COLLECTION
TECHNIQUE
CIMBÉTON

T 48

BÉTONS ET OUVRAGES D'ART

La durabilité des bétons

CERIB
Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton

FIB
Fédération de l'Industrie du Béton

Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi

CIMbéton
CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

La durabilité des bétons

Les contributions à l'ouvrage

Claude	DERACHE	CIMENTS CALCIA
Patrick	GUIRAUD	CIMBÉTON
Marc	PLUMAT	LAFARGE CIMENTS
Patrick	ROUGEAU	CERIB
Benoist	THOMAS	SNBPE
Michel	VALLÈS	CERIB
Angélique	VICHOT	ATILH

Avant-propos

La prise en compte de la durabilité des matériaux, lors de la conception d'un ouvrage est indispensable pour garantir sa durée de service et optimiser son coût global. Elle est désormais facilitée avec l'arrivée de nouvelles normes, guides et recommandations spécifiques à la durabilité.

En effet, les connaissances actuelles sur les ciments et les bétons permettent d'adapter encore mieux la composition et la formulation des bétons aux contraintes environnementales auxquelles ils seront soumis, tout en respectant les critères de performances mécaniques.

Ce guide technique, destiné aux concepteurs et gestionnaires d'ouvrages de génie civil en béton est un nouvel outil permettant de satisfaire cette logique de progrès. Il synthétise les principes de prévention et les recommandations à respecter pour la prescription et la formulation de bétons de qualité, adaptés à l'agressivité de l'environnement, afin de satisfaire les exigences physiques, chimiques et mécaniques et concevoir des ouvrages encore plus pérennes.

Il s'appuie sur les recommandations des principaux textes et documents de référence, auxquels il convient de se reporter pour bénéficier de toutes les précisions utiles et complémentaires. Il présente les avancées des nouvelles normes européennes qui mettent en valeur l'importance de la maîtrise de la durabilité des constructions.

Sommaire

1 Notion de durabilité des bétons et de durée de service des ouvrages 7

2 Contexte normatif 13

2.1 – Introduction 14

2.2 – Norme NF EN 206-1 14

2.2.1 – Classes d'exposition des bétons 14
2.2.2 – Exigences spécifiées par la norme NF EN 206-1 16
2.2.3 – Exigences liées aux classes d'exposition 17
2.2.4 – Trois types de béton 17
2.2.5 – Classes de consistance du béton frais 18
2.2.6 – Classes de résistance à la compression des bétons durcis 18
2.2.7 – Teneurs en chlorures 19
2.2.8 – Valeurs limites pour le classement des attaques chimiques 20
2.2.9 – Valeurs limites spécifiées pour les bétons 21

2.3 – Normes pour les produits préfabriqués en béton 23

2.3.1 Nouvelles normes de produits européennes 23
2.3.2 Norme NF EN 13369 24

3 Durabilité des bétons vis-à-vis des eaux agressives 29

3.1 – Action des eaux agressives 30

3.2 – Principes de prévention 31

3.3 – Recommandations complémentaires du fascicule de documentation P 18-011 34

4 Durabilité des bétons soumis au gel et aux sels de déverglaçage 37

4.1 - Mécanismes développés par le gel et les sels de déverglaçage 38

4.2 - Document de référence 40

4.3 - Principes de prévention 42

4.3.1 - Notion de facteur d'espacement des bulles 42
4.3.2 - Niveaux de gel 43
4.3.3 - Niveaux de salage 45
4.3.4 - Degrés de saturation en eau du béton 46

4.3.5 - Classes d'exposition concernées 46
4.3.6 - Types d'ouvrages concernés 47
4.3.7 - Quatre types de béton soumis au gel 47
4.3.8 - Indicateurs de durabilité 48
4.3.9 - Recommandations spécifiques pour l'élaboration des bétons 49
4.3.9.1 - Bétons traditionnels 49
4.3.9.2 - Bétons à Hautes Performances 50

5 Prévention contre les phénomènes d'alcali-réaction 53

5.1 - Introduction 54

5.2 - Phénomène d'alcali-réaction 54

5.3 - Document de référence 55

5.4 - Principes de prévention 56
5.4.1 - Principe de la démarche de prévention 56
5.4.2 - Niveau de prévention 57
5.4.3 – Recommandations 58
5.4.4 – Classification des granulats 59
5.4.5 – Bilan des alcalins 60
5.4.6 – Critère de performance 62
5.4.7 – Références d'emploi 62
5.4.8 – Additions minérales 62
5.4.9 – Granulats PRP 63

