

GUIDE D'AIDE AU CHOIX DES CLASSES D'EXPOSITION POUR MAITRISER LA DURABILITE DES OUVRAGES EN BETON

François TOUTLEMONDE

LCPC ¹

Henry THONIER

EGF BTP

Patrick GUIRAUD

CIMbéton

Philippe FRANCISCO

CERIB

RESUME

Les textes normatifs européens relatifs aux ouvrages en béton et produits préfabriqués structuraux prennent en compte la durabilité en s'appuyant sur la notion de classe d'exposition. Sauf dans le cas d'ouvrages spécifiques et de produits préfabriqués non structuraux, où il existe des normes autoportantes auxquelles il convient de se référer, ces classes traduisent les actions dues à l'environnement auxquelles le béton et les armatures de chaque partie d'ouvrage vont être exposés pendant la durée d'utilisation de la structure. En complément de la durée d'utilisation de projet, elles constituent donc la clé d'entrée de la durabilité des ouvrages en béton telle que prise en compte dans l'Eurocode 2, la norme béton, la norme d'exécution des structures en béton, et les normes de produits de structure. Leur spécification est de la responsabilité du maître d'ouvrage qui se trouve ainsi engagé dans l'expression des risques et des conditions d'exploitation de la structure qu'il commande.

Si les classes d'exposition constituent depuis quelques années des concepts connus et mis en pratique parce que participant à la désignation du béton commandé et formulé en application de la norme NF EN 206-1, il est important de noter qu'elles sont aussi désormais à utiliser :

- dès le stade du projet pour la détermination des enrobages ;
- dès le stade du projet pour la maîtrise de la fissuration ;
- et lors de la construction, pour préciser les spécifications d'exécution dont par exemple les classes de cure.

Les visées spécifiques des différentes normes qui font référence à ces classes et la multiplicité des praticiens concernés par leur utilisation ont conduit à une nécessaire mise en commun des interprétations, de façon à aider à une spécification homogène des classes d'exposition, compte tenu des enjeux économiques liés à la durabilité des ouvrages concernés. Les différentes initiatives menées sur cette thématique ont été alors rassemblées pour former un groupe de travail créé au sein de l'École Française du Béton afin de coordonner la rédaction d'un guide pour aider les rédacteurs de cahiers des charges à choisir les classes d'exposition pour les catégories d'ouvrages ou de constructions concernées : ouvrages de bâtiment, ponts, ouvrages maritimes et fluviaux, tunnels et ouvrages souterrains, ouvrages divers de génie civil. Les fascicules de ce guide, qui couvrent chacun l'une de ces catégories, n'ont pas de statut officiel, ils constituent cependant une indication du consensus technique actuel cohérent avec les niveaux d'exigence prescriptifs et/ou performantiels actuellement associés aux classes d'exposition en lien avec les durées d'utilisation de projet de référence actuelles.

L'article rappelle les notions essentielles associées aux classes d'exposition au sein du contexte normatif, précise les enjeux de la spécification adaptée des classes d'exposition, et présente les divers fascicules d'aide au choix des classes d'exposition. Ces documents constituent un outil précieux pour les maîtres ouvrages et les prescripteurs afin de maîtriser l'expression des objectifs de durabilité de leur

¹ Depuis le 1^{er} janvier 2011 le LCPC a fusionné avec l'INRETS pour constituer l'IFSTTAR, institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux.

patrimoine, et contribuent à rendre possible une réponse optimisée et responsable de la durabilité en termes de formulation des bétons et de conception des ouvrages.

1. ENJEUX

Les classes d'exposition constituent, en complément de la durée d'utilisation de projet (« design service life » [2]), la clé d'entrée de la durabilité des ouvrages en béton telle que prise en compte dans les normes en vigueur suivantes : Eurocode 2 [3-6], norme béton [1], norme d'exécution des structures en béton [8], normes de produits préfabriqués de structure [7]. Leur spécification est de la responsabilité du maître d'ouvrage qui se trouve ainsi engagé dans l'expression des risques et des conditions d'exploitation de la structure qu'il commande. Qu'elle soit traitée de façon prescriptive ou au moins partiellement performante, la conception durable de l'ouvrage se trouve gouvernée par ces données d'entrée, afin de répondre à l'objectif consistant à s'assurer d'une durée probable de service contractualisée, sans réparation majeure, compte tenu des agressions et risques probables [15].

Si les classes d'exposition constituent depuis quelques années des concepts connus et mis en pratique parce que participant à la désignation du béton commandé et à sa composition en application de la norme NF EN 206-1, il est important de noter qu'elles sont aussi à utiliser :

- dès le stade du projet pour la détermination des enrobages (NF EN 1992-1-1, NF EN 1992-2 et leurs annexes nationales, section 4)
- dès le stade du projet pour la maîtrise de la fissuration (NF EN 1992-1-1, NF EN 1992-2 et leurs annexes nationales, section 7)
- et lors de la construction, pour préciser les spécifications d'exécution dont par exemple les classes de cure (PR NF EN 13670).

Ainsi, le niveau de précision avec lequel les classes d'exposition sont déterminées influe directement sur le degré avec lequel la durabilité et le coût d'un ouvrage sont optimisés.

