

# Solutions béton

Un enjeu de santé publique et de protection de l'environnement	P. 2
Le corpus normatif du béton	P. 3
Les évolutions du contexte normatif	P. 4
Détermination des classes d'exposition	P. 5
Valoriser le process	P. 6
Donner du sens	P. 7
Optimisation de l'enrobage des armatures	P. 8
Quelques conseils pour la formulation des bétons, la conception du ferrailage et pour les opérations de bétonnage	P. 9
Prévention de la Réaction Sulfatique Interne (RSI)	P. 11
Aide au choix des classes d'exposition	P. 12



## Les stations d'épuration des eaux usées

Les stations d'épuration des eaux usées sont des ouvrages complexes pour lesquels le béton offre des solutions techniques adaptées, reconnues et pérennes. Elles doivent répondre à des exigences fonctionnelles, environnementales et structurelles liées aux spécificités des processus de traitement et aux évolutions réglementaires de plus en plus contraignantes, dans une logique d'intégration paysagère et architecturale. Ce document synthétise des conseils pour la prescription et la formulation des bétons, ainsi que pour la réalisation des ouvrages. Il donne la parole à deux architectes spécialisés dans ce type de programmes et recourant au béton sous toutes ses formes et dans tous ses états.

Texte : Patrick Guiraud

# Un enjeu de santé publique et de protection de l'environnement

Photo : Willy Berré



→ Station d'épuration des eaux usées : bassins de traitement.

Une station d'épuration des eaux usées est alimentée par un réseau d'assainissement collectif (réseau unitaire, qui évacue les eaux usées et les eaux pluviales dans la même canalisation, ou réseau séparatif, qui collecte les deux types d'eau dans des canalisations séparées).

Ce réseau est constitué de canalisations, en général en béton, qui collectent les eaux usées et pluviales et les acheminent par gravité jusqu'à la station où elles sont traitées.

Le traitement des eaux usées a pour objectif de les dépolluer pour qu'elles n'altèrent pas la qualité du milieu naturel dans lequel elles seront ensuite rejetées. Il constitue une phase fondamentale dans le cycle vertueux de l'eau.

Il répond à deux préoccupations essentielles :

- préserver le patrimoine naturel et la qualité de vie en jouant un rôle de protection sanitaire des populations

et en contribuant au maintien de la qualité de l'environnement et des activités liées à l'eau ;

- préserver les ressources en eau.

Le traitement des eaux usées est donc un enjeu de santé publique et de protection de l'environnement encadré par une réglementation européenne de plus en plus exigeante.

La loi sur l'eau de 1992 définit les débits de référence pour les stations de traitement des eaux et les performances minimum à atteindre. La Directive Eau Résiduaire Urbaine (DERU) a renforcé les exigences environnementales en particulier concernant le phosphore et l'azote.

La station d'épuration est composée de deux filières de traitement : la filière eau qui épure les eaux selon trois principales phases (traitements primaire, secondaire et tertiaire) et la filière boue qui traite les boues issues des divers traitements.

non organiques et les traitements biologiques appliqués aux matières organiques.

- Les traitements physico-chimiques (floculation, centrifugation, filtration, oxydation, réduction chimique, osmose) transforment les polluants non biodégradables en suspension dans les eaux en substances non toxiques, à l'aide de réactifs.

- Les traitements biologiques aéro-bies utilisent des bactéries pour dégrader les impuretés organiques dans des bassins d'aération. Ils reposent sur la sédimentation des matières en suspension qui conduit à la formation de boues et sur l'activité biologique des bactéries qui se multiplient et absorbent les matières organiques. Des procédés biologiques artificiels (lits bactériens, boues activées et biofiltration accélérée) permettent d'améliorer les transformations et donc d'assurer une meilleure destruction des matières organiques.

## LE TRAITEMENT TERTIAIRE

Il permet d'éliminer la pollution bactériologique, l'azote (nitrification pour limiter les risques d'eutrophisation) et le phosphore (déphosphatation).

## LE TRAITEMENT DES BOUES

Les diverses opérations précédentes aboutissent à la formation de boues. En fonction de leur valorisation, elles font l'objet d'un traitement et d'un conditionnement permettant de réduire leur volume (déshydratation pour diminuer la teneur en eau) et de les stabiliser (traitement biologique ou chimique) pour réduire la matière organique. Les boues sont utilisées pour l'amendement des sols agricoles, pour l'élaboration de compost. Elles peuvent être aussi incinérées ou valorisées dans une unité de méthanisation. ■

## LE TRAITEMENT PRIMAIRE

Il permet d'éliminer les huiles et les matières en suspension (sables, déchets grossiers, bois, papiers, plastiques...). Il comprend diverses opérations : dégrillage (les eaux passent à travers des grilles de plus en plus fines qui retiennent les déchets volumineux), dessablage (dépôt des sables dans le fond des bassins), dégraissage et déshuilage (remontée en surface des graisses et des huiles grâce à l'injection de fines bulles d'air) et décantation primaire (dépôt par gravité des matières solides en suspension au fond des bassins).

## LE TRAITEMENT SECONDAIRE

Il est destiné à éliminer diverses matières en solution dans l'eau (substances minérales, matières organiques...). Il fait appel à deux types de traitements : les traitements physico-chimiques pour les matières

# Le corpus normatif du béton

Le corpus normatif du béton constitue un ensemble cohérent, homogène et complet, qui s'inscrit dans une logique de progrès visant à optimiser la qualité des bétons et la durabilité des ouvrages.

## LES NORMES

### DE DIMENSIONNEMENT : LES EUROCODES

Ces normes européennes forment un ensemble homogène de règles techniques harmonisées pour la conception et le calcul des structures de Génie Civil et des bâtiments. Elles s'appliquent à différents types de matériaux (béton, acier, bois...) et différents types de constructions (bâtiments, ponts, silos...).

Elles font appel à une approche semi-probabiliste de sécurité des constructions (méthode des coefficients partiels) avec des méthodes de dimensionnement fondées sur le concept des états limites (états limites de service et états limites ultimes).

Les Eurocodes constituent un ensemble de 58 normes regroupées en 10 documents (*NF EN 1990* à *NF EN 1999*).