6 Prévention contre les phénomènes de gonflement interne sulfatique 65

6.1 – Introduction 66

6.2 – Phénomène de gonflement interne sulfatique 67

6.3 – Document de référence 70

6.4 – Principes de prévention 71

7 Durabilité des bétons en site maritime 75

7.1 - Actions de l'eau de mer sur le béton 76

7.2 - Principes de prévention 77

7.3 - Recommandations complémentaires du fascicule de documentation P 18-011 79

● 8 Optimisation de l'enrobage des armatures 81

8.1 - Incidence de la qualité de l'enrobage 82

8.2 - Philosophie de l'enrobage selon l'EUROCODE 2 86

8.3 - Enrobage minimal 86

● 9 Annexes 89

Annexe 1 - Principales normes de référence 90

Annexe 2 - Principaux documents de référence 91

Annexe 3 - Tableaux comparatifs entre ancien et nouveau référentiels des principaux textes normatifs 92

Chapitre 1

Notion de durabilité des bétons et de durée de service des ouvrages

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver dans les conditions prévues les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect, dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible (mise en service d'une maintenance préventive).

Le béton est un matériau durable, car il est toujours possible d'adapter sa composition et sa formulation aux contraintes environnementales auxquelles il sera soumis pendant sa durée de service, en respectant les critères de performances mécaniques.

Un ouvrage doit résister aux charges auxquelles il est soumis mais aussi aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant… il doit également conserver son esthétique, et satisfaire les besoins des utilisateurs au cours du temps. Les structures sont soumises à l'agression d'agents chimiques présents dans l'air, l'eau et les sols. La durabilité du maintien de ses fonctions est assortie d'une durée. Selon les Eurocodes, il s'agit de la « durée d'utilisation de projet » qui est en fait la durée prévue de service de l'ouvrage.

Pour s'assurer de cette durabilité, les bétons ont été longtemps spécifiés en considérant les performances mécaniques requises à 28 jours associées éventuellement à un dosage minimum en ciment. Pour la construction d'une structure, seules les exigences de résistance et de comportement en service étaient prises en compte. Un béton performant ayant en principe un dosage correct en ciment et une bonne compacité, ces deux prescriptions pouvaient effectivement garantir une certaine durabilité du matériau béton.

La résistance mécanique d'un béton ne détermine pas à elle seule la durabilité du matériau. En effet, deux bétons de résistance mécanique équivalente peuvent présenter des résistances très différentes vis-à-vis par exemple de phénomènes d'alcali-réaction, de réactions sulfatiques ou face à des cycles de gel-dégel. Les

connaissances acquises sur les mécanismes déterminants pour la durabilité des bétons permettent aujourd'hui de mieux tenir compte de la diversité des environnements dans lesquels les ouvrages peuvent être construits.

L'expérience acquise sur les chantiers durant les dernières décennies, les enseignements des projets nationaux, la mise en application de nouvelles normes françaises et européennes relatives aux bétons et à leurs constituants, ainsi que l'évolution des textes réglementaires concernant les constructions en béton, permettent désormais d'optimiser la formulation des bétons et de concevoir leurs performances en adéquation avec les exigences et contraintes auxquelles les ouvrages sont soumis.

Aujourd'hui, la durabilité est appréhendée en considérant un ensemble de propriétés dont, bien sûr, la résistance mécanique à 28 jours. Les autres caractéristiques prises en compte visent à assurer l'adéquation entre les propriétés physico-chimiques du béton et les contraintes qui s'appliquent à l'ouvrage. Les caractéristiques à prescrire pour garantir la pérennité des ouvrages sont désormais plus complètes et plus précises. Elles dépendent de l'environnement auquel sera soumis l'ouvrage et se traduisent par des spécifications sur la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal et la teneur maximale en chlorures dans le béton. Les performances à obtenir peuvent être établies à partir de seuils à respecter en fonction de la durée de service.

La norme NF EN 206-1 et les normes relatives aux produits préfabriqués en béton intègrent cette nouvelle approche dite « performancielles ». Cette logique de progrès vise l'optimisation des performances et la durabilité des bétons, en mettant à disposition du prescripteur une définition d'un ensemble de classes d'exposition pour prendre en compte l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage ainsi que les risques d'agressions et d'attaques auxquels il va être exposé pendant sa durée de service.

