

Les bétons et les ouvrages 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.



Chantier en site maritime.

■ Particularités des ouvrages en béton en site maritime

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-lame), 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...

Les ouvrages peuvent être coulés en place, à l'air libre

ou sous l'eau, ou constitués de produits préfabriqués en béton. Le béton peut être armé ou précontraint.

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.

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 niveaux
- Agressions liées aux vents, aux taux élevés d'humidité et à l'ensoleillement

De plus, les structures sont souvent complexes, parfois fortement ferraiillées, et doivent souvent 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 niveaux 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, "autoplacement", 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,
- la zone de marnage,
- 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.

■ TERMINOLOGIE

- **APPONTEMENT** : Ouvrage d'accostage permettant le chargement et le déchargement des navires.
- **BASSIN DE RADOUB, FORME DE RADOUB ou CALE SECHE** : Bassin étanche, mis à sec par vidange, permettant l'entretien et la réparation des bateaux.
- **BRISE-LAME** : 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 DEFENSE DE COTE** : 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.
- **ECLUSE** : 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.
- **EPI** : 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-lame 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.
- **JETEE** : Ouvrage de protection d'un aménagement portuaire des effets de la houle et des courants.
- **MOLE** : Ouvrage de protection de l'entrée d'un port.
- **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 préfabriqués,
 - 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.
- **TETRAPODE** : 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.

■ Détermination des classes d'exposition

● Notions de classes d'exposition

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

La détermination des classes d'exposition permet d'optimiser les performances du béton et sa durabilité en sélectionnant avec précision les formulations, les caractéristiques et les propriétés parfaitement adaptées aux environnements dans lesquels il va se trouver.

Les classes d'exposition de chaque partie d'ouvrage sont une donnée de base du projet. Elles sont imposées par les conditions d'environnement du projet.

La norme NF EN 206-1, en conformité avec l'Eurocode 2 (norme NF EN 1992-1-1), définit [article 4.1 : Classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement] 18 classes d'exposition regroupées par risque de corrosion (XC, XD, XS) et d'attaques (XF, XA) dépendant des actions et conditions environnementales auxquelles le béton est soumis.

La norme décrit, pour chaque classe d'exposition, l'environnement et le type de béton concerné et donne à titre informatif des exemples d'ouvrages ou de parties d'ouvrages.



Blocs en béton préfabriqués pour la confection de digues et de quais.

Classes d'exposition		
	X0	Aucun risque de corrosion ou d'attaque
Risque de corrosion	XC	Corrosion induite par carbonatation
	XD	Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine
	XS	Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer
Attaques	XF	Attaques gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage
	XA	Attaques chimiques

A chaque classe d'exposition correspondent des spécifications sous forme d'exigences minimales à respecter.

Les spécifications concernent en particulier la nature et le dosage minimal en ciment, la valeur maximale du rapport, la valeur maximale du rapport Eau/Liant_{équivalent}, la classe de résistance du béton, la teneur maximale en chlorures ainsi que l'enrobage des armatures.

● Détermination des classes d'exposition

La détermination rigoureuse des classes d'exposition auxquelles est soumis le béton nécessite une analyse par étapes successives de l'ensemble des actions environnementales potentielles. Cette démarche peut être décomposée en cinq étapes.

Etape 1 : prise en compte des conditions climatiques.

Etape 2 : prise en compte de la localisation géographique de l'ouvrage par rapport à la mer.

Etape 3 : prise en compte de l'exposition du béton à l'air et à l'humidité.

Etape 4 : prise en compte de l'action des chlorures d'origine autre que marine.

Etape 5 : prise en compte du contact avec le sol et des eaux de surface ou souterraines.

SYNOPTIQUE POUR LA DETERMINATION DES CLASSES D'EXPOSITION

Actions environnementales	Classes d'exposition
Prise en compte des conditions climatiques	Attaques gel/dégel avec ou sans agents de déverglaçage XF1, XF2, XF3, XF4
Prise en compte de la localisation géographique de l'ouvrage par rapport à la mer	Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer XS1, XS2, XS3
Prise en compte de l'exposition du béton à l'air et à l'humidité	Corrosion induite par carbonatation XC1, XC2, XC3, XC4
Prise en compte de l'action des chlorures d'origine autre que marine	Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine XD1, XD2, XD3
Prise en compte du contact avec le sol et des eaux de surface ou souterraines	Attaques chimiques XA1, XA2, XA3

● Valeurs limites pour la composition et les propriétés du béton

La norme NF EN 206-1 fixe dans une annexe informative les valeurs limites spécifiées applicables pour la composition et les propriétés du béton. L'Annexe Nationale de la norme NF EN 206-1 complète ces dispositions par des valeurs limites applicables en France et rend celles-ci normatives dans deux tableaux (NA.F.1 et NA.F.2).

La résistance du béton aux diverses conditions environnementales auxquelles il est soumis pendant la durée d'utilisation prévue de la structure impose pour chaque classe d'exposition le respect d'exigences, en particulier sur la composition et les caractéristiques du béton.

Les exigences relatives à chaque classe d'exposition doivent être spécifiées en termes de :

- 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.

● Attaques gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage

La norme NF EN 206-1 définit 4 classes d'exposition (XF1, XF2, XF3 ou XF4) pour les bétons soumis à une attaque significative des cycles gel/dégel avec ou sans agents de déverglaçage.

Nota : les bétons situés en site maritime en France métropolitaine sont soumis à la classe d'exposition XF1 : Gel faible ou modéré sans agent de déverglaçage.

● Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer

La classe XS est relative à la corrosion des armatures induite par les chlorures présents dans l'eau de mer. Elle

concerne donc, selon la norme NF EN 206-1, les bétons contenant des armatures soumis au contact des chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin.

Tous les ouvrages situés à proximité des côtes (moins de 5 km) ou les structures marines sont donc concernées par ce type d'actions environnementales.

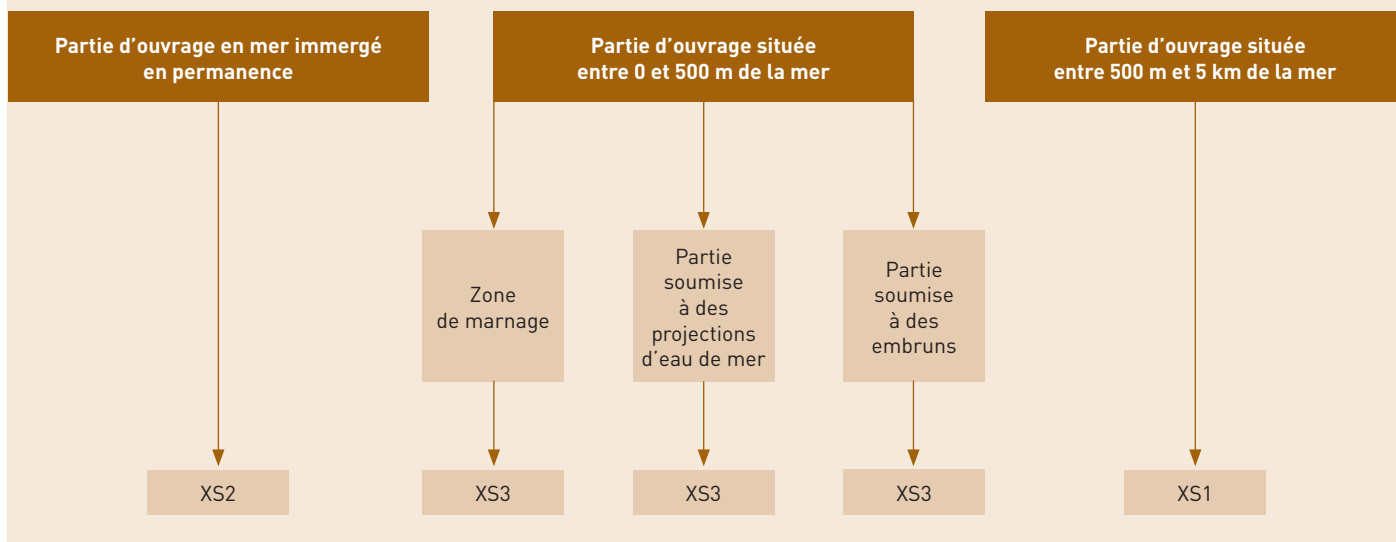
Classes d'exposition XS1 / XS2 / XS3

	Description de l'environnement	Exemples informatifs
XS1	Exposés à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact directement avec l'eau de mer	Structures sur ou à proximité d'une côte
XS2	Immergé en permanence	Eléments de structures marines
XS3	Zone de marnage Zone soumise à des projections ou à des embruns	Eléments de structures marines

L'Annexe Nationale de la norme NF EN 1992-1-1 (Eurocode 2. Calcul des structures en béton – Règles générales et règles pour les bâtiments) précise Section 4 : Durabilité et enrobage des armatures en conformité avec la norme NF EN 206-1, quelques données complémentaires sur les conditions d'environnement et la détermination de la classe d'exposition en particulier.