Cependant, les visées spécifiques des différentes normes qui font référence à ces classes et la multiplicité des praticiens concernés par leur utilisation ont conduit à une nécessaire mise en commun des interprétations, de façon à aider à une spécification homogène et responsable des classes d'exposition, compte tenu des enjeux économiques liés à la durabilité des ouvrages concernés. Tel a été le travail fédéré par le groupe de l'Ecole Française du Béton animé par Henry Thonier, s'appuyant pour les différents types d'ouvrages sur le travail des experts concernés.

2. CONTEXTE D'ELABORATION DU GUIDE

L'Ecole Française du Béton (EFB) est une Fondation regroupant les principaux acteurs de la construction des ouvrages en béton de bâtiment et de génie civil (cimentiers, fédérations professionnelles, associations, entreprises, laboratoires). C'est une école sans mur dont l'objectif est de promouvoir la connaissance du matériau béton et le calcul du béton armé, spécialement dans le domaine de l'enseignement secondaire et supérieur. Constatant que la notion de classes d'exposition des ouvrages en béton était insuffisamment connue des acteurs de la construction, et que son emploi restait difficile, le conseil scientifique de l'EFB a décidé de créer, dans le prolongement d'actions initiées par le CERIB d'une part, le réseau des laboratoires des Ponts et Chaussées d'autre part, un groupe de travail animé par Henry Thonier, ayant pour but la mise au point d'un guide à l'attention des maîtres d'ouvrage et de leurs maîtres d'œuvre pour la rédaction des cahiers des charges. En effet, qui mieux que le maître d'ouvrage connaît les caractéristiques, la destination et l'usage qu'il fera de ses ouvrages ? Ce groupe de travail a rassemblé des membres représentant l'Administration (LCPC, CETMEF, CETU), les bureaux de contrôle (SOCOTEC, APAVE), les fédérations professionnelles (FFB, FNTP, EGF-BTP, UMGO, SNBPE), les entreprises (Eiffage, Bouygues), les organismes techniques (CERIB, CIMbéton). La rédaction initiale a été principalement assurée par Laetitia d'Aloïa (CETU), Patrick Dantec (LRPC Clermont-Ferrand), Sébastien Dupray (CETMEF), Philippe Francisco (CERIB), Patrick Guiraud (CIMbéton), Michel Menguy (LRPC Saint-Brieuc), Wilfried Pillard (UMGO), Jean-Marc Potier (SNBPE), Patrick Rougeau (CERIB) et François Toutlemonde (LCPC). Une trentaine de personnes ont ainsi été associées au déroulement et au suivi de la rédaction du guide et à sa validation.

Le guide est constitué de 7 fascicules couvrant l'ensemble des ouvrages de bâtiment et de génie civil (Tableau 1). Le guide complet est accessible en ligne sur le site www.efbeton.com. La partie du

fascicule 1 dédiée aux produits industrialisés destinés aux bâtiments ou aux réservoirs, piscines, aux ouvrages de traitement des effluents ou de stockage agricole (relevant du groupe Planchers Ossatures de la FIB) a été publiée en décembre 2009 par le CERIB et la FIB [11]. Les fascicules 2, 3 et 5 ont fait l'objet d'une publication spéciale dans la collection technique de CIMbéton [12-14] sous forme de cahiers « Solutions Béton » (Figure 1), en plus d'une insertion comme cahier central de la revue « Construction Moderne » (CM OA 2010) pour le fascicule 2, également repris dans le guide LPC « Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton : Application de l'approche performantielle » de mars 2010 [15]. Une feuille de calcul a de plus été élaborée afin de fournir les valeurs seuils (caractéristiques performantielles ou prescriptions) auxquelles doit satisfaire le béton d'un ouvrage ou d'un élément d'ouvrage donné pour une ou plusieurs classes d'exposition déterminées à partir des fascicules. Cette feuille donne également les résistances minimales du béton par application de la norme NF EN 206-1 et les enrobages minimaux $c_{min,dur}$ de l'Eurocode 2.

Tableau 1. Organisation du guide

Fascicule N°	Nature d'ouvrages
1	Ouvrages de bâtiment préfabriqués et coulés sur site
2	Ouvrages d'art
3	Ouvrages maritimes, fluviaux et de navigation intérieure
4	Ouvrages d'équipements de la route et chaussées
5	Tunnels creusés
6	Tranchées couvertes, galeries, casquettes et caissons immergés
7	Ouvrages divers de génie civil



Figure 1. Pages de garde des fascicules 1 (CERIB/FIB : produits en béton relevant du groupe « Planchers Ossatures » de la FIB), 2 et 3 (collection technique de CIMbéton « Solutions Béton »)

3. CLASSES D'EXPOSITION : CONTEXTE NORMATIF ET DEFINITIONS

3.1 Normes et textes de référence

La norme NF EN 206-1 [1] définit dans son 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 fournit pour chaque classe d'exposition une description normative de l'environnement et donne à titre informatif des exemples illustratifs. Ces éléments sont repris dans la norme NF EN 13369 [7] couvrant les produits préfabriqués structuraux. Cette description est par ailleurs reprise dans l'Eurocode 2 (NF EN 1992-1-1 [3]) dans la section 4 « Durabilité et enrobage des armatures ». Cette section fait l'objet de nombreuses clauses complémentaires dans l'annexe nationale NF P 18-711-1/NA [5]. En particulier (clause 4.2(2)), les exemples illustratifs du tableau définissant les classes d'exposition sont rendus normatifs pour ce qui concerne l'enrobage, compte tenu de 8 notes

explicatives. Quelques éléments complémentaires pour les ponts sont par ailleurs fournis par la norme NF EN 1992-2 [4] et son annexe nationale [6]. La mise au point des annexes nationales de ces normes a nécessité un important travail de calibrage croisé, retracé en particulier dans le document « Structures en béton conçues avec l'Eurocode 2. Note technique sur les dispositions relatives à l'enrobage pour l'application en France » publié par le LCPC en 2005 [17].