La norme de base pour le calcul des structures en béton est l'Eurocode 2 qui comprend quatre normes :

- *NF EN 1992-1-1* : règles générales et règles pour les bâtiments ;
  - *NF EN 1992-1-2* : règles générales – calcul du comportement au feu ;
  - *NF EN 1992-2* : ponts – calcul et dispositions constructives ;
  - *NF EN 1992-3* : silos et réservoirs.
- L'Eurocode 2 permet le calcul des bâtiments et des ouvrages de génie civil en béton non armé, en béton armé ou en béton précontraint.

### LES NORMES SUR LES CONSTITUANTS DES BÉTONS

#### Les normes ciments

##### ■ La norme *NF EN 197-1*

La norme *NF EN 197-1* « Ciment – partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants ».

##### ■ Les autres normes ciments

– ciment pour travaux à la mer (PM) : norme *NFP 15-317* ;

– ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (ES) : norme *NFP 15-319* ;

– ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint (CP) : norme *NFP 15-318* ;

– ciments de haut fourneau à faible résistance à court terme :

norme *NF EN 197-4* ;

– ciments sursulfatés (CSS) : norme *NF EN 15743*.

#### Les normes granulats

La norme *NF EN 12620* (granulats pour béton) spécifie les caractéristiques des granulats élaborés à partir des matériaux naturels, artificiels ou recyclés, qui sont utilisés dans la fabrication du béton.

La norme *NF P 18-545* (granulats, éléments de définition, conformité et codification) regroupe en codes (A.B.C.D.), les catégories définies dans la norme *NF EN 12620* pour les divers usages possibles.

#### Les normes adjuvants pour béton

La norme pour les adjuvants est la norme *NF EN 934-2*.

#### Les normes additions

Des additions peuvent être utilisées pour la formulation des bétons :

■ fillers d'origine siliceuse :

norme *NFP 18-509* ;

■ fillers d'origine calcaire :

norme *NFP 18-508* ;

■ fumée de silice :

norme *NF EN 13263* ;

■ cendres volantes :

norme *NF EN 450* ;

■ laitiers vitrifiés moulus de haut fourneau : norme *NF EN 15167* ;

■ métakaolin : norme *NFP 18-513*.

#### La norme eau

L'eau utilisable pour la fabrication du béton fait l'objet de la norme *NF EN 1008*.

#### Les normes d'essais sur béton

Les principaux essais pour déterminer les propriétés, les caractéristiques et les performances du béton font l'objet de la série des normes *NF EN 12350* pour le béton frais, et *NF EN 12390* pour le béton durci.

### LES RECOMMANDATIONS ET LES FASCICULES DE DOCUMENTATION

Ces documents synthétisent des principes de prévention pour des problématiques de durabilité en complétant les normes européennes :

■ recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction ;

■ recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel ;

■ recommandations pour la prévention des désordres dus aux réactions sulfatiques internes ;

■ fascicule de documentation *FD P 18-011* : Béton – Définition et classification des environnements chimiquement agressifs.

*Nota* : le fascicule *FD P 18-011* définit des environnements agressifs pour les bétons armés et les bétons précontraints. Il recommande des mesures préventives pour la formulation des bétons résistant à ces environnements agressifs.

### LA NORME BÉTON

La norme *NF EN 206-1* (Béton, partie 1 : spécifications, performances, production et conformité), concerne les bétons prêts à l'emploi, les bétons fabriqués sur chantier et les produits préfabriqués en béton, destinés aux bâtiments et aux ouvrages de génie civil.

Elle définit les spécifications sur les bétons à l'état frais et à l'état durci, la

production, la livraison et le contrôle de conformité des bétons et prend en compte la notion de durabilité en s'appuyant sur la notion de classes d'exposition.

Elle précise, pour les bétons de structures, les responsabilités du prescripteur (responsable de la spécification du béton) et du producteur (responsable de la conformité et du contrôle de la production).

Elle est complétée par une Annexe Nationale qui spécifie les dispositions complémentaires à respecter en France, en tenant compte des spécificités climatiques et géographiques françaises.

### LA NORME MISE EN ŒUVRE DES BÉTONS

La norme *NF EN 13670* « Exécution des ouvrages en béton » couvre l'exécution des bétons coulés en place et la mise en place des produits préfabriqués en béton.

Elle concerne l'exécution des ouvrages en béton (bâtiments et structures de génie civil), afin d'assurer le niveau de sécurité et d'aptitude au service au cours de la durée d'utilisation de l'ouvrage en conformité avec la norme *NF EN 1990*.

Elle définit un ensemble de prescriptions et d'exigences techniques pour l'exécution et le contrôle d'une structure en béton.

Le fascicule 65 est un document complémentaire pour l'application de la norme *NF EN 13670* pour les ouvrages de génie civil en béton armé et précontraint.

Il fixe les obligations de l'entrepreneur concernant :

- les règles techniques à observer pour l'exécution des ouvrages ;
- les règles de l'organisation à mettre en place en vue d'assurer l'obtention de la qualité requise. ■

# Les évolutions du contexte normatif

Le corpus normatif s'enrichit régulièrement en intégrant de nouvelles normes ou lors de la mise à jour de normes existantes. Cette évolution permet de bénéficier du fruit des résultats de la recherche et de l'expertise.

## LA NORME CIMENT : NF EN 197-1

La norme ciment a fait l'objet d'une révision en avril 2012. Ce nouveau texte introduit 7 ciments courants résistants aux sulfates, 3 ciments de haut fourneau à faible résistance à court terme et 2 ciments de haut fourneau à faible résistance à court terme résistants aux sulfates.

Ces ciments courants qui offrent des chaleurs d'hydratation limitées et/ou satisfont aux exigences relatives aux propriétés de résistance aux sulfates sont particulièrement adaptés pour la réalisation des ouvrages des stations de traitement des eaux usées.

### ■ Ciments courants résistants aux sulfates

Ces 7 ciments sont identifiés par la notation SR. Ils se distinguent par la teneur en C3A du clinker. Ils sont regroupés en 3 types :

■ ciment portland résistant aux sulfates :

CEM I-SR0 ; CEM I-SR3 ; CEM I-SR5 ;

■ ciment de haut fourneau résistant aux sulfates :

CEM III/B-SR ; CEM III/C-SR ;

■ ciment pouzzolanique résistant aux sulfates :

CEM IV/A-SR ; CEM IV/B-SR.

### ■ Ciments à faible résistance à court terme

Ces ciments de haut fourneau de type CEM III se distinguent par des exigences relatives à la résistance à court terme. Ils sont identifiés par la notation L.