- Sont à classer en XS3 les éléments de structures en zone de marnage et/ou exposés aux embruns lorsqu'ils sont situés à moins de 100 m de la côte, parfois jusqu'à 500 m, suivant la topographie particulière des lieux.
- Sont à classer en XS1 les éléments de structures situés au-delà de la zone de classement XS3 et situés à moins de 1 km de la côte, parfois plus, jusqu'à 5 km, lorsqu'ils sont exposés à un air véhiculant du sel marin, suivant la topographie particulière.

SYNOPTIQUE DE PRISE EN COMPTE DES CHLORURES PRESENTS DANS L'EAU DE MER – CLASSE XS



Nota : les bétons situés en site maritime sont concernés uniquement par les classes d'exposition XS2 et XS3.

● Corrosion induite par carbonatation

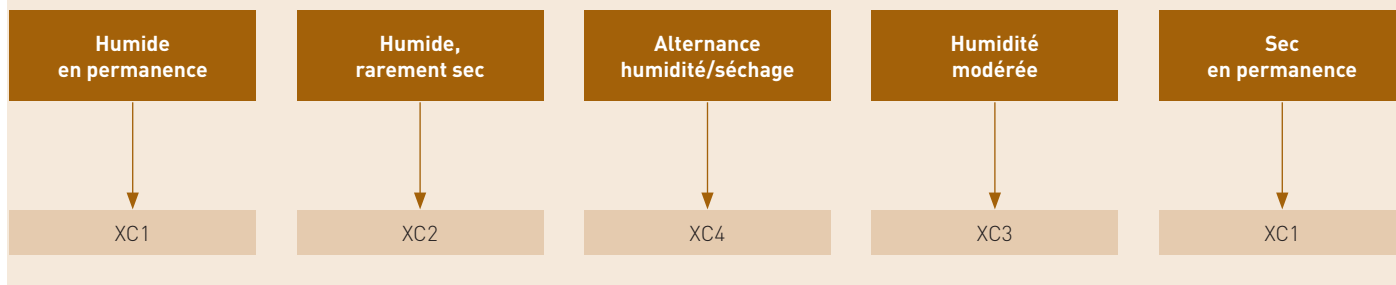
La carbonatation du béton est prise en compte par la classe d'exposition XC, **Corrosion induite par carbonatation**. Les classes XC1 à XC4 prennent en compte l'exposition du béton à l'air et à l'humidité en distinguant le degré d'humidité de l'environnement et l'alternance d'humidité et de séchage.

La vitesse de carbonatation est :

- faible si l'environnement est toujours sec ou toujours humide (classes XC1 et XC2),
- forte s'il y a alternance d'humidité et de séchage (classes XC3 et XC4).

Classes d'exposition XC1 / XC2 / XC3 / XC4		
	Description de l'environnement	Exemples informatifs pour les ouvrages en site maritime
XC1	Sec ou humide en permanence	<ul style="list-style-type: none"> • Béton submergé en permanence dans l'eau
XC2	Humide, rarement sec	<ul style="list-style-type: none"> • Surfaces de béton soumises au contact à long terme de l'eau • Fondations
XC3	Humidité modérée	<ul style="list-style-type: none"> • Béton extérieur abrité de la pluie
XC4	Alternance d'humidité et de séchage	<ul style="list-style-type: none"> • Surfaces soumises au contact de l'eau mais n'entrant pas dans la classe d'exposition XC2 • Béton extérieur exposé à la pluie

SYNOPTIQUE DE PRISE EN COMPTE DE L'EXPOSITION A L'AIR ET A L'HUMIDITE - CLASSE XC



Nota : les bétons situés en site maritime ne sont concernés que par les classes d'exposition XC2 et XC4.

● Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine

Lorsque le béton contenant des armatures est soumis au contact d'une eau contenant des chlorures (d'origine autre que marine) ou des sels de déverglaçage, il fait l'objet de la classe d'exposition XD, **Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine**, décomposée en 3 classes XD1 à XD3, en fonction du type d'humidité.

Nota : les bétons situés en site maritime ne sont pas concernés par ces classes d'exposition.

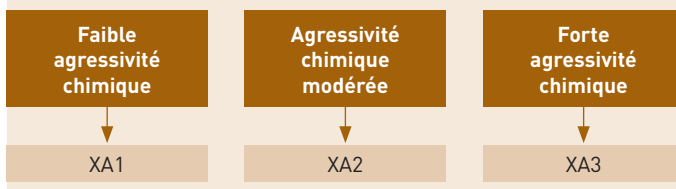
● Attaques chimiques

Lorsque le béton est au contact d'un sol naturel, des eaux de surface ou des eaux souterraines, il peut faire l'objet, selon le niveau d'agressivité du sol et des eaux, à l'une des classes : XA1, XA2 et XA3 correspondant respectivement à des environnements à faible, modérée ou forte agressivité chimique.

Le tableau 2 de la norme NF EN 206-1 définit les valeurs limites correspondant aux attaques chimiques des sols naturels (SO_4^{2-} , acidité) et des eaux de surfaces et souterraines (SO_4^{2-} , pH, CO_2 , NH_4^+ , Mg^{2+}). Ce tableau permet de déterminer la classe d'exposition en fonction des caractéristiques chimiques correspondant à l'agressivité la plus élevée.

Le Fascicule de Documentation FD P 18-011 "Définition et classification des environnements agressifs" fournit des recommandations complémentaires des exigences de la norme NF EN 206-1 pour les bétons soumis aux environnements chimiques agressifs.

SYNOPTIQUE DE PRISE EN COMPTE DES ATTAQUES CHIMIQUES – CLASSE XA



Nota : les bétons situés en site maritime peuvent dans certains cas être concernés par les classes d'exposition XA1, XA2, XA3 lorsqu'ils sont au contact d'eaux ou de sols pollués, ou avec des eaux de ruissellement issues des plateformes portuaires de stockage de produits chimiques par exemple.

● Combinaison des classes d'exposition

Chaque béton d'une partie d'ouvrage peut être soumis simultanément à plusieurs actions environnementales.

Il convient donc, pour chaque partie d'ouvrage, de déterminer la combinaison des classes d'exposition pour prendre en compte avec précision l'ensemble des conditions environnementales auxquelles est soumis le béton.

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**.

● Incidence de la classe d'exposition sur les seuils d'ouverture des fissures

Aux états limites de service, les seuils d'ouverture des fissures sont fonction de la classe d'exposition.

Valeurs recommandées de W_{max} (mm), ouverture des fissures en fonction de la classe d'exposition

Classes d'exposition	Éléments en béton armé et éléments en béton précontraint à armatures non adhérentes	Éléments en béton précontraint avec armatures adhérentes
	Combinaison quasi-permanente des charges	Combinaison fréquente des charges
X0, XC1	0,4	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2
XD1, XD2, XD3, XS1, XS2, XS3	0,2	décompression

Extrait du tableau 7.1 de l'annexe nationale de la norme NF EN 1992-1-1.