Le choix des classes XC1 à XC4 (corrosion induite par carbonatation, niveau de sévérité croissant de 1 à 4) et XS1 à XS3 (corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer, niveau de sévérité croissant de 1 à 3) se déduit assez directement des normes ci-dessus, moyennant la prise en considération de l'ensemble des clauses. Le choix des classes XD1 à XD3 (corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine, niveau de sévérité croissant de 1 à 3), XF1 à XF4 (attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage, niveau de sévérité croissant de 1 à 4) et XA1 à XA3 (attaque chimique, niveau de sévérité croissant de 1 à 3) nécessite en revanche la prise en compte d'informations nationales spécifiques (sévérité du gel, fréquence de salage, concentration en agents chimiquement agressifs...) fournies par des textes complémentaires : fascicules de documentation FD P 18-011 « Définition et classification des environnements chimiquement agressifs » [9] et FD P 18-326 « zones de gel en France » [10], ou encore guide d'aide à l'élaboration des dossiers d'organisation de la viabilité hivernale (Sétra, 1994) repris dans les « recommandations gel » du LCPC [18].

Si ces textes constituent effectivement le référentiel, leur multiplicité et leurs visées diverses (formulation du matériau ou vérification de la protection des armatures), même s'il s'agit dans tous les cas de favoriser la durabilité de l'ouvrage, constituent un frein à une application cohérente, et l'élaboration du guide EFB d'aide au choix des classes d'exposition a nécessité d'en dégager après analyse des principes aussi cohérents que possible pour en faciliter l'application. Ces principes sont détaillés ci-après.

3.2 Risques de corrosion des armatures et attaques du béton

Corrosion induite par carbonatation

Les critères de choix des classes XC1 à XC4 issus de la norme européenne, fondés sur l'humidité, ont été précisés par l'annexe nationale de l'EN 1992-1-1 [5] où les exemples ont été rendus normatifs pour ce qui concerne leur application à la détermination de l'enrobage, en insistant sur les critères d'occurrence de condensations importantes (par leur fréquence et leur durée) et d'exposition aux intempéries. Le risque dont on vise à se prémunir provient en effet non seulement de la pénétration du dioxyde de carbone, favorisée par une humidité relative modérée, mais aussi de la disponibilité d'oxygène pour provoquer la corrosion des armatures. Le transport d'eau liquide contrôle ainsi le mécanisme dans une plage importante d'humidités relatives, et les brusques variations hydriques de surface avec apport d'eau liquide augmentent fortement le risque de corrosion induite par carbonatation, en particulier lorsque le béton d'enrobage est assez poreux suite à une cure insuffisante par exemple, ou à cause d'un rapport eau/liant excessivement élevé en surface compte tenu de la mise en œuvre.

Tableau 2. Indications extraites du guide
fascicule 1 - risque de corrosion induite par carbonatation (classes XC)

type de bâtiment	local considéré ou partie d'ouvrage	face exposée	corrosion par carbonatation
Tout bâtiment superstructures	local clos et couvert sans phénomène de condensation persistante (plancher courant, cuisine, sanitaires, salle d'eau...)	plafond, plancher, mur	XC1
	local clos et couvert avec phénomène de condensation persistante (buanderie, papeterie, local de piscine...)	plafond, plancher, mur	XC3
	balcon, loggia	sous-face jusqu'à la goutte d'eau	XC3
		autres faces	XC4
	extérieur hors toiture terrasse (façades, passage entre bâtiments...)	plafond	XC3
		mur	XC4
Tout bâtiment infrastructures	toiture terrasse avec étanchéité	plancher	XC1
		acrotère et émergences	XC4
	vide sanitaire ventilé	plafond	XC3
		mur	XC4
	vide sanitaire moyennement ventilé	plafond	XC3
		mur	XC4
	vide non ventilé sous plancher bas	plafond	XC3
		mur	XC4
	sous-sol (cave ou garage)	plafond, plancher	XC1
		mur face intérieure	XC1
		mur face au contact de la terre	XC2
	longrine et fondation	totalemenet enterrée	XC2
		partiellement enterrée	XC4

De façon à clarifier la prise en compte détaillée de la prévention du risque de corrosion, en permettant le cas échéant une optimisation du béton et/ou de l'enrobage, le guide décline et détaille donc les parties d'ouvrage à considérer en fonction non seulement de l'humidité environnante moyenne, mais aussi de la fréquence de cycles d'imbibition / séchage (Tableau 2).

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

Le risque de corrosion induite par les chlorures est lié à la fois à la pénétration de ces ions jusqu'aux armatures, et à la disponibilité d'oxygène pour provoquer la réaction. La situation la plus pénalisante (classe XS3) concerne donc les zones de marnage et soumises aux embruns, ces derniers provoquant des cycles d'immersion / séchage d'eau salée qui accélèrent le transport des ions chlore à cause de l'interaction avec les mouvements d'eau liquide, devant les zones immergées en permanence (XS2) car la diffusion d'oxygène dissous y est relativement lente. La distinction avec la classe XS1 est à comprendre de façon plus nuancée que par seule référence à la distance à la côte, en relation avec ce critère d'éventuels apports réguliers d'eau liquide salée en plus de l'apport de sels par voie aérienne seulement. La mise en application de ces principes est illustrée par le Tableau 3, issu du fascicule dédié aux ouvrages d'art.