Il est donc désormais possible de mieux définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage en fonction de la durée de service souhaitée. À chaque classe d'exposition correspondent également des performances mécaniques minimales pour le béton.

Des ouvrages ont été réalisés ces dernières années satisfaisant à un cahier des charges exigeant une durée de service de 100 à 120 ans. Des indicateurs de durabilité ont été définis (tels que la perméabilité à l'oxygène, la diffusion des chlorures, la vitesse et profondeur de carbonatation) et font l'objet d'une surveillance régulière.

De nombreuses recherches sont en cours pour affiner les méthodes d'évaluation de l'évolution des performances des bétons afin de prévoir avec précision les durées de vie des ouvrages. Des travaux réalisés dans le cadre de l'Association Française de Génie Civil (AFGC) ont permis de définir une démarche basée sur

l'utilisation d'indicateurs de durabilité*. Parallèlement de nombreux modes opératoires ont été mis au point permettant de caractériser tant la perméabilité du béton que sa résistance à la migration d'éléments chimiques tels que le dioxyde de carbone et les chlorures. Les travaux actuels du groupe RGCU « Mesure des grandeurs associées à la durabilité des bétons » compléteront la liste des modes opératoires déjà utilisables aujourd'hui.

Quelles que soient les précautions prises pour adapter et optimiser la formulation du béton, il ne pourra assurer sa fonction durablement que si les « règles de l'art » ont été respectées lors de sa mise en œuvre (vibration correcte, cure adaptée, prise en compte des conditions climatiques lors du bétonnage, retraits maîtrisé, respect des valeurs d'enrobage des armatures, etc.). Pour obtenir la durabilité spécifiée, il convient de respecter les recommandations ou les normes d'exécution des ouvrages tels que le fascicule 65, le DTU 21, ou les normes des produits préfabriqués ainsi que la norme NF EN 13369 pour les produits structuraux.

**Voir le guide AFGC,* Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages, *juillet 2004.*

Concevoir un ouvrage durable nécessite d'apprécier dès sa conception l'ensemble des contraintes environnementales et des agressions potentielles qu'il aura à subir en fonction de sa destination pendant toute sa durée de service – chaque type d'ouvrage pouvant avoir *a priori* des durées de service spécifiques.

Un béton durable est un béton compact (présentant une faible porosité) dont les constituants de qualité ont été bien choisis conformément aux normes, qui a été correctement formulé et fabriqué et, enfin, qui a été mis en œuvre en respectant les règles strictes de bonne pratique (adéquation de l'ouvrabilité aux conditions de chantier, vibration, cure, etc.). Ces principes généraux restent valables dans tous les cas, mais ils doivent être complétés pour répondre à des actions particulières afin de supprimer les risques éventuels de réactions entre les constituants, ou résister à des alternances de cycles de gel et de dégel.

Les ciments actuels répondent aux exigences des emplois usuels ; les milieux qui présentent des agressions spécifiques nécessitent le recours à des ciments présentant une caractéristique particulière du fait de leur composition. C'est ainsi qu'en présence d'un facteur agressif pouvant entraîner la dissolution de la portlandite (par exemple l'eau pure), on préférera des ciments conduisant à une faible teneur en portlandite. Vis-à-vis des agressions dues aux milieux marins ou aux eaux sulfatées, on utilisera des ciments prise mer (PM) ou résistant aux eaux sulfatées (ES).

Une structure durable suppose aussi le respect de l'enrobage des armatures et des performances mécaniques répondant aux sollicitations qu'elle va subir pendant sa durée de service.

L'EUROCODE 2 (EN 1992) définit pour les ouvrages structurels, les règles pour déterminer les enrobages en tenant compte en particulier de la classe d'exposition, de la compacité du béton, du type d'armature et de la durée de service prévue.

Chapitre 2

Contexte normatif

2.1 – Introduction

2.2 – Norme NF EN 206-1

2.3 – Normes pour les produits préfabriqués en béton

2.1 - Introduction

La résistance du béton aux diverses conditions environnementales auxquelles il est soumis pendant la durée de service prévue de la structure est conditionnée notamment par le respect de spécifications sur le béton. Ces spécifications doivent être adaptées aux conditions susceptibles d'être rencontrées dans chaque pays européen. Il est donc nécessaire de se référer aux éditions nationales des normes (EN 206-1, normes de produits préfabriqués et EN 13369) en vigueur dans le pays concerné.