Nota : ces valeurs doivent être respectées pour assurer la durabilité de la structure. Des exigences spécifiques complémentaires peuvent être nécessaires pour des ouvrages devant par exemple être étanches à l'eau.

■ Risques de corrosion et attaques sur les bétons en site maritime

● Mécanismes de corrosion des armatures 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 pour 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 pellicule est formée 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 compris entre 9 et 13.

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 divers 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 les composés hydratés, en commençant par les bases alcalines dissoutes dans la solution aqueuse interstitielle, en particulier le $\text{Ca}(\text{OH})_2$, selon une réaction produisant du carbonate de calcium CaCO_3 :



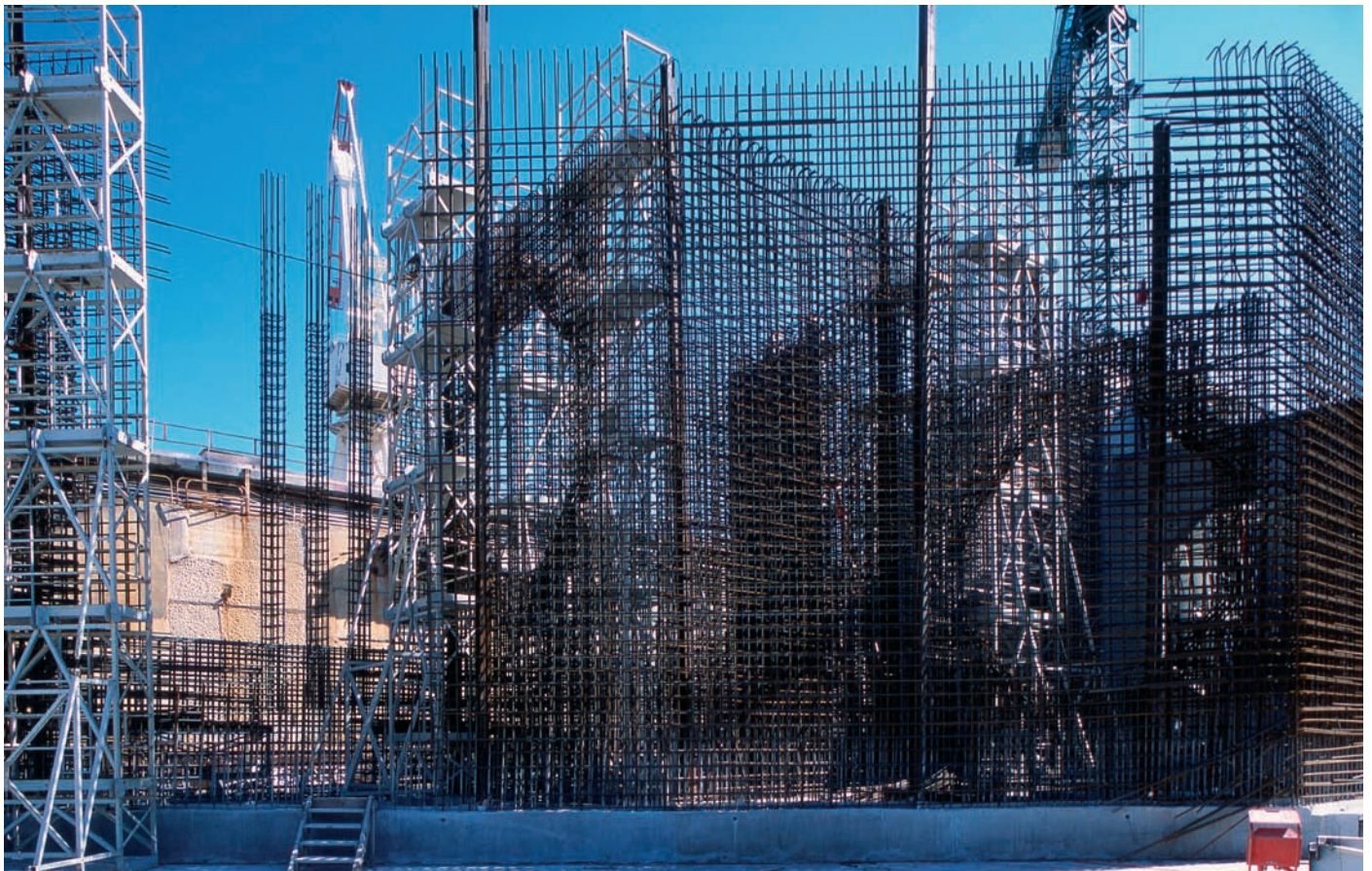
La progression de ce phénomène de carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur. Dans un premier temps, la vitesse de propagation est ralentie par la formation des carbonates qui colmatent partiellement la porosité. Elle diminue donc avec la profondeur atteinte. Dans un second temps, 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 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 dépassement 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 environnant. Pour un béton courant, l'épaisseur de la couche carbonatée augmente proportionnellement à la racine carrée du temps.



De nombreuses études ont démontré que la migration du dioxyde de carbone à travers la texture poreuse du béton est significativement réduite lorsque la compacité du béton d'enrobage est augmentée. 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 (par mécanisme de dissolution du métal suivant une réaction d'oxydoréduction : métal \rightarrow ions métal M^{n+} + n électrons), 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 eau/ciment diminue.

La corrosion des armatures s'amorce dès que la teneur en chlorures au niveau des armatures atteint un certain seuil de dépassivation. 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 à 0,5 % par rapport au poids du ciment. Il est atteint plus rapidement si le béton est carbonaté.

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, formation 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.

En règle générale, dans des milieux peu agressifs, les enrobages et les caractéristiques des bétons (compacité, homogénéité, résistance) préconisés sont suffisants pour garantir la protection naturelle des armatures durant la durée d'utilisation escomptée de l'ouvrage. 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.

Les enrobages et les caractéristiques des bétons préconisés dans les normes NF EN 206-1 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.

● Actions de l'eau de mer sur le 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 et 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 206-1 étend cette zone jusqu'à 1 km de la côte,
- soumises à l'air véhiculant du sel marin uniquement.

■ COMPOSITION DE L'EAU DE MER

La salinité des mers ou des océans peut être très variable, de quelques grammes par litre à plus de 200 g/l. La salinité des grands océans est de l'ordre de 35 g/l.

Composition moyenne d'un litre d'eau de mer

NaCl	27,20 g
MgCl ₂	3,80 g
MgSO ₄	1,65 g
CaSO ₄	1,25 g
Na ₂ SO ₄	0,85 g

soit au total 35 g

Le principal sel dissous dans l'eau de mer est le chlorure de sodium, puis viennent le chlorure de magnésium et les sulfates.

Indépendamment de leurs caractéristiques propres, la résistance des bétons est donc variable en fonction du type d'exposition au milieu marin et du degré d'immersion.

Les divers chlorures dissous dans l'eau de mer, en particulier les chlorures de magnésium (MgCl₂) et les chlorures de calcium (CaCl₂), génèrent des réactions chimiques agressives pour les bétons qui se traduisent par une dissolution de la chaux et une précipitation d'ettringite (cristallisation de sels expansifs, décalcification, précipitation de composés insolubles, attaques ioniques, dissolution de la portlandite, etc.).

Les solutions de sulfate de magnésium sont plus agressives vis-à-vis du béton que les solutions de sulfate de sodium. La portlandite présente dans les hydrates est attaquée par le sulfate de magnésium pour former dans le béton du gypse secondaire Ca SO₄ · 2H₂O et de la brucite Mg (OH)₂. Ce gypse secondaire se dissout en partie en augmentant la porosité du béton. Les ions Mg²⁺ réagissent aussi avec les CSH.

La réaction avec l'aluminate de calcium hydraté provenant du C₃A forme de l'ettringite C₃A, 3Ca SO₄, 32 H₂O. Cette ettringite cristallise avec une augmentation de volume importante, d'où l'apparition de fissures qui accélèrent le mécanisme de destruction.