Tableau 3. Indications extraites du guide
fascicule 2 - risques de corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer (classes XS)

Parties d'ouvrage	XS	
	moins de 100 m de la côte et équiv.	100 à 1000 m de la côte et équiv.
fondations (pieux, barrettes, puits marocains, bétons de blocage, semelles, radiers...)		
fondations de tous types entièrement immergées	XS2	XS2
fondations de tous types en zone de marnage	XS3	XS3
fondations profondes enterrées hors eau de mer	XS1	-
fondations superficielles non immergées (partie aérienne)	XS3	XS1
fondations superficielles non immergées (partie enterrée)	XS1	-
appuis (chevêtres sur pieux, piles, chevêtres sur piles, piédroits, culées y compris murs en retour...), parties d'ouvrages en contact avec le terrain, voûtes		
parties immergées	XS2	XS2
parties en zone de marnage	XS3	XS3
parties enterrées	XS1	-
parties à l'air libre	XS3	XS1
faces intérieures des piles ou culées creuses	XS1	-
dalles de transition	XS1	-
tablier (poutres, hourdis, dalles, caissons, traverses de ponts cadres, entretoises)		
face supérieure du hourdis protégée par l'étanchéité	-	-
faces extérieures	XS3	XS1
faces intérieures des caissons	XS1	-
équipements et superstructures		
corniches	XS3	XS1
solins de joints de dilatation	XS3	XS1
contre-corniches et longrines d'ancre de barrière de sécurité (non revêtues)	XS3	XS1
barrières de sécurité en béton, garde-corps, écrans acoustiques	XS3	XS1
massifs d'ancre (non revêtus) des candélabres, PPHM et panneaux de signalisation	XS3	XS1
corniches-caniveaux	XS3	XS1

Corrosion par les chlorures ayant une origine autre que marine - salage

En application de la clause 4.2 (2) de l'annexe nationale de la norme NF EN 1992-1-1 (notes 4 et 6) le choix de la classe XD1, XD2 ou XD3 se réfère non seulement à l'effet aggravant des cycles d'humidification / séchage, selon les indications du tableau 4.1 de la norme NF EN 1992-1-1, mais également à la fréquence de salage des chaussées et des ouvrages exposés [5]. Le cas échéant, le salage est considéré comme « peu fréquent » lorsque la moyenne annuelle du nombre de jours de salage estimée sur les 10 dernières années est inférieure à 10, « très fréquent » lorsqu'elle est supérieure ou égale à 30, et « fréquent » entre ces deux cas. En application ou par analogie avec les dispositions issues de l'annexe nationale de la norme NF EN 1992-2 [6] les parties extérieures d'ouvrages situées à moins de 6 m (horizontalement ou verticalement) d'une chaussée salée peuvent être considérées comme exposées ou très exposées aux projections de sels de dé verglaçage, selon la fréquence du salage. Quelle que soit la fréquence de salage des routes dans leur zone géographique, certaines parties d'ouvrages peuvent ne pas être exposées aux effets du salage, on considérera alors pour ces parties d'ouvrages la colonne « salage peu fréquent ». La mise en application de ces principes est illustrée par le Tableau 4, issu du fascicule dédié aux ouvrages d'art.

Par ailleurs, indépendamment du salage induit par l'exploitation routière, le risque de corrosion provoquée par les chlorures autres que ceux provenant de l'eau de mer peut également être induit par la destination de certains ouvrages et leur exploitation : rétention de liquides chlorés, nettoyage avec javellisation, contact avec des sels chlorurés, etc.

Tableau 4. Indications extraites du guide
fascicule 2 - risque de corrosion par les chlorures ayant une origine autre que marine (classes XD)

Parties d'ouvrage	XD		
	salage peu fréquent	salage fréquent	salage très fréquent
<i>fondations (pieux, barrettes, puis marocains, bétons de blocage, semelles, radiers...)</i>			
fondations de tous types entièrement immergées	-	-	-
fondations de tous types en zone de marnage	-	-	-
fondations profondes enterrées hors eau de mer	-	pas d'exposition XD, ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	XD2
fondations superficielles non immergées (partie aérienne)	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XD3
fondations superficielles non immergées (partie enterrée)	-	pas d'exposition XD, ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	XD2
<i>appuis (chevêtres sur pieux, piles, chevêtres sur piles, piédroits, culées y compris murs en retour...), parties d'ouvrages en contact avec le terrain, voûtes</i>			
parties immergées	-	-	-
parties en zone de marnage	-	-	-
parties enterrées	-	pas d'exposition XD, ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	XD2
parties à l'air libre	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XD3
faces intérieures des piles ou culées creuses	-	-	-
dalles de transition	-	XD2	XD2
<i>tablier (poutres, hourdis, dalles, caissons, traverses de ponts cadres, entretoises)</i>			
face supérieure du hourdis protégée par l'étanchéité	-	-	-
faces extérieures	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie
faces intérieures des caissons	-	-	-
<i>équipements et superstructures</i>			
corniches	-	XD3	XD3
solins de joints de dilatation	-	XD3	XD3
contre-corniches et longrines d'ancrage de barrière de sécurité (non revêtues)	-	XD3	XD3
barrières de sécurité en béton, garde-corps, écrans acoustiques	-	XD3	XD3
massifs d'ancrage (non revêtus) des candélabres, PPHM et panneaux de signalisation	-	XD3	XD3
corniches-caniveaux	-	XD3	XD3

