	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁵⁾	⁽⁷⁾ et ⁽⁸⁾
Ouvrages en mer : éoliennes, balises, tourelles, feux et phares en mer	Parties aériennes ou en zone de marnage	XC4	XS3	—	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾ , ⁽⁹⁾ et ⁽⁹⁾ en zone de marnage
	Partie immergée en permanence ⁽¹⁾⁽²⁾	XC1	XS2	—	—	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾
	Partie complètement enterrée	XC2	XS1	—	—	⁽⁵⁾	—
Structures flottantes, ouvrages off shore	Parties aériennes ou en zone de marnage	XC4	XS3	⁽³⁾	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁶⁾	⁽⁸⁾ , ⁽⁹⁾ et ⁽⁹⁾ en zone de marnage
	Partie immergée en permanence ⁽¹⁾⁽²⁾	XC1	XS2	⁽³⁾	—	⁽⁶⁾	⁽⁸⁾
Ouvrages de prise et rejet d'eau, émissaires	Partie complètement enterrée	XC2	XS1	⁽³⁾	—	⁽⁶⁾	⁽⁸⁾
	Parties aériennes ou en zone de marnage	XC4	XS3	⁽³⁾	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁶⁾	⁽⁸⁾
	Partie immergée en permanence ⁽¹⁾⁽²⁾	XC1	XS2	⁽³⁾	—	⁽⁶⁾	⁽⁸⁾

(1) – Les parties « immergées en permanence » des ouvrages sont celles dont on peut s'assurer qu'elles sont situées, pour toute la durée d'utilisation prévue de l'ouvrage, en dessous du niveau de la basse mer, de vive eau, sauf dans le cas des bassins à flot où cette limite est déterminée par le mode d'exploitation du plan d'eau.

(2) – Y compris éventuellement les parties d'ouvrage (ou corps morts d'amarrage) posées au fond.

(3) – Dans le cas de salage de l'ouvrage, ou d'utilisation de produits chlorés pour son exploitation, classe à choisir le cas échéant entre XD1, XD2 ou XD3.

(4) – Pour les ouvrages maritimes métropolitains, l'attaque gel/dégel concerne les parties aériennes ou les zones de marnage et correspond à XF1 en zone de gel faible ou modéré, sans salage ou avec salage peu fréquent, ou à XF2 en zone de gel modéré avec salage fréquent (plus de 10 jours par an). Pour le cas particulier de Saint-Pierre-et-Miquelon et des terres Australes et Antarctiques françaises, on retiendra la classe XF4 pour les parties d'ouvrage en zone de marnage ou d'embruns.

(5) – Classe d'exposition à choisir entre XA1, XA2 ou XA3 en fonction du niveau d'agressivité de l'eau de mer polluée et/ou des eaux souterraines pouvant être en contact avec l'ouvrage.

(6) – Classe d'exposition à choisir entre XA1, XA2 ou XA3 en fonction du niveau d'agressivité de l'eau de mer polluée, des eaux souterraines, et des marchandises, liquides ou produits pouvant être en contact avec l'ouvrage, en fonction de son utilisation prévue et du risque de pollution accidentelle.

(7) – Classe d'abrasion à choisir entre XM1, XM2 ou XM3 en fonction du niveau d'agressivité du trafic d'engins (cf. norme NF EN 1992-1-1 clause 4.4.1.2 (13)).

(8) – Risque d'abrasion à apprécier en fonction du niveau d'agressivité de la houle, des courants, des fluides circulant dans et autour de l'ouvrage, de la fréquence des tempêtes, des frottements d'amarres, des jets d'hélices, de la présence de sédiments, corps flottants ou matériaux abrasifs pouvant être mis en suspension, etc. La prévention du phénomène pourra s'appuyer sur la résistance à l'abrasion du matériau béton (obtenue par exemple par un faible rapport eau/ciment, la qualité des granulats, l'incorporation de fibres...) caractérisée éventuellement par des performances obtenues par des essais d'abrasion spécifiques. Dans le cas du béton armé, ce risque sera exprimé par le choix de la classe d'abrasion XM1, XM2 ou XM3 et la prévention de l'abrasion pourra en outre s'appuyer sur une épaisseur sacrificielle d'enrobage comme prévu par la clause 4.4.1.2 (13) de la norme NF EN 1992-1-1.

(9) – Ouvrage particulièrement exposé à l'abrasion induite par les matériaux et sédiments environnants.