Le chlorure de magnésium MgCl₂ est le chlorure le plus agressif. Il réagit avec la portlandite pour donner du chlorure de calcium CaCl₂ en partie soluble, qui augmente la porosité du béton. L'autre partie réagit avec l'aluminate de chaux hydraté pour former des chloroaluminates 3CaO, Al₂O₃, Ca Cl₂, 10 H₂O (sel de Friedel). Ce sel, également expansif, entraîne la fissuration du béton.

Les ions CO₂, en présence de silice active, transforment l'ettringite en thaumasite Ca CO₃, Ca SO₄, Ca SiO₄, 15H₂O ce qui entraîne des risques d'expansion et fissuration. Dans certains cas particuliers, la teneur en CO₂ peut être élevée et l'eau de mer devient alors très agressive. Ceci se produit dans les eaux d'estuaires ou de baies fermées où l'accumulation de matières organiques entraîne une concentration plus forte en CO₂.

■ Caractéristiques des ciments pour les 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 en fonction des conditions climatiques et environnementales ainsi que des techniques de mise en œuvre.

Pour certains types d'ouvrages, des propriétés complémentaires des ciments peuvent être requises ; elles font l'objet de normes spécifiques.

Les ciments n'ont pas tous la même résistance face aux agressions chimiques liées à l'environnement marin ; l'emploi de ciments présentant des caractéristiques adaptées de résistance à ces agressions est donc nécessaire.

● Ciments pour travaux à la mer PM

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 (C₃A) qui leur permettent de conférer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence d'ions chlorure, au cours de la prise et ultérieurement.

Les ciments pour travaux à la mer 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 composition du clinker, sur une limitation de la proportion de constituants autres que le clinker, des constituants secondaires (3 %) et d'additifs (0,1 %).

● Ciment prompt naturel

Ce ciment fait l'objet de la norme NF P 15-314.

Ses constituants lui confèrent des propriétés particulières de prise et de durcissement rapides, de quelques minutes à une ½ heure et de résistances aux acides, aux sulfates et à l'eau de mer. Le ciment prompt naturel est agréé Prise Mer selon la norme NF P 15-317.

Les résistances en compression sont faibles à court terme (minimum garanti de 19 MPa à 28 jours) mais progressent pendant plusieurs années, avec la compacité du béton, assurant une excellente durabilité.

En pratique, ce ciment, peu utilisé pour les bétons de structure, a des propriétés très intéressantes pour les travaux urgents : colmatage de fissures, aveuglement de voies d'eau, scellements, calages, travaux entre deux marées, enduits imperméables, etc.

La formulation d'un béton de ciment prompt diffère peu de celle des bétons courants. La modulation du temps de prise s'effectue par ajout d'acide citrique (les retardateurs pour ciment Portland ne sont pas efficaces avec ce ciment). Le dosage est plus élevé ; il est compris entre 500 et 600 kg/m³.

● Ciment sursulfaté

Le ciment sursulfaté (CSS) est un ciment ternaire au laitier, constitué de laitier de haut fourneau ($\geq 80\%$), de sulfate de calcium ($\leq 20\%$) et d'un système d'activation. Le processus d'hydratation de ce ciment permet la stabilisation de l'ettringite et la consommation totale de portlandite. Le ciment sursulfaté présente ainsi une très bonne résistance vis-à-vis des attaques chimiques.

L'ensemble des performances du ciment sursulfaté offre une plus grande durabilité aux ouvrages pour lesquels les critères – tels que la résistance aux sulfates et aux acides, la résistance à la pénétration des chlorures, la prévention de la RAG – sont des facteurs essentiels ; le coefficient de diffusion des ions chlorures est exceptionnellement faible. Ce ciment génère une chaleur d'hydratation extrêmement faible, surtout non négligeable pour la réalisation de bétons de masse.

La norme de référence est la NF P 15-313 "Ciment sursulfaté". Le ciment sursulfaté répond aussi aux spécifications des normes NF P 15-317 "Ciments pour travaux à la mer" ("PM") et NF P 15-319 "Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates" ("ES").

Les dosages varient de 320 à 500 kg/m³, en privilégiant de fortes réductions d'eau par l'intermédiaire d'un superplastifiant approprié.

Les résistances à la compression aux jeunes âges sont inférieures à un ciment traditionnel mais, à 28 jours et plus, progressent sensiblement de façon à égaler et dépasser ce dernier.

En sites maritimes et assimilés, les réalisations ont été des radoubes, radiers, bajoyers, digues, quais, dalles flottantes, barrages...

● Ciment alumineux fondu

Ce ciment fait l'objet, depuis décembre 2006, de la norme NF EN 14647 "Ciment d'aluminates de calcium - Composition, spécifications et critères de conformité" en remplacement de la norme NF P 15-315 "Ciment Alumineux Fondu". Sa chimie, très différente des ciments courants, fait de lui un ciment "Prise Mer", selon la norme NF P 15-317, ayant une prise normale et un durcissement rapide. Ces qualités permettent de l'utiliser pour des travaux à la mer, pour des ouvrages neufs ou devant être réparés. Dans les deux cas, il permet des réalisations rapides et immédiatement durables.

De nombreux ouvrages construits entre les deux guerres mondiales montrent à quel point les bétons de ciment alumineux sont durables, notamment dans leur partie la plus critique : la zone de marnage.

Le ciment alumineux fondu est fréquemment employé pour la remise en état d'ouvrage entre deux marées hautes. La résistance mécanique se développe très rapidement, on atteint typiquement 10 à 20 MPa à 4 heures, avec un temps ouvert d'environ 1 heure obtenu sans adjuvant. Il est donc possible, avec un bon séquençage du chantier, de bétonner à marée basse et d'avoir un béton durci avant la marée haute.

Du fait de sa chimie et de sa minéralogie particulière, expliquant entre autre l'absence de portlandite, le ciment d'aluminates de calcium est communément employé pour la réalisation d'ouvrages exposés à la corrosion chimique.

Par ailleurs, parce que le clinker est d'une grande dureté, le ciment alumineux permet également d'obtenir des bétons qui résistent mieux à l'usure à granulats analogues. En utilisant des granulats ALAG® synthétiques, il est possible d'atteindre une résistance à l'usure, de plusieurs fois supérieure.

Le ciment alumineux est utilisable en béton, ou en mortier, en appliquant les principes généraux de préparation et de mise en œuvre des bétons de ciment courant. Des précautions doivent être prises pour éviter les mélanges avec du ciment Portland non durci ou tout autre source de chaux.

Le dosage généralement recommandé est de 400 kg/m³ avec un E/C $\leq 0,40$, à moduler en fonction des performances visées. Comme le rappelle l'annexe "A" de la norme NF EN 14647, la formulation doit être établie en fonction des exigences de résistance mécanique et de durabilité, en tenant compte du phénomène de conversion des hydrates.

Il est possible de modifier le temps de prise de ces bétons en utilisant des adjuvants, après avoir fait un test préalable, car à dosage égal les effets de ces produits peuvent être différents de ceux habituellement constatés avec des bétons de ciment Portland. Cependant, pour les bétons dans la zone de marnage, on évitera d'utiliser un retardateur pour ne pas compromettre le durcissement rapide avant le recouvrement par la marée montante.

■ 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.

■ Spécifications des bétons coulés en place

La démarche pour définir les spécifications des bétons consiste à décomposer l'ouvrage en parties d'ouvrage et, pour chaque partie d'ouvrage, à déterminer la combinaison des classes d'exposition auxquelles elle est soumise.

A chaque partie d'ouvrage est associée un Béton à Propriétés Spécifiées (BPS) satisfaisant aux exigences de la combinaison des classes d'exposition auxquelles elle est soumise pendant sa durée d'utilisation.

Les spécifications des BPS sont définies dans l'article 6.2 de la norme NF EN 206-1.

• Exemple de parties d'ouvrage

- Pieux
- Semelles de fondation
- Poutres
- Bloc en béton
- Mur de quai...



• Localisation des différentes parties d'ouvrage
Selon sa position dans l'ouvrage, chaque partie d'ouvrage peut être localisée en fonction de son environnement :

- Béton totalement immergé
- Béton partiellement immergé
- Béton en zone de marnage
- Béton exposé à l'air véhiculant du sel marin
- Béton en contact avec le sol...