Gel/dégel

Dans l'aide au choix des classes d'exposition vis-à-vis du gel (XF), qui se fonde en France notamment sur la carte des zones de gel, le guide tient compte des interprétations actualisées de la norme NF EN 206-1 en cours d'harmonisation avec les autres textes. Ainsi le caractère horizontal ou vertical de la paroi concernée, critère mis en avant par le texte européen en lien avec l'état de saturation en eau du béton, intervient de façon secondaire par rapport aux conditions géographiques responsables du nombre de cycles de gel-dégel, et au salage qui augmente ce nombre et favorise les dégradations par écaillement en surface. On note que l'attaque gel-dégel est à prendre en compte sur l'ensemble de l'épaisseur de la partie d'ouvrage considérée, même quand une seule face est exposée.

Attaque chimique par l'eau de mer

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 [9], appelé par la norme NF EN 206-1, 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 NA.F.1 ou NA.F.2 de la norme NF EN 206-1, 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 206-1 [1]. 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.

3.3 Classes associées à d'autres risques

Pour assurer la durabilité de certains ouvrages dans leurs conditions futures d'exploitation, il peut être nécessaire de considérer, outre les classes d'exposition associées aux risques de corrosion des armatures et d'attaque du béton, le risque d'abrasion. Le guide mentionne ce risque lorsqu'il est potentiellement à préciser dans les cahiers de charges, en cohérence avec les spécifications normalisées prévues. Ainsi, le risque d'abrasion est à apprécier par exemple pour les ouvrages

maritimes, 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. De façon générale 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 (sévérité croissante de 1 à 3) 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 [3].

Le guide complète également, pour les fascicules 2, 3, 5, 6 et 7, l'aide au choix des classes d'exposition associées aux risques de corrosion des armatures et d'attaque du béton, par des indications associées à la prévention de la réaction sulfatique interne, en application du guide technique « Recommandations pour la prévention des désordres dus aux réactions sulfatiques internes » publié par le LCPC en août 2007 [16]. Ce guide précise en effet : « la norme NF EN 206-1 ne définissant pas de classe d'exposition adaptée à la réaction sulfatique interne, trois classes complémentaires XH1, XH2 et XH3 sont introduites... et doivent être spécifiées au CCTP pour chaque partie d'ouvrage. ... Les spécifications définies (dans le guide en question pour la prévention de la RSI) devront être prises en compte en complément de celles imposées par la norme NF EN 206-1. » Par analogie avec la démarche de prévention de l'alcali-réaction, le niveau de prévention, et donc les précautions à mettre en œuvre, est associé non seulement à la classe d'exposition XH1, XH2 ou XH3, mais également au choix d'une catégorie d'ouvrage ou d'élément d'ouvrage, I, II ou III, qui relève de la responsabilité du maître d'ouvrage et dépend « de la nature de l'ouvrage, de sa destination, des conséquences des désordres sur la sécurité souhaitée, et de son entretien ultérieur ». La catégorie II comprend « les éléments porteurs de la plupart des bâtiments et les ouvrages de génie civil (dont les ponts courants) » et la catégorie III « les ponts et viaducs exceptionnels », tandis que la catégorie I comprend « les éléments aisément remplaçables ». Le choix de la classe XH1, XH2 ou XH3 correspond à un risque d'expansion et à une amplitude de gonflement d'autant plus élevés que l'élément est exposé à un environnement où l'humidité et les apports d'eau liquide sont importants. Les connaissances actuelles sur les mécanismes chimiques en jeu ne fournissent pas de seuils d'humidité universels et facilement utilisables, en particulier à cause du risque aggravant des apports d'eau liquide même s'ils ne sont pas permanents. Aussi le guide fournit-il des indications prudentes, notamment pour les parties d'ouvrages qui ont une probabilité élevée d'être critiques au sens des recommandations susvisées.

4. ORGANISATION DES FASCICULES, PRINCIPES ET CHOIX TECHNIQUES

4.1 Tableaux et parties d'ouvrages

Pour tous les fascicules hormis le fascicule 3 concernant les ouvrages maritimes, fluviaux et de navigation intérieure, l'aide au choix des classes d'exposition est déclinée, pour les classes d'exposition liées aux risques de corrosion par carbonatation induite par les chlorures, attaque gel-dégel et attaques chimiques, en quatre tableaux distincts. Ces tableaux portent en lignes les parties d'ouvrages, cohérentes du point de vue constructif et vis-à-vis de l'exposition des parois, et en colonnes les risques considérés, avec pour certains risques différents niveaux de sévérité correspondant à des sous-colonnes. L'utilisateur est donc guidé pour décomposer l'ouvrage considéré en parties cohérentes à la fois en termes constructifs et en termes d'exposition de la paroi aux agents extérieurs.