### ■ Ciments à faible chaleur d'hydratation

Les ciments courants à faible chaleur d'hydratation (inférieure à 270 J/g) sont identifiés par la notation LH.

**Nota :** certains ciments courants sont considérés comme résistants

aux sulfates par des normes nationales. C'est le cas en France pour les ciments courants conformes à la norme NF P 15-319 qui concerne les ciments CEM III/A-S ; CEM II/A-V ; CEM II/A-P ; CEM II/A-M(S-V) ; CEM III/A ; CEM V/A ; CEM V/B.

## LA NORME BÉTON : NF EN 206-1/CN

La norme NF EN 206-1 a fait l'objet d'une révision éditée sous la forme d'un Complément National qui est entré en vigueur fin 2012. Les principales évolutions de ce texte concernent en particulier :

■ les granulats : introduction des granulats recyclés et précisions sur leurs caractéristiques et possibilités d'utilisation pour la formulation des bétons ;

■ les additions : précisions sur les caractéristiques et domaines d'utilisation et introduction d'une nouvelle addition normalisée, le métakaolin ;

■ les classes d'exposition : précisions sur les définitions des classes ;

■ les bétons soumis aux sels de déverglaçage en zone de gel modéré : proposition de deux possibilités de formulation ;

■ les tableaux de l'annexe F : substitution du ciment possible avec des ciments de type CEM II ;

■ les bétons d'ingénierie : introduction de ce nouveau concept de béton (béton destiné à un ouvrage donné ou un ensemble d'ouvrages d'un projet donné, dont la formulation résulte d'une étude préliminaire réalisée sous la responsabilité du prescripteur avant le début de l'opération considérée et acceptée par le producteur et l'utilisateur du béton) ;

■ les contrôles et critères de conformité et les contrôles de production : précisions et compléments ;

■ l'information du producteur de béton à l'utilisateur : précisions sur les informations pouvant être communiquées.

**Nota :** la définition de l'agressivité chimique et la collecte des informations relatives à la composition des milieux (sols, eaux, gaz) avec lesquels les bétons seront en contact relèvent de la responsabilité du maître d'œuvre.

## LA NORME BÉTON AUTOPLAÇANT : NF EN 206-9

Le béton autoplaçant fait l'objet de la norme NF EN 206-9. Cette norme précise les règles qui s'appliquent au BAP en complément des règles communes aux bétons spécifiés dans la norme NF EN 206-1/CN. Elle couvre les BAP destinés aux structures coulées en place ou préfabriquées pour les bâtiments et les ouvrages de Génie Civil.

Elle définit des classes pour spécifier les BAP :

■ classe d'exposition ;

■ classes de consistance à l'état frais ;

– classe d'étalement : SF1, SF2, SF3 ;

– classe d'aptitude à l'écoulement : PL1, PL2 ;

– classe de résistance à la ségrégation : SR1, SR2.

Elle introduit deux paramètres essentiels pour la détermination des propriétés du BAP.

■ **L'intervalle d'écoulement :** dimension (mm) de l'intervalle le plus petit à travers lequel le béton doit cheminer pour se mettre en place (fonction de la géométrie du coffrage, des dispositions des armatures...).

■ **La durée pratique d'utilisation :** durée autorisée entre l'heure de fabrication du béton et la fin de sa mise en œuvre.

## LA NORME D'EXÉCUTION DES STRUCTURES EN BÉTON : NF EN 13670

La norme NF EN 13670 introduit la notion de **classes d'exécution** qui permet au concepteur, en fonction de l'importance de la structure ou de ses composants et des difficultés d'exécution, de préciser le niveau de management de la qualité adapté pour l'ouvrage à réaliser.

La classe d'exécution, qui doit être définie dans les spécifications d'exécution, se décline en un ensemble d'exigences qui permettent de spécifier le management de la qualité et les niveaux de qualité nécessaires pour l'exécution de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage.

La norme distingue trois classes d'exécution (1, 2, 3), avec une sévérité d'exigences croissantes de 1 à 3, qui correspondent aux trois niveaux de différenciation de fiabilité définis dans l'annexe B de la norme NF EN 1990. À chaque classe d'exécution est associé un contrôle d'exécution spécifique.

La norme NF EN 13670 introduit la notion de **classes de cure** (classe 1 à 4), en fonction de la durée de la période de cure (classe 1), ou du pourcentage de la résistance à la compression à 28 jours (classes 2 à 4). La durée nécessaire d'application de la cure dépend en particulier de l'évolution des propriétés du béton dans la zone de surface du parement et des conditions climatiques lors de la réalisation du chantier. ■

**Pour toute précision**  
Consulter **Solutions béton**  
SB OA 2012-2, La norme  
NF EN 13670 – Exécution  
des structures en béton.

# Détermination des 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 traduisant les attaques et risques de corrosion auxquels 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, dont la spécification est de la responsabilité du maître d'ouvrage, sont une donnée de base du projet.

Le maître d'ouvrage se trouve ainsi engagé dans l'expression des risques et des conditions d'exploitation de la structure qu'il commande.

La norme *NF EN 206-1/CN*, 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 concernés et donne à titre informatif des exemples d'ouvrages ou de parties d'ouvrage.

Les classes d'exposition sont nécessaires en particulier pour la détermination des spécifications des bétons et des enrobages des armatures ainsi que pour le dimensionnement vis-à-vis de la maîtrise de la fissuration. À chaque classe d'exposition corres-

pondent 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 eau/liant équivalent la classe de résistance du béton, la teneur maximale en chlorures ainsi que l'enrobage des armatures.

## 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 ou 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), 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.

## CORROSION INDUITE PAR LES CHLORURES PRÉSENTS DANS L'EAU DE MER

Les classes XS1 à XS3 sont relatives à la corrosion des armatures induite par les chlorures présents dans l'eau de mer. Elles concernent donc les bétons contenant des armatures

soumises au contact des chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin.

## ATTAQUES GEL/DÉGEL AVEC OU SANS AGENT DE DÉVERGLAÇAGE

Les classes d'exposition XF1, XF2, XF3 ou XF4 concernent les bétons soumis à une attaque des cycles gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage (voir cartes des zones de gel et des zones de salage en France et fascicule de documentation FD P 18-326).

**Nota :** les classes XF2 et XF4 couvrent les risques de corrosion liés aux chlorures véhiculés par les sels de déverglaçage et il n'est pas nécessaire de leur combiner les classes XD pour s'en prémunir.