• Classes de teneurs en chlorures

La norme NF EN 206-1 définit (article 5.2.7 et NA 5.2.7) les teneurs maximales en ions chlorure du béton à respecter en fonction de son type d'utilisation. Elle définit quatre classes de teneur : Cl 1,0 / Cl 0,4 / Cl 0,2 / Cl 0,1. Une cinquième classe a été introduite dans l'Annexe Nationale de la norme NF EN 206-1 : la classe Cl 0,65. Les classes de chlorures permettent d'adapter la composition du béton en fonction des risques de corrosion des armatures.

Classes de chlorures					
Classes de chlorures	Cl 1,0	Cl 0,65	Cl 0,40	Cl 0,20	Cl 0,10
Teneur maximale en ions chlorures	1 %	0,65 %	0,4 %	0,2 %	0,1 %

La teneur maximale en ions chlorures est définie en pourcentage de la masse du ciment, elle concerne la somme des chlorures de tous les constituants.

Classes de chlorures à respecter en fonction de l'utilisation du béton	
Utilisation du béton	Classes de chlorure
Béton ne contenant ni armatures en acier ni pièces métalliques noyées	Cl 1,0
Béton contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées et formulés avec un ciment de type CEM III	Cl 0,65
Béton contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées	Cl 0,40
Béton contenant des armatures de précontrainte en acier	Cl 0,20

● Valeurs limites applicables pour la composition et les propriétés du béton en fonction des classes d'exposition

La résistance du béton aux diverses conditions environnementales auxquelles il est soumis pendant la durée d'utilisation de la structure impose le respect d'exigences précises.

Le tableau NA.F.1 de la norme NF EN 206-1 précise les valeurs limites pour la composition et les propriétés du béton pour chaque classe d'exposition :

- rapport $Eau_{\text{efficace}}/liant_{\text{équivalent}}$ maximal,
- classe de résistance minimale du béton,
- teneur minimale en liant équivalent,
- teneur minimale en air (le cas échéant).

En France, certaines classes d'exposition correspondent à des spécifications identiques (XC2 et XC1/XC3 et XF1/XC4 et XF1/XS1 et XS2/XD1 et XF1). Le tableau NA.F.1 peut donc être ainsi synthétisé :

Valeurs limites applicables au béton en fonction des classes d'exposition											
	Classes d'exposition										
	XC1 XC2	XC3 XC4 XF1 XD1	XS1 XS2	XD2	XS3 XD3	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
Eau efficace/liant équivalent maximal	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,55	0,55	0,45	0,55	0,50	0,45
Classes de résistance minimale	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C35/45	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C40/50
Teneur minimale en liant équivalent (kg/m³)	260	280	330	330	350	300	315	340	330	350	385
Teneur minimale en air %	-	-	-	-	-	4	4	4	-	-	-

Ce tableau comporte d'autres exigences, en particulier sur les additions (types et quantités) et sur la nature des ciments à utiliser.

● Classes de consistance du béton frais

La norme NF EN 206-1 définit pour les bétons à teneur en eau courante, cinq classes de consistance des bétons.

Classes de consistance des bétons					
	S1	S2	S3	S4	S5
Affaissement (en mm)	10 à 40	50 à 90	100 à 150	160 à 210	220

La mesure de l'affaissement est réalisée à l'aide du cône d'Abrams.

EXEMPLES DE SPECIFICATIONS DES BETONS - VALEURS LIMITEES POUR LA COMPOSITION ET LES PROPRIETES DES BETONS ARMES

Nota : ces exemples de spécifications supposent que les ouvrages ne sont pas exposés à des attaques gel/dégel (classes d'exposition XF1 à XF4) ni à des attaques chimiques (classes d'exposition XA1 à XA3).

Ils concernent uniquement les ouvrages en béton armé.

Parties d'ouvrage	Classes d'exposition	Rapport E_{eff} /liant équivalent maximal	Classes de résistance minimale	Teneur minimale en liant équivalent (kg/m^3)	Nature du ciment	Classes de chlorure
Béton situé en zone de marnage	XS3 XC4	0,50	C 35/45	350	Ciment de caractéristique complémentaire PM	Cl 0,4
Béton immergé en permanence dans l'eau de mer	XS2 XC1	0,55	C 30/37	330	Ciment de caractéristique complémentaire PM	Cl 0,4
Béton soumis à des projections d'eau de mer ou à des embruns	XS3 XC2	0,50	C 35/45	350	Ciment de caractéristique complémentaire PM	Cl 0,4
Béton exposé à l'air véhiculant du sel marin mais sans contact avec l'eau de mer	XS2 XC2	0,55	C 30/37	330	Ciment de caractéristique complémentaire PM	Cl 0,4

Cas des bétons de Ciment d'Aluminates de Calcium

Parties d'ouvrage	Classes d'exposition	Rapport E_{eff} /ciment	Teneur minimale en ciment	Classes de chlorure
Béton situé en zone de marnage	XS3 XC4	0,40	400	Cl 0,2
Béton immergé en permanence dans l'eau de mer	XS2 XC1			
Béton soumis à des projections d'eau de mer ou à des embruns	XS3 XC2			
Béton exposé à l'air véhiculant du sel marin mais sans contact avec l'eau de mer	XS2 XC2			

● Recommandations complémentaires du fascicule de documentation FD P 18-011

Le fascicule de documentation FD P 18-011 "Définition et classification des environnements chimiquement agressifs" fournit, pour les cas non couverts par d'autres textes de référence, des recommandations complémentaires aux exigences de la norme NF EN 206-1 et précise en particulier, le mode d'action de l'eau de mer sur le béton.

Il recommande des mesures préventives pour la formulation des bétons.

Recommandations		
Conditions d'exposition	Immersion complète dans l'eau de mer	Zones de marnage et d'aspersion
E/C	≤ 0,55	≤ 0,50
Type de ciment	<ul style="list-style-type: none"> • CEM I avec C₃A < 10 % • CEM II clinker avec C₃A < 10 % • CEM III • CEM V • Ciments alumineux 	<ul style="list-style-type: none"> • CEM I avec C₃A < 5 % • CEM III A avec laitier > 60 % • CEM III B et C • CEM V • Ciments alumineux

■ Optimisation de l'enrobage

● Notion d'enrobage

L'enrobage des armatures représente la distance entre la surface du béton et l'armature la plus proche (cadres, étriers, épingles, armatures de peau, etc.).

Il doit être suffisant pour garantir :

- la bonne protection de l'acier contre la corrosion,
- la bonne transmission des efforts d'adhérence,
- une résistance au feu convenable.

L'enrobage des armatures et les caractéristiques du béton d'enrobage sont les paramètres fondamentaux permettant de maîtriser la pérennité des ouvrages aux phénomènes de corrosion et donc leur durée d'utilisation. Ainsi, il est possible de placer les armatures hors d'atteinte des agents agressifs en les protégeant par une épaisseur suffisante d'un béton compact, ayant fait l'objet d'une cure adaptée.

C'est l'enrobage nominal qui est précisé sur les plans d'exécution de l'ouvrage. Il constitue la référence pour la fabrication et pour la pose des armatures.

L'enrobage nominal est égal à la somme de l'enrobage minimal et d'une «marge de sécurité» ΔC_{dev} prenant en compte les tolérances d'exécution.

Enrobage nominal = Enrobage minimal + Tolérance d'exécution

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev}$$

Les recommandations de l'Eurocode 2 (norme NF EN 1992-1-1, section 4) en matière d'enrobage des bétons de structures sont novatrices. Elles résultent d'un retour d'expérience sur la durabilité des ouvrages construits depuis plusieurs décennies et sur les recherches récentes en matière de protection des armatures vis-à-vis des risques de corrosion. Elles visent, en conformité avec la norme NF EN 206-1, à optimiser la durabilité des ouvrages.