Chacun de ces quatre tableaux correspond à une zone géographique différente : l'intérieur des terres soumis à un gel faible ou modéré, l'intérieur des terres soumis à un gel sévère, le bord de mer et le front de mer. Ces quatre zones, liées principalement à la localisation géographique de l'ouvrage, sont exclusives pour la France métropolitaine et la plupart des D.O.M./T.O.M. Leur définition fait référence à la clause 4.2 (2) de l'annexe nationale de la norme NF EN 1992-1-1 [5], en termes de distance à la côte et de sévérité du gel. Pour les quelques territoires soumis à la fois à un environnement maritime et au gel sévère il convient d'utiliser les indications des tableaux 1 ou 2 liés à l'environnement maritime pour les classes d'exposition XC et XS, et celles du tableau 4 lié à l'environnement en zone de gel sévère pour les autres classes, notamment XD et XF.

Selon le type d'ouvrage et sa localisation géographique, le tableau adéquat recense par partie d'ouvrage la ou les classes d'exposition à considérer à l'intersection de la ligne et de la colonne appropriées. Les classes d'exposition conditionnent aussi bien la composition du béton que l'enrobage des armatures métalliques pour les parties en béton armé et des câbles de précontrainte ou des torons pour les parties en béton précontraint, ce qui permet de mieux comprendre la logique retenue pour le découpage en parties d'ouvrage proposé par le guide. Comme chaque partie d'ouvrage peut être soumise simultanément à plusieurs agressions et attaques, il convient, pour chaque partie d'ouvrage, de déterminer toutes les classes d'exposition à considérer, afin de prendre en compte avec précision l'ensemble des actions environnementales auxquelles est soumise la face de béton exposée. C'est pourquoi la présentation sous forme de tableau permet de visualiser d'un seul coup d'œil sur la ligne correspondant à la partie d'ouvrage l'ensemble des classes à considérer. Cette partie d'ouvrage doit alors respecter toutes les valeurs limites applicables pour la composition et les propriétés du béton pour chaque classe d'exposition. Il en est de même pour les épaisseurs d'enrobage et la valeur limite à retenir pour le calcul d'ouverture des fissures.

La description des ouvrages ou parties d'ouvrage utilisée dans les tableaux ne préjuge pas de leur mode de réalisation (coulé en place ou préfabriqué). Dans le cas des produits de structure, les normes de produit renvoient à la norme NF EN 206-1 et à l'Eurocode via la norme NF EN 13369 [7], et donc aux classes d'exposition telles que déclinées dans le guide. Dans le cas des produits en béton non structuraux disposant de normes autoportantes, les normes intègrent directement les spécificités des environnements auxquels les produits sont destinés. Les tableaux indiquent alors explicitement la référence de la norme de produit qui s'applique.

Le fascicule 3 comprend quant à lui 3 tableaux, portant de la même façon en lignes les parties d'ouvrages, et en colonnes les risques considérés, mais dont la distinction n'est pas directement géographique. Le premier tableau couvre les ouvrages maritimes comprenant les ouvrages portuaires et les digues. Le second concerne les ouvrages côtiers et en mer. Pour les bâtiments, dépendances, postes de contrôle, locaux techniques et ouvrages de génie civil (par exemple les phares à terre) construits en retrait de la côte, les classes d'exposition sont à déterminer à partir des tableaux couvrant, selon le cas, les bâtiments, les ouvrages d'art ou les ouvrages de génie civil. En général on se reportera au tableau concernant les constructions situées à moins de 100 m de la côte (parfois plus, jusqu'à 500 m, suivant la topographie particulière), à cause du risque d'exposition aux embruns. On considère enfin, dans le troisième tableau, les ouvrages fluviaux ou de navigation intérieure pour lesquels l'eau est réputée douce. A titre indicatif la salinité de l'eau de mer varie de 20 à 40 g/l de NaCl. Pour les ouvrages des ports atteints par la marée ou le mascaret, on se reportera donc au tableau 1 « ouvrages maritimes en béton - ouvrages portuaires ».

Dans tous les tableaux du guide, les classes d'exposition indiquées supposent une mise en œuvre correcte dans le respect des règles de l'art. Par exemple, une étanchéité étant prévue en revêtement des tunnels, elle est supposée être mise en place correctement et être pleinement efficace. En aucun cas, un défaut de mise en œuvre n'est pris en compte à la conception, par exemple, en surclassant le niveau d'agressivité de l'environnement. Les classes d'exposition indiquées ne tiennent pas compte non plus des défauts d'entretien de l'ouvrage et de ses équipements, quelquefois constatés. Il est rappelé notamment que l'évacuation des eaux est un facteur capital et doit donc être bien conçue et entretenue durant toute la durée d'utilisation de l'ouvrage, et que le défaut d'entretien ne doit pas être pris en compte à la conception, par exemple en surclassant le niveau d'agressivité de l'environnement.

4.2 Exemples et aspects spécifiques à certains fascicules

Les fascicules adoptent autant que possible une présentation similaire des tableaux. La description explicite des ouvrages et parties d'ouvrages s'efforce de respecter au mieux les usages professionnels. Pour chaque fascicule, des précisions associées à certains risques dont l'enjeu est plus important pour les catégories d'ouvrages visées font l'objet de textes et notes d'accompagnement spécifiques. Certains de ces aspects sont détaillés ci-après. Le tableau 5 illustre la présentation typique des tableaux du guide avec les colonnes correspondant aux différents risques, et des notes associées.