## ATTAQUES CHIMIQUES

Lorsque le béton est au contact d'un milieu agressif (eaux, sols, gaz...), il peut faire l'objet, selon le niveau d'agressivité, à l'une des classes : XA1, XA2 ou XA3, correspondant respectivement à des environnements à faible, modérée ou forte agressivité chimique.

La norme *NF EN 206-1/CN* dans le tableau 2 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. En complément de ce tableau, il convient de se reporter au fascicule de documentation FD P 18-01.

**Nota :** les bétons des ouvrages de traitement en contact avec les eaux usées et les boues sont concernés particulièrement par ces classes d'exposition. Pour certains types d'agression, il peut être nécessaire d'appliquer un revêtement de protection sur le béton, adapté à l'action des eaux ou des gaz susceptibles de se former.

## 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 ayant une cohérence constructive, de déterminer l'ensemble des classes d'exposition pour prendre en compte avec précision toutes les conditions environnementales auxquelles est soumis chaque 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. ■

Tableau n° 1 – Définition des classes d'exposition

	CLASSES D'EXPOSITION	
	XO	Aucun risque de corrosion ou d'attaque
Risque de corrosion	XC1 à XC4	Corrosion induite par carbonatation
	XD1 à XD3	Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine
	XS1 à XS3	Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer
Attaques	XF1 à XF4	Attaques gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage
	XA1 à XA3	Attaques chimiques

# Valoriser le process

## Point de vue de l'expert

**MONIQUE LABBÉ**, *architecte*

Les Ateliers Monique Labbé se sont intéressés aux infrastructures de l'environnement dès les années 1980. Monique Labbé est par ailleurs présidente du comité « Espace souterrain » de l'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (AFTES).

### Quel intérêt trouvez-vous à réaliser des infrastructures de l'environnement ?

J'ai été contactée en 1984 pour faire la décoration en céramique sur deux façades en béton de la station de relèvement des eaux usées de Crosne. J'ai découvert alors les éléments du process industriel qui étaient enterrés : j'ai été si intéressée que j'ai suggéré aux ingénieurs de révéler en surface cette technique pour la valoriser. Avec Christian Boute-loup, ingénieur chez Trindel, nous avons tout décortiqué et

j'ai proposé de revoir l'organisation des flux. Par ailleurs, j'ai suggéré, toujours en dialogue avec le maître d'ouvrage et l'entreprise, de faire intervenir le plasticien Constantin Xenakis qui a dessiné des motifs dans le béton brut. Cette réalisation m'a amenée à travailler sur la station de relèvement des eaux usées de Villeneuve-Saint-Georges.

### Vous avez ensuite réalisé des stations d'épuration à Arras, Vichy, Bordeaux, Saint-Nazaire, Évry...

J'ai eu la chance à Arras de travailler avec un ingénieur italien de Bilfinger qui a pris le temps de m'expliquer dans les détails tout le process, ce qui m'a permis de remanier entièrement le projet en termes d'organisation de l'espace, notamment celui des flux de livraison et de maintenance.

### Quels sont vos matériaux de prédilection ?

J'aime le béton, qui est un matériau extrêmement souple. Il permet de faire ce qu'on veut. J'aime qu'un matériau soit massif, brut, vrai, c'est pourquoi je l'utilise très régulièrement. Je fais confiance à l'entreprise pour la formulation mais j'essaie surtout de partir de son savoir-faire pour concevoir le traitement de surface afin que la mise en œuvre soit le plus proche possible de ce que j'ai projeté.

### Qu'apporte un architecte sur de tels programmes ?

L'architecte joue plusieurs rôles : il est là pour mettre en valeur le process ; il introduit l'homme dans la technique, en concevant des lieux de travail agréables, pratiques, en améliorant le plan par des circulations plus fluides, plus confortables.

L'organisation de l'espace est l'essence même du métier d'architecte et c'est en démêlant les flux que j'ai gagné ma place dans ce milieu. Enfin, l'architecte doit intégrer le projet dans le site.

### Selon vous, l'architecture doit-elle s'imposer formellement ou s'effacer ?

Tout dépend du contexte. À Villeneuve-Saint-Georges, le lieu était ingrat mais je savais qu'un pont allait être construit. J'ai voulu exprimer le travail souterrain d'assainissement, la force des eaux qui remontent, d'où ce geyser de béton.

À Arras, j'ai choisi de mettre en scène les bassins de décantation qui reflètent le ciel, et j'ai implanté en contrebas, à l'arrière, ce qui était moins poétique. ■ *Propos recueillis par Delphine Désveaux*

Photo : Marcus Robinson



→ La station de relèvement des eaux usées de Villeneuve-Saint-Georges exprime le jaillissement souterrain des eaux usées.

Photo : Willy Berré



→ À Saint-Nazaire, la STEP est mixée avec un centre de formation. Les bâtiments techniques sont réalisés en béton brut ponctuellement rythmé de joints creux.

# Donner du sens

## Point de vue de l'expert

LUC WEIZMANN, architecte, fondateur de l'agence LWA

Depuis 25 ans, Luc Weizmann développe une vision créative très personnelle sur les « architectures de l'environnement », plus spécifiquement dans le domaine de l'eau. Parmi ses projets, l'unité de traitement des pollutions azotées Seine Aval, commanditée par le SIAAP<sup>1</sup>, a reçu en 2010 deux prix spéciaux AMO « Lieux de travail Architecture et Environnement ».

### Quel regard portez-vous sur ces programmes liés à l'environnement ?

En 1990, j'ai été appelé pour mener les études architecturales préalables de l'usine de traitement des eaux de Colombes. Cela a été le début d'une série de projets avec la station d'épuration de Rouen, de nombreuses unités au sein de l'usine d'Achères où nous participons aujourd'hui à la réalisation d'une nouvelle tranche, ainsi que l'usine de traitement des eaux du Carré de Réunion en chantier dans la plaine de Versailles.

Rejetées à l'écart de la cité comme les maladreries du Moyen Âge, les stations d'épuration traitent le passif d'une société surconsommatrice qui les ignore. Elles se révèlent néanmoins chargées d'une valeur profonde puisque leur fonction est de rendre au milieu naturel une eau purifiée. Dans

<sup>1</sup> – Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne.

une complexité croissante, elles assurent la remise en ordre des quatre éléments naturels – les eaux, dans tous leurs états, polluées, usées, industrielles, pluviales, potables... ; la terre, avec le traitement des boues ; les airs, saturés de gaz multiples, qu'il convient de traiter et de désodoriser ; et puis le feu, avec des consommations et des productions d'énergie considérables.