OUVRAGES PORTUAIRES ET DIGUES

Type d'ouvrages	Partie d'ouvrage	Corrosion par carbonatation	Corrosion par les chlorures marins	Corrosion induite par les chlorures autres que marins	Attaques gel/dégel	Attaques chimiques	Risque d'abrasion
Parties communes à différents types d'ouvrages	Voies de grues	XC4	XS3	XD3 ⁽³⁾	XF1, XF2 si salage fréquent ⁽⁴⁾	⁽⁶⁾	⁽⁷⁾
	Dalles et revêtements armés de tous quais	XC4	XS3	XD3 ⁽³⁾	XF1, XF2 si salage fréquent ⁽⁴⁾	⁽⁶⁾	⁽⁷⁾
	Massifs bollards	XC4	XS3	XD3 ⁽³⁾	XF1, XF2 si salage fréquent ⁽⁴⁾	⁽⁶⁾	⁽⁷⁾
	Poutres de couronnement	XC4	XS3	XD3 ⁽³⁾	XF1, XF2 si salage fréquent ⁽⁴⁾	⁽⁶⁾	⁽⁷⁾ et ⁽⁸⁾
	Aqueducs	XC4	XS3	–	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾
Quai sur pieux	Pieux (partie aérienne ou en zone de marnage)	XC4	XS3	–	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁵⁾	–
	Partie des pieux immergée en permanence ⁽¹¹⁾	XC1	XS2	–	–	⁽⁵⁾	–
	Partie complètement enterrée des pieux	XC2	XS1	–	–	⁽⁵⁾	–
	Remplissage tubes métalliques ⁽⁹⁾	–	–	–	–	–	–
	Têtes de pieux	XC4	XS3	–	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁵⁾	–
	Poutres et béton de clavetage	XC4	XS3	–	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁵⁾	–
	Rideaux ou massifs d'ancrage	XC2	XS2	–	–	⁽⁵⁾	–
Duc-d'Albe	Partie aérienne ou en zone de marnage	XC4	XS3	–	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾
Quai caissons préfabriqués	Caissons	XC4	XS3	XD3 ⁽³⁾	XF1, XF2 si salage fréquent ⁽⁴⁾	⁽⁶⁾	⁽⁸⁾
Quai blocs	Fondations armées (partie immergée en permanence ⁽¹¹⁾)	XC1	XS2	–	–	⁽⁵⁾	–
	Fondations armées (parties totalement enterrées)	XC2	XS1	–	–	⁽⁵⁾	–
	Blocs non armés ⁽¹⁰⁾ (partie immergée en permanence ⁽¹¹⁾)	–	XS2 ⁽¹¹⁾	–	–	⁽⁵⁾	–
	Blocs non armés ⁽²⁾ (partie aérienne ou en zone de marnage)	–	XS3 ⁽¹¹⁾	–	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁵⁾	–
	Blocs armés	XC4	XS3	XD3 ⁽³⁾	XF1, XF2 si salage fréquent ⁽⁴⁾	⁽⁶⁾	⁽⁸⁾

(1) – Les parties « immergées en permanence » des ouvrages sont celles dont on peut s'assurer qu'elles sont situées, pour toute la durée d'utilisation prévue de l'ouvrage, en dessous du niveau de la basse mer, de vive eau, sauf dans le cas des bassins à flot où cette limite est déterminée par le mode d'exploitation du plan d'eau.

(2) – Béton non armé et sans pièces métalliques noyées. Pas de corrosion mais attaque chimique par l'eau de mer.

(3) – Dans le cas de salage fréquent ou très fréquent de l'ouvrage, ou d'utilisation de produits chlorés pour son exploitation.

(4) – Pour les ouvrages maritimes métropolitains, l'attaque gel/dégel concerne les parties aériennes ou les zones de marnage et correspond à XF1 en zone de gel faible ou modéré, sans salage ou avec salage peu fréquent, ou à XF2 en zone de gel modéré avec salage fréquent (plus de 10 jours par an). Pour le cas particulier de Saint-Pierre-et-Miquelon et des terres Australes et Antarctiques françaises, on retiendra la classe XF4 pour les parties d'ouvrage en zone de marnage ou d'embruns.

(5) – Classe d'exposition à choisir entre XA1, XA2 ou XA3 en fonction du niveau d'agressivité de l'eau de mer polluée et/ou des eaux souterraines pouvant être en contact avec l'ouvrage.