Tableau 5. Indications extraites du guide - fascicule 3 : ouvrages côtiers

Type d'ouvrages	Partie considérée	Corrosion par carbonatation	Corrosion par les chlorures marins	Attaques chimiques ***	Risque d'abrasion
Ouvrages de défense contre la mer et protection du littoral	Epis	XC4	XS3	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾ et ⁽⁹⁾
	Revêtement de talus (par dalles ou éléments préfabriqués)	XC4	XS3	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾ et ⁽⁹⁾
	Mur chasse mer, poutre de tête, couronnement	XC4	XS3	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾
	Escaliers et rampes d'accès	XC4	XS3	⁽⁵⁾	⁽⁷⁾ et ⁽⁸⁾
Ouvrages en mer : éoliennes, balises, tourelles, feux et phares en mer	Parties aériennes ou en zone de marnage	XC4	XS3	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾ , ⁽⁸⁾ et ⁽⁹⁾ en zone de marnage
	Partie immergée en permanence ** ⁽¹⁰⁾	XC1	XS2	⁽⁵⁾	⁽⁸⁾
	Partie complètement enterrée	XC2	XS1	⁽⁵⁾	-
Structures flottantes, ouvrages off-shore	Parties aériennes ou en zone de marnage	XC4	XS3	⁽⁶⁾	⁽⁸⁾ , ⁽⁸⁾ et ⁽⁹⁾ en zone de marnage
	Partie immergée en permanence ** ⁽¹⁰⁾	XC1	XS2	⁽⁶⁾	⁽⁸⁾
Ouvrages de prise et rejet d'eau, émissaires	Partie complètement enterrée	XC2	XS1	⁽⁶⁾	⁽⁸⁾
	Parties aériennes ou en zone de marnage	XC4	XS3	⁽⁶⁾	⁽⁸⁾
	Partie immergée en permanence ** ⁽¹⁰⁾	XC1	XS2	⁽⁶⁾	⁽⁸⁾

⁽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

⁽¹⁰⁾ Y compris éventuellement parties d'ouvrage (ou corps morts d'amarrage) posés au fond

Pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne, toutes les parties des ouvrages côtiers et des ouvrages à la mer 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.

Ouvrages d'art

Pour les ponts l'appréciation du salage se réfère à la voie franchie par l'ouvrage le cas échéant, sauf :
 - pour les dalles de transition, solins de joints de dilatation, barrières de sécurité en béton, longrines d'ancre, massifs d'ancre d'équipements et garde-corps en béton où on l'apprécie par rapport à la voie portée,

- pour les corniches et corniches caniveaux où on l'apprécie à la fois par rapport à la voie portée et à la voie franchie le cas échéant.

Tunnels

On considère en général pour un ouvrage enterré que l'influence de l'environnement extérieur (effet du gel sur les parties non enterrées, des sels marins, du salage s'il est appliqué sur l'itinéraire en dehors de l'ouvrage considéré, etc.) peut se faire sentir jusqu'à une distance de 200 mètres à partir des têtes, parfois moins, parfois plus selon la topographie particulière. Les parties enterrées (en contact avec le sol en profondeur) sont en général considérées comme protégées du risque de gel, sauf dans les zones de gel sévère à proximité des têtes où une analyse spécifique doit être conduite.

Ouvrages Maritimes

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 St Pierre et Miquelon et des Terres Australes et Antarctiques Françaises, on retiendra la classe XF4 pour les parties d'ouvrages en zone de marnage ou d'embruns.

Pour les ouvrages maritimes (tableaux 1 et 2 du fascicule 3), on considère que les parties « immersées 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.

5. CONCLUSION

Si ce « guide d'aide au choix des classes d'exposition » et ses différents fascicules n'ont pas de statut officiel d'un point de vue normatif, ils constituent cependant une indication du consensus technique présent, cohérent avec les niveaux d'exigence prescriptifs et/ou performantiels actuellement associés à ces classes en lien avec les durées d'utilisation de projet de référence en vigueur (50 ans pour les bâtiments, 100 ans pour les ouvrages de génie civil et ouvrages d'art courants).

De façon plus fondamentale, ces tableaux traduisent effectivement un état des connaissances et un retour d'expérience qu'un maître d'ouvrage ne peut plus ignorer :

- la prise en compte du risque de corrosion des armatures et parties métalliques des ouvrages par carbonatation, qui concerne pratiquement toutes les structures à des degrés divers, la sévérité du risque étant associée à la fois à l'humidité environnante moyenne (pénétration du gaz carbonique maximale pour une humidité relative comprise entre 40 et 70 %), et à des apports d'eau liquide (intempéries, condensations), le retour d'expérience sur le patrimoine bâti confirmant les analyses et modèles issus de la recherche.
- la prise en compte du risque de corrosion des armatures et parties métalliques des ouvrages par pénétration des ions chlore, d'origine marine ou non : la pénétration de ces ions est favorisée par les cycles d'humidification-séchage, ce qui explique le niveau maximal de prévention à adopter pour les zones de marnage, soumises aux projection d'embruns ou directement soumises aux projections contenant des sels de déverglaçage.
- la prise en compte des risques d'attaque chimique du béton et d'attaque physique liée aux cycles de gel-dégel dont le nombre et l'effet sont amplifiés par la présence concomitante de sels.
- le cas échéant, la prise en compte du risque d'abrasion.
- enfin, le risque accru induit par l'apport éventuel d'eau liquide (immersion, projections ou intempéries), ou d'humidité persistante, dans le cadre de la prévention des désordres dus aux réactions de gonflement du béton et notamment à la réaction sulfatique interne.