### L'architecture possède-t-elle sa place dans ces projets particulièrement techniques ?

Ces projets, qui correspondaient auparavant à des infrastructures industrielles, sont devenus de véritables architectures. Répondant à des enjeux environnementaux émergeant depuis deux décennies à peine, ils appartenaient à des univers méconnus, sans références. Des typologies nouvelles ont été progressivement inventées dans des sites géographiques souvent très beaux, contraintes par la topographie, l'écoulement gravitaire des effluents ou les particularités du territoire.

Il me paraît important d'investir du sens dans ces ouvrages dont les fonctions citoyennes relèvent de la gestion du bien commun, dans la noblesse de ce processus de transformation du déchet en produit, du sale en propre. Nous devons les valoriser comme des équipements publics à part entière, au même titre que les stades ou

Photo : © Claude Cieutat



→ Usine Seine Aval à Achères. L'unité de nitrification répond à une volonté de raffinement dans le détail et l'emploi de matériaux pérennes.

les centres culturels, en leur conférant une forte présence. C'est là le rôle culturel et social de l'architecture.

### Quel usage trouve le béton dans vos projets ?

Dans ces projets à la charnière entre génie civil et bâtiment, le béton est un matériau intimement constitutif. Il est bien sûr utilisé en quantité impressionnante pour ses qualités techniques, notamment pour les infrastructures, les fondations, toujours très complexes, les ouvrages hydrauliques répondant à des contraintes structurelles très particulières, à la nécessité d'hydrofugation, mais également pour sa résistance aux agressions chimiques et à la corrosion...

Cette présence massive du béton, loin d'être cachée, doit être valorisée en superstructure dans la diversité de ses finitions : brut, matricé, poli, sablé, désactivé... L'expression du béton peut être anoblie, devenir sculpturale comme les incrustations de billes que nous avons réalisées pour les façades des bassins de l'unité de nitrification à Achères.

Le rapport entre la mise en œuvre de volumes considérables et la subtilité du traitement de certains parements est particulièrement riche. Il peut notamment s'exprimer dans une relation puissante au paysage et aux autres matériaux, chacun pris pour ses qualités intrinsèques. ■ *Propos recueillis par Delphine Désveaux*

# Optimisation de l'enrobage des armatures

L'enrobage des armatures représente la distance entre la surface du béton et l'armature la plus proche.

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.

C'est l'enrobage nominal qui est précisé sur les plans d'exécution de l'ouvrage. Il est égal à la somme de l'enrobage minimal et d'une « marge de sécurité »  $\Delta C_{dev}$  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*) 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/CN*, à optimiser la durabilité des ouvrages.

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

- les **classes 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** ;

**Tableau n° 2 – Modulation de la classe structurale**

Critère	CLASSES D'EXPOSITION						
	XO	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						
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						

- 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.

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 :

$$C_{min} = \max [C_{min,b} ; C_{min,dur} + \Delta C_{dur,y} - \Delta C_{dur,st} - \Delta C_{dur,add} ; 10 \text{ mm}]$$

Avec :

- $C_{min,b}$  : enrobage minimal vis-à-vis des exigences d'adhérence (béton/armatures) ;
- $C_{min,dur}$  : 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.

## Choix et modulation de la classe structurale

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 des stations de traitement des eaux sont classés dans la catégorie S6. Ils sont dimensionnés pour une durée d'utilisation de projet de 100 ans.

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

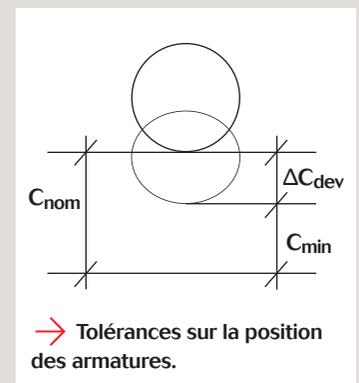
L'enrobage minimal doit être majoré, pour tenir compte des tolérances pour écart d'exécution ( $\Delta C_{dev}$ ).

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.

**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. ■



**Tableau n° 3 – Valeur de  $C_{min,dur}$  requise vis-à-vis de la durabilité pour les armatures de béton armé**

Classes structurale	CLASSES D'EXPOSITION							
	XO	XC1	XC2 XC3	XC4	XD1 XS1	XD2 XS2	XD3 XS3	
S4	10	15	25	30	35	40	45	
S5	15	20	30	35	40	45	50	
S6	20	25	35	40	45	50	55	

# Quelques conseils pour la formulation des bétons, la conception du ferrailage et pour les opérations de bétonnage

L'application de quelques règles de l'art et principes de prévention élémentaires respectés au niveau de la formulation du béton, de la conception de l'ouvrage et lors de sa réalisation permet d'obtenir des bétons résistant durablement aux agressions chimiques spécifiques aux stations d'épuration.

## DES BÉTONS COMPACTS

La compacité du béton conditionne sa durabilité. Le béton résiste d'autant mieux à l'action des eaux agressives que sa porosité est faible.

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 et un faible rapport eau/ciment ;
- une granulométrie adaptée ;
- l'optimisation de la vibration et de la cure.

## DES BÉTONS TRÈS PEU PERMÉABLES

L'étanchéité est une question clé pour les ouvrages destinés à contenir des liquides. Pour obtenir une étanchéité satisfaisante à l'eau du béton, quelques conditions essentielles doivent être remplies :

- maîtriser les déformations du béton, en particulier le retrait ;

- prévoir des armatures correctement dimensionnées et positionnées pour limiter et contrôler la fissuration du béton ;
- prévoir des joints de dilatation et de retrait ;

- planifier les joints de reprise et de construction ;

- réaliser un béton compact.

Il en découle des contraintes à respecter lors de la réalisation pour éviter toutes fuites ultérieures :

- maîtriser parfaitement le positionnement des armatures ;

- apporter un soin particulier pour la réalisation des reprises de bétonnage ;

- minimiser l'effet du retrait en réalisant des plots de bétonnage ;

- disposer des feuillets et des joints hydrogonflants au niveau des reprises de bétonnage ;

- assurer la continuité des armatures au droit des reprises de bétonnage ;

- reboucher sur toute l'épaisseur les trous traversant pour le passage des

tirants assurant le maintien des coffrages ;

- créer des zones de clavage : joints provisoires de retrait laissés ouverts et bétonnés ultérieurement.