(6) – Classe d'exposition à choisir entre XA1, XA2 ou XA3 en fonction du niveau d'agressivité de l'eau de mer polluée, des eaux souterraines, et des marchandises, liquides ou produits pouvant être en contact avec l'ouvrage, en fonction de son utilisation prévue et du risque de pollution accidentelle.

(7) – Classe d'abrasion à choisir entre XM1, XM2 ou XM3 en fonction du niveau d'agressivité du trafic d'engins (cf. norme NF EN 1992-1-1 clause 4.4.1.2 (13)).

(8) – Risque d'abrasion à apprécier en fonction du niveau d'agressivité de la houle, des courants, des fluides circulant dans et autour de l'ouvrage, de la fréquence des tempêtes, des frottements d'amarres, des jets d'hélices, de la présence de sédiments, corps flottants ou matériaux abrasifs pouvant être mis en suspension, etc. La prévention du phénomène pourra s'appuyer sur la résistance à l'abrasion du matériau béton (obtenue par exemple par un faible rapport eau/ciment, la qualité des granulats, l'incorporation de fibres...) caractérisée éventuellement par des performances obtenues par des essais d'abrasion spécifiques. Dans le cas du béton armé, ce risque sera exprimé par le choix de la classe d'abrasion XM1, XM2 ou XM3 et la prévention de l'abrasion pourra en outre s'appuyer sur une épaisseur sacrificielle d'enrobage comme prévu par la clause 4.4.1.2 (13) de la norme NF EN 1992-1-1.

(9) – Pour ce béton non armé susceptible de relever de la classe X0, les spécifications (autres que la résistance minimale liée aux efforts à reprendre) sont données par le FD P 18-011.

(10) – Béton non armé et sous pièces métalliques noyées. Pas de corrosion mais attaque chimique par l'eau de mer.

(11) – En France, pour éviter l'attaque chimique du matériau béton dans le cas particulier de l'exposition à l'eau de mer, il est admis par le fascicule FD P 18-011, appelé par la norme NF EN 206/CN, d'appliquer les prescriptions de composition de la classe XS1 (parties exposées à l'air véhiculant du sel marin et, par interprétation de la norme, à l'infiltration des chlorures marins pour les parties enterrées), XS2 (béton immergé en permanence) ou XS3 (béton en zone de marnage et d'exposition aux embruns) des tableaux NAF de la norme NF EN 206/CN, que l'élément de béton soit armé ou non, et non les prescriptions de composition de la classe XA3 qui résulteraient de l'application du tableau 2 de la norme NF EN 206/CN. Pour le cas d'ouvrages au contact d'eau de mer polluée ou mélangée à d'autres eaux de surface, par exemple, une analyse est à effectuer au cas par cas vis-à-vis des attaques chimiques possibles.

Suite du tableau : OUVRAGES PORTUAIRES ET DIGUES

Type d'ouvrages	Partie d'ouvrage	Corrosion par carbonatation	Corrosion par les chlorures marins	Corrosion induite par les chlorures autres que marins	Attaques gel/dégel	Attaques chimiques	Risque d'abrasion
Quai paroi moulée	Parois moulées (partie aérienne ou en zone de marnage)	XC4	XS3	–	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾
	Parois moulées (partie immergée en permanence ⁽¹¹⁾)	XC1	XS2	–	–	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾
	Parois moulées (parties complètement enterrées)	XC2	XS1	–	–	⁽⁵⁾	–
	Rideaux ou massifs d'ancrage	XC2	XS2	–	–	⁽⁵⁾	–
Écluse	Radier	XC2	XS2	–	–	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾
	Murs et bajoyers	XC4	XS3	–	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾
Forme de radoub	Radier, mur de tête et bajoyers	XC4	XS3	–	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁵⁾	⁽⁷⁾ et ⁽⁸⁾
Digues	Blocs béton préfabriqués de carapace ⁽¹⁰⁾ (partie immergée en permanence ⁽¹¹⁾)	–	XS2 ⁽¹¹⁾	–	–	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾
	Blocs béton préfabriqués de carapace ⁽¹⁰⁾ (partie aérienne ou en zone de marnage)	–	XS3 ⁽¹¹⁾	–	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾
	Caissons : partie immergée en permanence ⁽¹¹⁾	XC1	XS2	–	–	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾
	Caissons : partie aérienne ou en zone de marnage	XC4	XS3	–	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾
	Mur de couronnement/mur chasse-mer	XC4	XS3	–	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾
	Chaussées et dalles non armées des quais	XC4	XS3	–	XF1 ⁽⁴⁾	⁽⁵⁾	⁽⁷⁾

(1) – Les parties « immergées en permanence » des ouvrages sont celles dont on peut s'assurer qu'elles sont situées, pour toute la durée d'utilisation prévue de l'ouvrage, en dessous du niveau de la basse mer, de vive eau, sauf dans le cas des bassins à flot où cette limite est déterminée par le mode d'exploitation du plan d'eau.