Si un effort reste actuellement nécessaire pour chacun avant d'atteindre l'aisance parfaite dans l'emploi de ces classes, on peut néanmoins affirmer que la cohérence maintenant réelle entre l'ensemble des normes françaises et européennes sur le sujet constitue un atout pour exprimer de façon plus rationnelle l'ambition de durabilité d'un ouvrage et ses contraintes, et pour y répondre en mobilisant le meilleur des pratiques et possibilités en jouant tant sur le matériau béton que sur les dispositions d'enrobage et de ferraillage, la conception d'ensemble et de détail, les dispositifs de protection et la qualité de réalisation. On peut d'ailleurs noter que des démarches similaires sont en cours dans le contexte de la normalisation américaine et internationale [19-20]. Dans tous les cas l'enjeu est de favoriser de façon ouverte l'assurance de la qualité associée aux dispositions classiques liées à la durabilité, et aussi, en particulier dans les environnements sévères, l'émergence de variantes

appropriées pour atteindre l'objectif de durabilité. Le groupe de travail de l'EFB espère ainsi avoir, par ce guide, facilité la réalisation de l'objectif partagé de constructions durables.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs ont plaisir à remercier ici non seulement les principaux rédacteurs des fascicules mais également André Coin (EGF-BTP), Jacques Cortade (Consultant, président de la commission EC2), Mokhtar Daoudi (CETEN-Apave), Benjamin Daubilly (FNTP), François Gaudin (EGF-BTP), Aldéric Hauchecorne (CETMEF), Evelyne Osmani (Eiffage), Jean-Marie Paillé (Socotec), Benoît Thauvin (LRPC Saint-Brieuc), pour leur participation active au groupe de travail et à l'amélioration de ce guide. Ils remercient également Jean-Michel Torrenti (LCPC) pour son soutien lors de la création de ce groupe de l'EFB.

7. REFERENCES

Normes :

- [1] NF EN 206-1 Béton. Partie 1 : spécification, performances, production et conformité, AFNOR, avril 2004.
- [2] NF EN 1990 / NA Eurocodes structureaux. Bases de calcul des structures. Annexe nationale à l'EN 1990 : 2002, AFNOR, juin 2004 (en cours de révision, classement NF P 06-100-2).
- [3] NF EN 1992-1-1 Eurocode 2. Calcul des structures en béton. Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments, AFNOR, octobre 2005.
- [4] NF EN 1992-2 Eurocode 2. Calcul des structures en béton. Partie 2 : ponts en béton - calcul et dispositions constructives, AFNOR, mai 2006.
- [5] NF EN 1992-1-1 / NA Eurocode 2. Calcul des structures en béton. Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments. Annexe nationale à la NF EN 1992-1-1 :2005, AFNOR, mars 2007.
- [6] NF EN 1992-2 / NA Eurocode 2. Calcul des structures en béton. Partie 2 : ponts en béton - calcul et dispositions constructives. Annexe nationale à la NF EN 1992-2, AFNOR, avril 2007.
- [7] NF EN 13 369 Règles communes pour les produits préfabriqués en béton, AFNOR, juillet 2006.
- [8] PR NF EN 13 670 et PR NF EN 13 670/NA, Exécution des structures en béton, projet de norme, juin 2009 - projet d'annexe nationale mai 2010.

Fascicules de documentation de l'AFNOR :

- [9] FD P 18-011 Béton. Définition et classification des environnements chimiquement agressifs. Recommandations pour la formulation des bétons, AFNOR, décembre 2009.
- [10] FD P 18-326 Béton. Zones de gel en France. AFNOR, novembre 2004.

Guides :

- [11] Publication CERIB FIB, Les classes d'exposition. Aide à la prescription - Recommandations professionnelles, édition décembre 2009, 12 pages.
- [12] Collection technique CIMbéton, cahier « Solutions Béton », fascicule SB OA 2010-1 Guide pour le choix des classes d'exposition des ouvrages d'art en béton, octobre 2010, 8 pages.
- [13] Collection technique CIMbéton, cahier « Solutions Béton », fascicule SB OA 2010-2 Guide pour le choix des classes d'exposition des ouvrages maritimes et fluviaux en béton, décembre 2010, 8 pages.
- [14] Collection technique CIMbéton, cahier « Solutions Béton », fascicule SB OA 2010-3 Guide pour le choix des classes d'exposition des tunnels routiers creusés, février 2011, 8 pages.
- [15] techniques et méthodes des LPC, Recommandations provisoires : « Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton. Application de l'approche performante », collectif, LCPC, mars 2010.
- [16] techniques et méthodes des LPC, Guide technique : « Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne », collectif, LCPC, août 2007.
- [17] techniques et méthodes des LPC, Guide technique : « Structures en béton conçues avec l'Eurocode 2. Note technique sur les dispositions relatives à l'enrobage pour l'application en France », F. Toutlemonde, A. Coin. LCPC, novembre 2005.
- [18] techniques et méthodes des LPC, Guide technique : « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel », collectif, LCPC, décembre 2003.

Autres références :

- [19] fib Model Code 2010. First complete draft, vol. 1-2, fib Bulletin 55-56, fédération internationale du béton, Lausanne, Mars 2010.

[20] D. S. Lane, R. J. Detwiler, R. D. Hooton, « Testing transport properties in concrete. Assessing key indicators of durability », *Concrete International*, vol. 32 n° 11, special issue « Durability », november 2010, pp. 33-38.