La détermination de la valeur de l'enrobage doit prendre en compte de façon extrêmement détaillée :

- la **classe d'exposition** dans laquelle se trouve l'ouvrage (ou la partie d'ouvrage) et qui traduit les conditions environnementales,
- la durée d'utilisation du projet traduite par la **classe structurale** de l'ouvrage (S1 à S6),
- la **classe de résistance du béton**,
- les dimensions des armatures,
- le type de système de **contrôle qualité** mis en œuvre pour assurer la régularité des performances du béton,
- la maîtrise du positionnement des armatures,
- la régularité de la surface contre laquelle le béton est coulé,
- le **type d'armatures** (précontraintes ou non) et leur nature (acier au carbone, acier inoxydable) et d'éventuelles protections complémentaires contre la corrosion ou de revêtements adhérents empêchant la pénétration des agents agressifs.

La valeur de l'enrobage peut ainsi être optimisée, en particulier :

- si l'on choisit un béton présentant une classe de résistance à la compression supérieure à la classe de référence (définie pour chaque classe d'exposition),
- s'il existe un système de contrôle de la qualité,
- si l'enrobage des armatures présente une bonne compacité,
- si l'on utilise des armatures inox.

L'Eurocode 2 permet aussi de dimensionner l'ouvrage pour une durée d'utilisation supérieure en augmentant la valeur de l'enrobage.

L'enrobage minimal est défini dans la norme NF EN 1992-1-1, section 4 "Durabilité et enrobage des armatures" (article 4.4.1).

Il est donné par la formule :

$$C_{min} = \max \begin{cases} C_{min,b} \\ C_{min,dur} + \Delta C_{dur,y} - \Delta C_{dur,st} - \Delta C_{dur,add} \\ 10 \text{ mm} \end{cases}$$

Avec :

- $C_{\min,b}$: enrobage minimal vis-à-vis des exigences d'adhérence (béton/armature),
- $C_{\min,dur}$: enrobage minimal vis-à-vis des conditions environnementales, $C_{\min,dur}$ tient compte de la classe d'exposition et de la classe structurale (qui est fonction de la durée d'utilisation du projet),
- $\Delta C_{dur,y}$: marge de sécurité (valeur recommandée 0),
- $\Delta C_{dur,st}$: réduction de l'enrobage minimal dans le cas d'utilisation, par exemple, d'armatures inox,
- $\Delta C_{dur,add}$: réduction de l'enrobage minimal dans le cas de protections complémentaires.

● Processus de détermination de l'enrobage nominal suivant l'Eurocode 2

Le processus de détermination de l'enrobage des armatures dans chaque partie d'ouvrage comporte les 8 étapes suivantes qui vont permettre de prendre successivement en compte :

- la classe d'exposition,
- la classe structurale et les modulations possibles en fonction de choix particuliers,
- le type d'armatures,
- des contraintes particulières,
- les tolérances d'exécution.

Etape 1 : Prise en compte des classes d'exposition

Etape 2 : Choix et modulation de la classe structurale

Etape 3 : Prise en compte de la durabilité

Etape 4 : Prise en compte du type d'armature

Etape 5 : Prise en compte de contraintes particulières

Etape 6 : Prise en compte des contraintes d'adhérence

Etape 7 : Détermination de l'enrobage minimal C_{\min}

Etape 8 : Prise en compte des tolérances d'exécution

● Détermination de l'enrobage nominal

○ Choix et modulation de la classe structurale

L'Eurocode 2 distingue 6 classes structurales S1 à S6.

Nota : Ces classes structurales ne servent qu'à déterminer l'enrobage minimal des armatures.

La classe structurale à utiliser pour la détermination de $C_{\min,dur}$ pour les bâtiments et les ouvrages de génie civil courants est S4. Ils sont dimensionnés pour une durée d'utilisation de projet de 50 ans. Les ponts et les ouvrages situés en site maritime sont classés dans la catégorie S6. Ils sont dimensionnés pour une durée d'utilisation de projet de 100 ans.

Ces durées supposent la mise en œuvre de bétons conformes aux tableaux N.A.F. 1 ou N.A.F. 2 de la norme NF EN 206.1.

Nota : Les documents particuliers du marché peuvent spécifier des durées d'utilisation de projet différentes.

La classe structurale peut être modulée en fonction de plusieurs paramètres.

Les modulations possibles de la classe structurale, en fonction de choix particuliers pour le projet (durée d'utilisation de projet, classe de résistance du béton, nature du ciment, compacité du béton d'enrobage) sont données dans le tableau 4.3 N (F), à l'article 4.4.1.2 (5) de l'Annexe Nationale de la norme NF EN 1992-1-1. Elles sont synthétisées dans le tableau ci-dessous.

L'amélioration de la qualité du béton se traduit en particulier par une minoration de la classe structurale de 1 ou de 2.

Si une partie d'ouvrage est concernée par plusieurs classes d'exposition, on considère l'exigence la plus sévère et donc l'enrobage le plus élevé.



Modulation de la classe structurale							
Critères	Classes d'exposition						
	X0	XC1	XC2, XC3	XC4	XD1 / XS1 / XA1	XD2 / XS2 / XA2	XD3 / XS3 / XA3
Durée d'utilisation de projet	100 ans, majoration de 2 classes structurales						
	25 ans et moins, minoration d'une classe structurale						
Classe de résistance du béton	C 30/37	C 30/37	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 40/50	C 45/55
	Si résistance supérieure, minoration d'une classe structurale						
	C 50/60	C 50/60	C 55/67	C 60/75	C 60/75	C 60/75	C 70/85
	Si résistance supérieure, minoration de 2 classes structurales						
Nature du liant	-	C 35/45	C 35/45	C 40/50	-	-	-
	-	Béton à base de CEM I Sans cendres volantes			-	-	-
	-	Minoration d'une classe structurale			-	-	-
Enrobage ^(*) compact	Minoration d'une classe structurale						

Extrait du tableau 4.3 N(F)

(*) L'obtention d'une bonne compacité de la zone d'enrobage concerne, par exemple :

- la face coffrée des éléments plans (assimilables à des dalles, éventuellement nervurées), coulés horizontalement sur des coffrages industriels,
- les éléments préfabriqués industriellement : éléments extrudés ou faces coffrées des éléments coulés dans des coffrages métalliques,
- la sous face des dalles de pont, éventuellement nervurées, sous réserve de l'accessibilité du fond de coffrage aux dispositifs de vibration.

○ Prise en compte de la durabilité

Détermination de l'enrobage minimal vis-à-vis de la durabilité $C_{min,dur}$

Les valeurs de $C_{min,dur}$ (en mm) requis vis-à-vis de la durabilité sont données en fonction de la classe d'exposition et de la classe structurale dans le tableau 4.4 N pour les armatures de béton armé et dans le tableau 4.5 NF pour les armatures de précontrainte dans l'article 4.4.1.2 (5) de la norme NF EN 1992-1-1.

Valeurs de $C_{min,dur}$ requises vis-à-vis de la durabilité pour les armatures de béton armé							
Classes structurales	Classes d'exposition						
	X0	XC1	XC2 XC3	XC4	XD1 XS1	XD2 XS2	XD3 XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Nota : Pour les classes d'expositions XF1, XF2, XF3 et XF4, la valeur de $C_{min,dur}$ est déterminée en prenant en compte les classes d'expositions concomitantes XC1 à XC4 et XD1 à XD3.

Pour les classes d'exposition XA1 à XA3, la valeur de $C_{min,dur}$ est aussi déterminée en prenant en compte les classes d'exposition concomitantes XC ou XD.

○ Prise en compte du type d'armature

L'Annexe Nationale de la norme NF EN 1992-1-1 dans l'article 4.4.1.2 (7) précise les cas pour lesquels l'enrobage $C_{min,dur}$ peut être réduit, d'une valeur $\Delta C_{dur,st}$ ou $\Delta C_{dur,add}$. Ce choix engage le maître d'œuvre. La valeur est fixée par les documents particuliers du marché.