(4) – Pour les ouvrages maritimes métropolitains, l'attaque gel/dégel concerne les parties aériennes ou les zones de marnage et correspond à XF1 en zone de gel faible ou modéré, sans salage ou avec salage peu fréquent, ou à XF2 en zone de gel modéré avec salage fréquent (plus de 10 jours par an). Pour le cas particulier de Saint-Pierre-et-Miquelon et des terres Australes et Antarctiques françaises, on retiendra la classe XF4 pour les parties d'ouvrage en zone de marnage ou d'embruns.

(5) – Classe d'exposition à choisir entre XA1, XA2 ou XA3 en fonction du niveau d'agressivité de l'eau de mer polluée et/ou des eaux souterraines pouvant être en contact avec l'ouvrage.

(7) – Classe d'abrasion à choisir entre XM1, XM2 ou XM3 en fonction du niveau d'agressivité du trafic d'engins (cf. norme NF EN 1992-1-1 clause 4.4.1.2 (13)).

(8) – Risque d'abrasion à apprécier en fonction du niveau d'agressivité de la houle, des courants, des fluides circulant dans et autour de l'ouvrage, de la fréquence des tempêtes, des frottements d'amarres, des jets d'hélices, de la présence de sédiments, corps flottants ou matériaux abrasifs pouvant être mis en suspension, etc. La prévention du phénomène pourra s'appuyer sur la résistance à l'abrasion du matériau béton (obtenue par exemple par un faible rapport eau/ciment, la qualité des granulats, l'incorporation de fibres...) caractérisée éventuellement par des performances obtenues par des essais d'abrasion spécifiques. Dans le cas du béton armé, ce risque sera exprimé par le choix de la classe d'abrasion XM1, XM2 ou XM3 et la prévention de l'abrasion pourra en outre s'appuyer sur une épaisseur sacrificielle d'enrobage comme prévu par la clause 4.4.1.2 (13) de la norme NF EN 1992-1-1.

(10) – Béton non armé et sans pièces métalliques noyées. Pas de corrosion mais attaque chimique par l'eau de mer.

(11) – En France, pour éviter l'attaque chimique du matériau béton dans le cas particulier de l'exposition à l'eau de mer, il est admis par le fascicule FD P 18-011, appelé par la norme NF EN 206/CN, d'appliquer les prescriptions de composition de la classe XS1 (parties exposées à l'air véhiculant du sel marin et, par interprétation de la norme, à l'infiltration des chlorures marins pour les parties enterrées), XS2 (béton immergé en permanence) ou XS3 (béton en zone de marnage et d'exposition aux embruns) des tableaux NAF de la norme NF EN 206/CN, que l'élément de béton soit armé ou non, et non les prescriptions de composition de la classe XA3 qui résulteraient de l'application du tableau 2 de la norme NF EN 206/CN. Pour le cas d'ouvrages au contact d'eau de mer polluée ou mélangée à d'autres eaux de surface, par exemple, une analyse est à effectuer au cas par cas vis-à-vis des attaques chimiques possibles.

Classes d'abrasion

Le risque d'abrasion est pris en compte par le choix de la classe d'abrasion XM1, XM2 ou XM3. La prévention de l'abrasion conduit à augmenter l'enrobage minimal C_{\min} d'une valeur k_i .

Description des classes d'abrasion

Classe d'abrasion	Description	k_i
XM1	Abrasion modérée, telle celle des éléments de site industriel soumis à la circulation de véhicules équipés de pneumatiques.	$k_1 = 5 \text{ mm}$
XM2	Abrasion importante, telle celle des éléments de site industriel soumis à la circulation de chariots élévateurs équipés de pneumatiques ou de bandages en caoutchouc plein.	$k_2 = 10 \text{ mm}$
XM3	Abrasion extrême, telle celle des éléments de site industriel soumis à la circulation de chariots élévateurs équipés de pneumatiques ou de bandages en élastomère ou métalliques ou d'engins.	$k_3 = 15 \text{ mm}$