## UN FERRAILAGE ADAPTÉ ET LE RESPECT DES VALEURS D'ENROBAGE DES ARMATURES

Le respect des épaisseurs d'enrobage déterminées à partir des classes d'exposition associées à chaque béton permet de maîtriser le risque de corrosion des armatures.

Les armatures permettent de contrôler et maîtriser les divers retraits des bétons et d'organiser une microfissuration bien répartie. Les armatures bien réparties et en quantité suffisante (grande surface de contact armatures/béton) permettent de transformer d'éventuelles fissures ouvertes en de nombreuses petites fissures fermées qui ne compromettent pas l'étanchéité des bétons.

## UNE VIBRATION ADAPTÉE ET UNE CURE SOIGNÉE

La vibration, gage de compacité du béton, doit être homogène et adaptée (fréquence de vibration, diamètre des aiguilles vibrantes, espacement des points d'introduction des aiguilles).

La cure doit être efficace afin d'éviter tout phénomène de dessiccation excessive du béton au jeune âge qui conduirait à une hydratation incomplète du ciment et une microfissuration superficielle génératrice de porosité et de réduction de la résistance en traction du béton de la zone d'enrobage.

La cure doit être assurée le plus rapidement possible après le bétonnage. La durée nécessaire de maintien de la protection (assurée par exemple par la pulvérisation d'un produit de cure ou le maintien du coffrage en place) est fonction de la formulation du béton (type et dosage en ciment...) et des conditions climatiques.

### Classe d'exécution

La norme *NF EN 13670* introduit la notion de classes d'exécution, qui permet au concepteur, en fonction de l'importance de la structure ou de ses composants et des difficultés d'exécution, de préciser le niveau de management de la qualité adapté pour l'ouvrage à réaliser. À chaque classe d'exécution est associé un contrôle d'exécution spécifique. Pour les ouvrages des stations d'épuration des eaux usées, il convient de privilégier une classe d'exécution 3 qui comprend les contrôles suivants :

- autocontrôle et contrôle intérieur systématique (toute partie d'ouvrage en béton ayant une importance sur la durabilité et la capacité portante de la structure : contrôle des coffrages, des armatures, du bétonnage, de la cure...);
- contrôle extérieur indépendant.

Les bétons de classe de résistance supérieure à C50/60 sont particulièrement adaptés pour les ouvrages constituant le processus de traitement des stations d'épuration du fait de leur faible porosité, gage de durabilité face aux attaques chimiques.

Les bétons à ultra hautes performances (BFUP) peuvent être avantageusement utilisés pour la réalisation de certaines parties d'ouvrage soumises à des agressions extrêmes ou devant répondre à des exigences architecturales.

Les bétons autoplaçants (BAP), dont la mise en œuvre ne nécessite pas de vibration, sont particulièrement adaptés compte tenu de leurs propriétés à l'état frais pour la réalisation des ouvrages des stations d'épuration.

**Nota :** il convient aussi de limiter le risque éventuel de choc thermique lors du décoffrage (brusque refroidissement ou ensoleillement de la face extérieure du béton).

## UNE MAÎTRISE DES RETRAITS ET DE LA FISSURATION

Des hydrates précipitent dès que de l'eau entre en contact avec le ciment. Ils s'organisent en constituant une structure qui va évoluer progressivement. Plusieurs phénomènes aboutissent, au cours des premières heures ou jours après le bétonnage, à une réduction du volume du béton, qui se traduit par un phénomène appelé retrait. On distingue en fait plusieurs retraits du béton :

- retrait endogène ou de dessiccation généré par la réaction d'hydratation ;
- retrait plastique lié à l'évaporation de l'eau de gâchage ou à l'absorption par les parois du coffrage, au cours de la prise ;

■ retrait hydraulique dû au départ lent de l'eau après hydratation, au fur et à mesure du séchage du béton dans le temps, jusqu'à l'équilibre avec l'air ambiant ;

■ retrait thermique dû en particulier à l'abaissement de la température succédant à l'échauffement du béton occasionné par la chaleur d'hydratation du ciment.

Le retrait mal maîtrisé peut générer des fissurations superficielles ou transversales du béton en particulier s'il est empêché et donc altérer la durabilité du béton. Il doit donc être pris en compte lors de la conception et du dimensionnement des ouvrages en concevant des dispositions constructives adaptées.

**Nota :** ces mécanismes de retrait ne doivent pas être confondus avec les variations dimensionnelles d'origine hygrothermique du béton qui sont générées lors de variation de la température extérieure.

Lors du refroidissement ultérieur du béton, des fissures peuvent apparaître lorsqu'un obstacle (par exemple un voile de béton encastré sur un radier) empêche le retrait de l'élément en béton. La contraction empêchée du béton se traduit par des contraintes de traction, qui si elles sont supérieures à la résistance en traction du béton, génèrent des fissures.

Des fissures peuvent aussi être générées par gradient thermique si la température de la surface diminue plus rapidement que celle au cœur de la structure.

La maîtrise du processus de fissuration du béton, d'autant plus nécessaire pour les ouvrages soumis à la pression de l'eau, exige des précautions au stade de la conception et du dimensionnement des ouvrages, mais aussi lors de la réalisation du chantier en optimisant l'ordre de bétonnage des différentes parties des ouvrages.

Pour réduire les effets du retrait, il convient donc de bétonner les voiles le plus rapidement possible après la réalisation des radiers afin de réduire les différences d'âge des bétons entre chacune des étapes de béton-

nage de manière à limiter les effets néfastes du retrait différentiel entre étapes.

**Nota :** pour les ouvrages en grande masse, il convient d'utiliser des ciments qui développent une faible chaleur d'hydratation pour minimiser les effets du retrait thermique.

## PRISE EN COMPTE DES CONDITIONS CLIMATIQUES LORS DE LA RÉALISATION DES OUVRAGES

Des dispositions spécifiques devront être prévues et mises en œuvre en fonction des conditions climatiques rencontrées sur le chantier, en particulier en période de temps froid (température inférieure à 5 °C) et en période de temps chaud (température supérieure à 25 °C).