- Utilisation d'armatures en acier résistant à la corrosion : Armature INOX

«Sur justification spéciale et à condition d'utiliser des aciers dont la résistance à la corrosion est éprouvée (certains aciers inox par exemple), pour la durée d'utilisation et dans les conditions d'exposition du projet, les documents particuliers du marché pourront fixer la valeur de $\Delta C_{dur,st}$. En outre, le choix des matériaux, des paramètres de mise en œuvre et de maintenance doivent faire l'objet d'une étude particulière. De même, l'utilisation de tels aciers ne peut s'effectuer que si les caractéristiques propres de ces aciers (notamment soudabilité, adhérence, dilatation thermique, compatibilité des aciers de nature différente) sont vérifiées et prises en compte de façon appropriée»
Extrait de l'article 4.4.1.2 (7).

- Mise en place d'une protection complémentaire

En cas de mise en place d'une protection complémentaire, l'enrobage minimal n'est pas diminué, sauf pour les revêtements adhérents justifiés vis-à-vis de la pénétration des agents agressifs pendant la durée d'utilisation du projet.

○ Prise en compte de contraintes particulières

L'Eurocode 2 et l'Annexe Nationale Française prescrivent d'augmenter l'enrobage minimal dans les cas suivants :

- Parements irréguliers

Dans le cas de parements irréguliers (béton à granulats apparent par exemple), l'enrobage minimal doit être augmenté d'au moins 5 mm.

- Abrasion du béton

Dans le cas de béton soumis à une abrasion, il convient d'augmenter l'enrobage de 5 mm, 10 mm et 15 mm respectivement pour les classes d'abrasion XM1, XM2 et XM3 (voir l'EN 1990 Eurocode 0 - Base de calcul des structures).

Classes d'abrasion		
Classes d'abrasion	Conditions	Valeurs des coefficients
XM1	Abrasion modérée : • frottements d'amarres ou de chaînes, • sédiments charriés par la houle.	$k_1 = 5 \text{ mm}$
XM2	Abrasion importante : • coques de navires pouvant glisser sur un front d'accostage.	$k_2 = 10 \text{ mm}$
XM3	Abrasion extrême : • godets de chargeurs de produits en vrac.	$k_3 = 15 \text{ mm}$

- Béton coulé au contact de surfaces irrégulières

Dans le cas d'un béton coulé au contact de surfaces irrégulières, il convient généralement de majorer l'enrobage minimal en prenant une marge plus importante, fonction de l'importance de l'irrégularité. L'enrobage minimal doit être au moins égal à k_1 pour un béton coulé au contact d'un sol ayant reçu une préparation (y compris béton de propreté) et k_2 pour un béton coulé au contact direct du sol.

Les valeurs recommandées par l'Annexe Française sont :

$$k_1 = 30 \text{ mm et } k_2 = 65 \text{ mm.}$$

○ Détermination de l'enrobage minimal vis-à-vis de l'adhérence $C_{min,b}$

L'enrobage minimal vis-à-vis de l'adhérence $C_{min,b}$ est précisé dans le tableau 4.2 article 4.4.1.2 (3) de la norme EN 1992-1-1.

$C_{min,b}$ ne doit pas être inférieur :

- au diamètre de la barre dans le cas d'armature individuelle,
- au diamètre équivalent dans le cas de paquet d'armatures.

$C_{min,b}$ est majoré de 5 mm si le diamètre du plus gros granulats du béton est supérieur à 32 mm.

○ Détermination de l'enrobage minimal C_{min}

L'enrobage minimal est déterminé en intégrant les valeurs de $C_{min,b}$, $C_{min,dur}$, $\Delta C_{dur,y}$, $\Delta C_{dur,st}$ et $\Delta C_{dur,add}$.

○ Prise en compte des tolérances d'exécution

L'enrobage minimal doit être majoré, pour tenir compte des tolérances pour écart d'exécution (ΔC_{dev}).

La valeur recommandée [article 4.4.1.3 (3)] est $\Delta C_{dev} = 10 \text{ mm}$. Cette valeur peut être réduite sous réserve de conditions strictes de contrôle qualité à la fois sur la conception et l'exécution des ouvrages.

○ Enrobage nominal

L'enrobage nominal est donné par la formule :

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev}$$

Si la réalisation ou la conception et l'exécution des éléments d'ouvrage sont soumis à un système d'Assurance Qualité (incluant en particulier des dispositions spécifiques relatives à la conception, au façonnage ou à la mise en place des armatures, mesure de l'enrobage des armatures avant coulage du béton), il est possible de réduire la valeur de ΔC_{dev} à une valeur comprise entre 5 et 10 mm.

Cette réduction possible de ΔC_{dev} permet d'inciter à un meilleur contrôle du positionnement réel des armatures et à une meilleure qualité de réalisation.

Nota : L'Eurocode 2 attire l'attention sur les deux points suivants :

- Les problèmes de fissuration auxquels risque de conduire un enrobage nominal supérieur à 50 mm.
- Les difficultés de bétonnage auxquelles risque de conduire, un enrobage nominal inférieur à la dimension nominale de plus gros granulats.

● Exemple d'optimisation de la valeur d'enrobage

L'exemple concerne une partie d'ouvrage située en zone de marnage.

Etape 1 : Prise en compte de la classe d'exposition

Les classes d'exposition à prendre en compte sont :

- XS3 : zone de marnage
- XC4 : alternance d'humidité et de séchage

Etape 2 : Choix de la classe structurale

Les ouvrages situés en site maritime sont dimensionnés pour une durée d'utilisation de projet de 100 ans. Ils correspondent donc à la classe structurale S6.

Etape 3 : Prise en compte de la durabilité

La valeur de $C_{\min, \text{dur}}$ est déterminée en fonction de la combinaison des classes d'exposition et de la classe structurale.

- Classe d'exposition XS3 et classe structurale S6 :
 $C_{\min, \text{dur}} = 55 \text{ mm}$
- Classe d'exposition XC4 et classe structurale S6 :
 $C_{\min, \text{dur}} = 40 \text{ mm}$

Etape 4 : Prise en compte du type d'armature

L'utilisation d'armatures inox permet de réduire la valeur de l'enrobage. On peut prendre en compte a priori une valeur de $\Delta C_{\text{dur, st}}$ égale à 15 mm.

Etape 5 : Prise en compte de contraintes particulières

- Parements irréguliers : sans objet
- Classe d'abrasion : l'ouvrage est soumis aux sédiments charriés par la houle, donc à une classe d'abrasion XM1 qui correspond à un coefficient $k_1 = 5 \text{ mm}$
- Béton coulé au contact de surfaces irrégulières : sans objet

Etape 6 : Prise en compte des contraintes d'adhérence

On suppose que le diamètre maximal des armatures est de 40 mm et que le diamètre du plus gros granulats du béton est inférieur à 32 mm.

Etape 7 : Détermination de l'enrobage minimal

- Armature acier au carbone $C_{\min} = 55 + 5 = 60 \text{ mm}$
- Armature inox $C_{\min} = 55 - 15 + 5 = 45 \text{ mm}$

Etape 8 : Prise en compte des tolérances d'exécution

ΔC_{dev} sera pris égal à 10 mm d'où

- Armature au carbone $C_{\text{nom}} = 70 \text{ mm}$
- Armature inox $C_{\text{nom}} = 55 \text{ mm}$

Prise en compte d'une classe de résistance du béton supérieure

Dans le cas d'une classe d'exposition XS3, si l'on choisit une classe de résistance du béton au moins égale à C45/55, il est possible de minorer la classe structurale de 1 point et de 2 points dans le cas d'une classe de résistance au moins égale à C70/85, soit une réduction de la valeur de $C_{\min/\text{dur}}$ respectivement de 5 et 10 mm.

Conclusion

Il en résulte les divers choix suivants pour l'optimisation de l'enrobage en fonction du type d'armatures et de la classe de résistance du béton.

Valeurs de l'enrobage nominal C_{nom}			
Type d'armature	Classes de résistance du béton		
	C35/45	C45/55	C70/85
Acier au carbone	70	65	60
Inox	55	50	45

■ 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 (formulation adaptée, dosage adéquat en ciment, faible E/C, béton compact et peu perméable), de la conception de l'ouvrage et lors de sa réalisation (vibration, cure) permettent d'obtenir des bétons résistants 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

Un dosage suffisamment élevé en ciment, 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 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,
- l'optimisation de la vibration, du traitement thermique éventuel et de la cure.