La norme NF EN 206-1 et son annexe nationale* s'appliquent aux bétons de bâtiments et de structure de génie civil, qu'ils soient réalisés par un producteur de béton prêt à l'emploi ou un utilisateur de béton sur chantier. Dans le cas des produits en béton, les normes qui s'appliquent sont les normes de produit. Dans le cas des produits structuraux, les normes s'appuient sur la norme NF EN 13369, qui elle-même reprend, pour les aspects concernés, certaines exigences de la norme NF EN 206-1.

2.2 - Norme NF EN 206-1

La norme NF EN 206-1 (béton partie 1 : spécifications, performances, production et conformité) et son annexe nationale* définit en plus des spécifications relatives au béton, les responsabilités du prescripteur (responsable de la spécification du béton) et du producteur (responsable de la conformité et du contrôle de la production).

2.2.1 - Classes d'exposition des bétons

La prise en compte de l'environnement dans lequel va être situé l'ouvrage et les risques d'agressions et d'attaques auxquels il va être exposé pendant sa durée de service, va permettre d'optimiser les performances du béton et sa durabilité. Pour ce faire, on définit des classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement auxquelles les bétons sont soumis.

** L'Annexe Nationale (NA) spécifie les dispositions complémentaires à la norme NF EN 206-1 à respecter en France.*

Tableau n° 1 : classes d'exposition des bétons selon la norme NF EN 206-1

Classe d'exposition		Description de l'environnement	Béton concerné
XO		Aucun risque de corrosion ou d'attaque	Béton non armé ou béton armé en environnement très sec
XC		Corrosion induite par carbonatation	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées exposé à l'air et à l'humidité
	XC1	Sec ou humide en permanence	
	XC2	Humide, rarement sec	
	XC3	Humidité modérée	
	XC4	Alternance d'humidité et de séchage	
XD		Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées soumis au contact d'une eau ayant une origine autre que marine contenant des chlorures, y compris des sels de déverglaçage
	XD1	Humidité modérée	
	XD2	Humide, rarement sec	
	XD3	Alternance d'humidité et de séchage	
XS		Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées soumis au contact des chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin
	XS1	Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer	
	XS2	Immergé en permanence	
	XS3	Zone de marnage, zone soumise à des projections ou à des embruns	
XF		Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage	Béton soumis à une attaque significative due à des cycles gel/dégel alors qu'il est mouillé
	XF1	Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage	
	XF2	Saturation modérée en eau avec agent de déverglaçage	
	XF3	Forte saturation en eau sans agent de déverglaçage	
	XF4	Forte saturation en eau avec agent de déverglaçage	
XA		Attaques chimiques	Béton exposé aux attaques chimiques se produisant dans les sols naturels, les eaux de surface et/ou les eaux souterraines
	XA1	Environnement à faible agressivité chimique	
	XA2	Environnement d'agressivité chimique modérée	
	XA3	Environnement à forte agressivité chimique	

Nota

Les actions dues à l'environnement sont des actions physiques et chimiques auxquelles le béton est exposé, qui entraînent des effets sur le béton et les armatures et qui ne sont pas considérées comme des charges pour la conception de la structure.

Les conditions d'environnement sont regroupées dans la norme NF EN 206-1 en 6 classes d'exposition, décomposées en sous-classes. Ces dernières prennent notamment en compte l'humidité relative du milieu et les éventuels cycles d'humidification / séchage. À chacune des classes correspondent des spécifications sur la composition des bétons.

CLASSE XO : aucun risque de corrosion ou d'attaque

CLASSE XC : corrosion induite par carbonatation

CLASSE XD : corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine

CLASSE XS : corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer

CLASSE XF : attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage

CLASSE XA : attaques chimiques

Nota
L'EUROCODE 2 définit pour les ouvrages structurels des dispositions constructives et des spécifications pour le dimensionnement (valeur minimale des enrobages, valeur limite d'ouverture des fissures, etc.) en fonction de chaque classe d'exposition.