Ces dispositions, qui visent en particulier à maîtriser l'ouvrabilité et les cinétiques de prise et de durcissement du béton, concernent la formulation du béton, le choix du type de ciment et d'adjuvant (retardateur et accélérateur de prise...), la fabrication (température des constituants avant malaxage), le transport et les conditions de mise en œuvre et de cure du béton. ■

### Classes de cure

Le choix de la classe de cure est fonction de nombreux paramètres : formulation du béton, valeur d'enrobage des armatures, conditions climatiques et caractéristiques géométriques de l'élément à bétonner. La classe de cure doit être précisée dans les spécifications d'exécution.

### Durée d'utilisation de projet

Les normes de dimensionnement Eurocode accentuent la prise en compte de la durabilité des ouvrages en s'appuyant sur la notion de durée d'utilisation de projet, définie 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 régulièrement, mais sans qu'il soit nécessaire de procéder à des réparations majeures.

Pour les ouvrages de Génie Civil, et en particulier pour les ouvrages participant au processus des stations d'épuration des eaux usées, dont les travaux d'entretien et de maintenance sont délicats compte tenu des contraintes d'accessibilité et de continuité de service, la durée d'utilisation de projet à prendre en compte est de 100 ans.

### Classes d'exposition

Pour limiter les risques de développement de pathologies physico-chimiques, il est essentiel de formuler des bétons compacts, peu perméables et chimiquement résistants aux agressions et attaques (attaques acides, attaques du sulfure d'hydrogène, réactions sulfatiques...) en particulier dans les zones émergées ou situées en zone de marnage ou en atmosphère confinée.

Ces agressions sont d'autant plus fortes que l'humidité de l'air ambiant et la température sont élevées et que l'environnement est peu ventilé. Le choix des classes d'exposition est conditionné par une analyse chimique des effluents, des gaz et des boues générés par le traitement et une prise en compte des attaques et agressions potentielles des sols et eaux extérieurs aux ouvrages de traitement et en contact avec les bétons.

# Prévention de la Réaction Sulfatique Interne (RSI)

Le tableau ci-dessous complète l'aide au choix des classes d'exposition. Il est associé à la prévention de la Réaction Sulfatique Interne, en application du guide technique « Recommandations pour la prévention des désordres dus à la Réaction Sulfatique Interne » publié par le LCPC en août 2007.

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 ce guide doivent 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, sont associés 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 barrages, les tunnels, et les bâtiments réacteurs des centrales nucléaires et aéroréfrigérants », tandis que la catégorie I comprend « les éléments aisément remplaçables ».

Le tableau 4 ci-après intègre cette notion pour aider au choix du niveau de prévention. ■

**Tableau n° 4 – Prévention de la Réaction Sulfatique Interne – Tous les ouvrages de Génie Civil indépendamment de leur situation géographique**

PARTIES D'OUVRAGE	XH (PRÉVENTION RSI)	NIVEAU DE PRÉVENTION RSI	
		Ouvrage courant (de catégorie II)	Ouvrage exceptionnel (de catégorie III)
<b>Fondations (pieux, micropieux, barrettes, puits, parois moulées, radiers) d'ouvrages de Génie Civil, de murs et d'ouvrages de soutènement, d'ouvrages hydrauliques, de production d'énergie, de silos et de réservoirs</b>			
Fondations de tous types, parties entièrement immergées en eau salée, eau de mer ou eau saumâtre	XH3	Cs	Ds
Fondations de tous types, parties entièrement immergées en eau douce	XH3	Cs	Ds
Fondations de tous types, parties en zone de marnage (eau salée, eau de mer ou eau saumâtre)*	XH3	Cs	Ds
Fondations de tous types, parties en zone de marnage (eau douce)*	XH3	Cs	Ds
Fondations de tous types, parties enterrées ou faces en contact avec le sol	XH3	Cs	Ds
Fondations de tous types, parties aériennes	XH2	Bs	Cs
<b>Superstructures d'ouvrages de Génie Civil, de murs et d'ouvrages de soutènement, d'ouvrages hydrauliques, de production d'énergie, de silos et de réservoirs</b>			
Parties ou parois immergées ou en contact durable avec de l'eau salée, eau de mer ou saumâtre	XH3	Cs	Ds
Parties ou parois immergées ou en contact durable avec de l'eau douce	XH3	Cs	Ds
Parties ou parois immergées ou en contact durable avec d'autres liquides	XH3	Cs	Ds
Parties ou parois extérieures en contact variable ou exposées à des écoulements d'eau salée, eau de mer ou eau saumâtre*	XH3	Cs	Ds
Parties ou parois extérieures en contact variable ou exposées à des écoulements d'eau douce*	XH3	Cs	Ds
Parties ou parois extérieures en contact variable ou exposées à des écoulements d'autres liquides*	XH3	Cs	Ds
Parties ou parois intérieures en contact variable ou exposées à des écoulements d'eau salée, eau de mer ou eau saumâtre*	XH3	Cs	Ds
Parties ou parois intérieures en contact variable ou exposées à des écoulements d'eau douce*	XH3	Cs	Ds
Parties ou parois intérieures en contact variable ou exposées à des écoulements d'autres liquides*	XH3	Cs	Ds
Parties ou parois enterrées ou en contact avec le sol	XH3	Cs	Ds
Parties ou parois à l'air libre, exposées aux intempéries	XH2	Bs	Cs
Parties ou parois à l'air libre, protégées des intempéries	XH1	As	
Parties ou parois intérieures, protégées des intempéries et des condensations	XH1	As	
Parties ou parois intérieures humides avec risque de condensation	XH2	Bs	Cs
<b>Autres ouvrages particuliers</b>			
Regards et boîtes de branchement ou d'inspection coulés en place	XH2	As	As
Caniveaux hydrauliques coulés en place	XH3	As	As

\* Risque d'exposition à l'abrasion à considérer.