- Le respect des valeurs d'enrobage des armatures

Le respect des épaisseurs d'enrobage permet de maîtriser la corrosion des armatures de béton armé.

- Une mise en œuvre et une cure soignées

La vibration doit être adaptée et homogène. La cure doit être efficace afin d'éviter, en particulier, tout phénomène de dessiccation 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.

■ Éléments pour la mise au point du CCTP

● Dispositions générales, description de l'ouvrage

○ Données générales

- Contexte climatique et classes d'exposition

La norme NF EN 206-1 définit à l'article NA 4.1 les classes d'exposition auxquelles sont soumises les différentes parties de l'ouvrage pendant sa durée d'utilisation, en fonction des actions dues à l'environnement.

Chaque béton d'une partie d'ouvrage peut être soumis simultanément à plusieurs actions environnementales.

Nota : *Le marché doit préciser toutes les données caractérisant l'environnement dans lequel sont situées les parties d'ouvrage ainsi que les classes d'exposition associées.*

- Durée d'utilisation de projet

La durée d'utilisation de l'ouvrage sera prise égale à 100 ans.

- Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel.

Sans objet pour les ouvrages situés en site maritime en métropole.

- Prévention vis-à-vis des risques liés à l'alcali-réaction

Les dispositions et recommandations à mettre en œuvre sont définies dans l'article NA.5.2.3.4 de la norme NF EN 206-1 et dans le guide technique LCPC (juin 1994) : *Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction*. Le niveau de prévention à prendre en compte correspond aux recommandations de NIVEAU A / NIVEAU B / NIVEAU C.

Nota : *exemples de niveau de prévention :*

- Ouvrage courant : niveau B
- Ouvrage exceptionnel : niveau C

- Prévention vis-à-vis des risques liés aux réactions sulfatiques internes

Les dispositions et principes de prévention à mettre en œuvre font l'objet de recommandations LCPC, "Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne" (2007).

- Caractéristiques chimiques des eaux de surface et souterraines et des sols en contact avec l'ouvrage

Les caractéristiques chimiques des eaux de surface et souterraines (SO_4^{2-} , pH, CO_2 , NH_4^+) et des sols (SO_4^{2-} , acidité) permettent de déterminer, en utilisant le tableau 2 de l'article 4.1 de la norme NF EN 206-1, les classes d'exposition correspondant aux attaques chimiques (XA1, XA2, XA3) à associer si nécessaire aux parties d'ouvrages concernées.

○ Normes de calcul et textes réglementaires

- Normes de calcul

Les calculs des structures sont justifiés en utilisant les normes européennes Eurocodes,

- NF EN 1990 Bases de calcul des structures
- NF EN 1991 Actions sur structures
- NF EN 1992 Calcul des structures en béton
- NF EN 1997 Calcul géotechnique
- NF EN 1998 Calcul des structures pour leur résistance aux séismes.

ainsi que leurs annexes nationales respectives.

- Textes réglementaires

Les spécifications et prescription du fascicule 65 du CCTG "Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou en béton précontraint par post-tension" (en cours de mise à jour) seront appliquées.

● Provenance, qualité et préparation des matériaux


○ Constituants des bétons

- Ciments

Les ciments courants sont conformes à la norme NF EN 197-1.

Les ciments offrant des caractéristiques complémentaires font l'objet des normes :

- NF P 15-317 (Ciment pour travaux à la mer : PM)
- NF P 15-318 (Ciment à teneur en sulfures limitées pour béton précontraint : CP)
- NF P 15-319 (Ciments pour travaux à haute teneur en sulfates : ES)
- NF EN 197-4 (Ciment de haut-fourneau et à faible résistance à court terme : L-LH).

Les ciments doivent être titulaires de la marque  - Liants hydrauliques. Le choix du ciment sera fonction des spécifications liées aux classes d'exposition.

- Granulats

Les granulats sont d'origine naturelle, conformes aux normes NF EN 12620 et XP P 18545.

Ils sont titulaires de la marque  - Granulats.

Conformément à l'article 10.7.2 de la norme XP 18-545 pour les bétons de classe de résistance C35/45 ou supérieure, les granulats de code indicé A conviennent (une ou deux caractéristiques peuvent être de code B après études ou selon références).

Pour les bétons de classe de résistance inférieure à C35/45, les granulats doivent être de code B (une ou deux caractéristiques peuvent être de code C après études ou selon références).

Dispositions particulières vis-à-vis de l'alcali-réaction

Les granulats doivent être qualifiés vis-à-vis de l'alcali-réaction, conformément aux prescriptions du fascicule de documentation FD P 18-542.

Les granulats doivent respecter les spécifications définies dans le guide – LCPC "Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction".

Dispositions particulières pour la durabilité vis-à-vis du gel

Sans objet

- Eau de gâchage

L'eau de gâchage doit satisfaire les prescriptions de la norme NF EN 1008.

- Adjuvants

Les adjuvants seront conformes à la norme NF EN 194-2 et seront titulaires de la marque  - Adjuvants pour bétons

- Additions

Les additions devront être conformes aux normes :

- | | |
|---------------|---------------------------|
| - NF EN 450 | Cendres volantes |
| - NF EN 13263 | Fumées de silices |
| - NF P 18-508 | Additions calcaires |
| - NF P 18-509 | Additions siliceuses |
| - NF EN 15167 | Laitiers de haut-fourneau |

Nota : La nature et la quantité maximale d'additions utilisables en substitution partielle du ciment, en fonction de chaque classe d'exposition sont précisées dans le tableau NA.F.1 de la norme NF EN 206-1.

- Bétons

Les bétons seront conformes à la classification et la désignation des bétons (classes d'exposition, classes de résistance à la compression, classes de chlorures, classes de consistance du béton frais) et définies conformément à la norme NF EN 206-1.

La centrale BPE doit être titulaire de la marque  - BPE et respecter les exigences complémentaires du fascicule 65.

- Consistance des bétons

La consistance des bétons est proposée par l'entreprise et soumise au visa du maître d'œuvre.

A chaque partie d'ouvrage est associée un Béton à Propriétés Spécifiées (BPS) satisfaisant aux exigences de la combinaison des classes d'exposition auxquelles il est soumis pendant la durée d'utilisation de l'ouvrage.

Les spécifications des BPS sont définies dans l'article 6.2 de la norme NF EN 206-1.

Le béton (BPS) de chaque ouvrage est défini par les spécifications minimales suivantes :

- Classe de résistance à la compression
- Classes d'exposition (suivie de la lettre F en France)
- Dimension maximale nominale des granulats
- Classe de teneur en chlorures
- Classe de consistance (à la livraison)

et les exigences complémentaires éventuelles :

- Rapport Eau_{efficace} / Liant_{équivalent}
- Teneur minimale en liant équivalent
- Type et classe du ciment
- Caractéristiques complémentaires du ciment
- Caractéristiques complémentaires relatives aux granulats
- Caractéristiques complémentaires relatives au béton frais ou durcis
- Teneur en air
- Résistance en compression au jeune âge
- Aspect particulier de parement (spécification basée sur le fascicule de documentation FD P 18-513)
- Béton pompable
- Béton autoplaçant

○ Armatures pour béton armé

Les armatures pour béton armé seront conformes aux normes suivantes :

XP 35-014 / NF A35-015 / NF A35-016 / NF A35-017 / NF A35-019-1 / NF A35-019-2 / NF A35-021 / NF A35-024 / NF A35-025.

CIM *béton*

CENTRE D'INFORMATION SUR
LE CIMENT ET SES APPLICATIONS



7, Place de la Défense - 92974 Paris-la-Défense cedex - Tél. : 01 55 23 01 00 - Fax : 01 55 23 01 10

Email : centrinfo@cimbeton.net - Site Internet : www.infociments.fr