# Aide au choix des classes d'exposition

PARTIES D'OUVRAGE	XC	XS	XD			XF			XA
			Salage peu fréquent	Salage fréquent	Salage très fréquent	Salage peu fréquent	Salage fréquent	Salage très fréquent	
<b>Fondations (pieux, micropieux, barrettes, puits, parois moulées, radiers) d'ouvrages de génie civil, de murs et d'ouvrages de soutènement, d'ouvrages hydrauliques, de silos et de réservoirs</b>									
Fondations de tous types, parties entièrement immergées en eau salée ou saumâtre	XC1	XS2***	–	–	–	–/XF4**	–/XF4**	–/XF4**	selon analyse de l'eau
Fondations de tous types, parties entièrement immergées en eau douce	XC1	–	–	–	–	–/XF3**	–/XF3**	–/XF3**	selon analyse de l'eau
Fondations de tous types, parties en zone de marnage (eau salée, ou saumâtre)	XC4	XS3***	–	–	–	XF1/XF4**	XF1/XF4**	XF1/XF4**	selon analyse de l'eau
Fondations de tous types, parties en zone de marnage (eau douce)	XC4	XS3/XS1*	–	–	–	XF1/XF3**	XF1/XF3**	XF1/XF3**	selon analyse de l'eau
Fondations de tous types, parties enterrées ou faces en contact avec le sol	XC2	XS1**/–*	–	pas d'exposition XD, XD2 si très exposé aux sels	pas d'exposition XD, XD2 si très exposé aux sels	–/XF3**	–/XF3**	–/XF3**	selon analyse sol et eau
Fondations de tous types, parties aériennes	XC4	XS3/XS1*	–	XD1, XD3 si très exposé aux sels	XD1, XD3 si très exposé aux sels	XF1/XF3**	XF1, XF2 si très exposé aux sels	XF2, XF4 si très exposé aux sels	–
<b>Superstructures d'ouvrages de génie civil, de murs et d'ouvrages de soutènement, d'ouvrages hydrauliques, de silos et de réservoirs</b>									
Parties ou parois immergées ou en contact durable avec de l'eau salée ou saumâtre	XC1	XS2***	–	–	–	–/XF4**	–/XF4**	–/XF4**	selon analyse de l'eau
Parties ou parois immergées ou en contact durable avec de l'eau douce	XC1	–	–	–	–	–/XF3**	–/XF3**	–/XF3**	selon analyse de l'eau
Parties ou parois immergées ou en contact durable avec d'autres liquides	XC1	–	XD2 selon liquide concerné	XD2 selon liquide concerné	XD2 selon liquide concerné	–/XF3**	–/XF3**	–/XF3**	selon liquides concernés
Parties ou parois extérieures en contact variable ou exposées à des écoulements d'eau salée ou saumâtre**	XC4	XS3***	–	–	–	XF1/XF4**	XF1/XF4**	XF2/XF4**	selon analyse de l'eau
Parties ou parois extérieures en contact variable ou exposées à des écoulements d'eau douce**	XC4	XS3/XS1*	–	–	–	XF1/XF3**	XF1/XF3**	XF1/XF3**	selon analyse de l'eau
Parties ou parois extérieures en contact variable ou exposées à des écoulements d'autres liquides**	XC4	XS3/XS1*	XD2 selon liquide concerné	XD2 selon liquide concerné	XD2 selon liquide concerné	XF1/XF3**	XF1/XF3**	XF1/XF3**	selon liquides concernés
Parties ou parois intérieures en contact variable ou exposées à des écoulements d'eau salée ou saumâtre**	XC4	XS3***	–	–	–	–/XF4**	–/XF4**	–/XF4**	selon analyse de l'eau
Parties ou parois intérieures en contact variable ou exposées à des écoulements d'eau douce**	XC4	–	–	–	–	–/XF3**	–/XF3**	–/XF3**	selon analyse de l'eau
Parties ou parois intérieures en contact variable ou exposées à des écoulements d'autres liquides**	XC3	–	XD2 selon liquide concerné	XD2 selon liquide concerné	XD2 selon liquide concerné	–/XF3**	–/XF3**	–/XF3**	selon liquides concernés
Parties ou parois enterrées ou en contact avec le sol	XC2	XS1/XS1*	–	pas d'exposition XD, XD2 si très exposé aux sels	pas d'exposition XD, XD2 si très exposé aux sels	–/XF3**	–/XF3**	–/XF3**	selon analyse sol et eau
Parties ou parois à l'air libre, exposées aux intempéries	XC4	XS3/XS1*	–	XD1, XD3 si très exposé aux sels	XD1, XD3 si très exposé aux sels	XF1/XF3**	XF1 ou XF3, XF2 ou XF4 si très exposé aux sels	XF1 ou XF2, XF4 si très exposé aux sels	–
Parties ou parois à l'air libre, protégées des intempéries	XC3	XS3/XS1*	–	XD1, XD3 si très exposé aux sels	XD1, XD3 si très exposé aux sels	XF1/XF3**	XF1 ou XF3, XF2 ou XF4 si très exposé aux sels	XF1, XF4 si très exposé aux sels	–
Parties ou parois intérieures, protégées des intempéries et des condensations	XC1	–	–	–	–	XF1 sauf si hors gel	XF1 sauf si hors gel	XF1 sauf si hors gel	–
Parties ou parois intérieures humides avec risque de condensations	XC3	–	–	–	–	XF3 sauf si hors gel	XF3 sauf si hors gel	XF3 sauf si hors gel	selon risque de condensation
<b>Autres ouvrages particuliers</b>									
Regards et boîtes de branchement ou d'inspection coulés en place	XC4	XS3/XS1*	–	XD1, XD3 si très exposé aux sels****	XD1, XD3 si très exposé aux sels****	XF1/XF3**	XF1 ou XF3, XF2 ou XF4 si très exposé aux sels	XF1 ou XF3, XF2 ou XF4 si très exposé aux sels	selon analyse sol et eau
Caniveaux hydrauliques coulés en place	XC4	XS3/XS1*	–	XD1, XD3 si très exposé aux sels****	XD1, XD3 si très exposé aux sels****	XF1/XF3**	XF1, XF2 si très exposé aux sels	XF1, XF2 si très exposé aux sels	selon analyse sol et eau

\* Pour les ouvrages situés : à moins de 100 m des côtes/à moins de 1 km des côtes.

\*\* Pour les ouvrages situés : en zone de gel faible ou modéré/en zone de gel sévère (sauf si hors gel).

\*\*\* Par analogie avec l'exposition à l'eau de mer, sous réserve d'une analyse plus détaillée de l'agressivité chimique et de la concentration en chlorures pour les ouvrages situés à l'intérieur des terres.

\*\*\*\* Pour ces ouvrages, de durée d'utilisation de projet souvent inférieure à 50 ans, on admet en France que la classe XD ne concerne que l'enrobage, les classes XF2 et XF4 couvrant les exigences liées au matériau dues à la présence des sels de déverglaçage.

**Nota :** le salage est considéré comme « peu fréquent » lorsque la moyenne annuelle du nombre de salages est inférieure à 10, « très fréquent » lorsqu'elle est supérieure ou égale à 30 et « fréquent » entre ces deux cas.