2.2.2 - Exigences spécifiées par la norme NF EN 206-1

La norme NF EN 206-1 spécifie les exigences applicables :
- aux constituants du béton ;
- aux propriétés du béton frais et durci et à leur vérification ;
- aux limitations imposées à la composition du béton ;
- à la spécification du béton ;
- à la livraison du béton frais ;
- aux procédures de contrôle de production ;
- aux critères de conformité et à l'évaluation de la conformité.

2.2.3 - Exigences liées aux classes d'exposition

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

Ces exigences propres à chaque classe d'exposition doivent être spécifiées en termes de :
– type et classe de constituants permis ;
– rapport maximal eau/ciment ;
– dosage minimal en ciment (ou absorption d'eau maximale dans les cas des produits structuraux préfabriqués) ;
– résistance minimale à la compression du béton ;

et, dans certains cas :
– teneur minimale en air du béton ou résistance à des essais de gel-dégel.

2.2.4 - Trois types de béton

La Norme NF EN 206-1 décline trois types de béton prêt à l'emploi ou réalisé sur chantier.

Béton à Propriétés Spécifiées (BPS)

Béton pour lequel les propriétés requises et les caractéristiques supplémentaires sont spécifiées par le prescripteur au producteur qui est responsable de fournir un béton satisfaisant à ces exigences.

Béton à Composition Prescrite (BCP)

Béton pour lequel la composition et les constituants à utiliser sont spécifiés au producteur qui est responsable de fournir un béton respectant cette composition.

Béton à composition prescrite dans une norme

Béton dont la composition est définie dans une norme applicable là ou le béton est utilisé.

2.2.5 - Classes de consistance du béton frais

La norme NF EN 206-1 définit pour les bétons à teneur en eau courante, 5 classes de consistance des bétons.

Tableau n° 2 : classes de consistance des bétons

Classe	S1	S2	S3	S4	S5
Affaissement (en mm)	10 à 40	50 à 90	100 à 150	160 à 210	≥ 220

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

La consistance peut aussi être spécifiée par :
– le temps VEBE (en s) ;
– l'indice de serrage ;
– le diamètre d'étalement (en mm).

2.2.6 - Classes de résistance à la compression des bétons durcis

La résistance des bétons durcis à 28 jours peut être mesurée sur des éprouvettes cylindriques ou cubiques, elle peut donc être définie par deux valeurs :

- **fck-cyl :** résistance caractéristique (fractile 5 %) en compression du béton déterminée par essais sur éprouvettes cylindriques (Ø=150 mm – H = 300 mm, Ø= 160 mm – H = 320 mm, ou Ø= 110 mm – H = 220 mm)* ;
- **fck-cube :** résistance caractéristique (fractile 5 %) en compression du béton déterminé par essais sur éprouvettes cubiques (côté : 100 ou 150 mm).

La norme NF EN 206-1 (article 4-3.1) propose deux familles de classes de résistance en fonction de la masse volumique du béton.

• La classe de résistance à la compression des bétons de masse volumique normale et des bétons lourds est désignée par la lettre C suivie des valeurs fck-cyl et fck-cube.

• La classe de résistance des bétons légers est désignée par les lettres LC suivies des valeurs fck-cyl et fck-cube.

La norme NF EN 206-1, couvre les bétons de masse volumique normale, les bétons lourds et les bétons légers.

** La norme d'essai tolère une variation de ± 10 % sur les dimensions des éprouvettes. Les cylindres de 160 mm de diamètre et de 320 mm de hauteur répondent à ces critères et peuvent être utilisés pour mesurer la résistance mécanique.*

Tableau n° 3 : type de béton en fonction de sa masse volumique	
	Masse volumique (en kg/m³)
Béton léger	de 800 à 2000
Béton de masse volumique normale	de 2000 à 2 600
Béton lourd	supérieur à 2 600

Elle définit respectivement seize classes de résistance pour les bétons de masse volumique normale et les bétons lourds et quatorze classes pour les bétons légers. (cf. respectivement tableaux n° 4 et 5)

Tableau n° 4 : classes de résistance à la compression pour les bétons de masse volumique normale et les bétons lourds		
Classe	**fck-cyl (en N/mm²)**	**fck-cube (en N/mm²)**
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67	55	67
C 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
C 100/115	100	115

Tableau n° 5 : classes de résistance à la compression pour les bétons légers		
Classe	**fck-cyl (en N/mm²)**	**fck-cube (en N/mm²)**
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

2.2.7 - Teneurs en chlorures

La norme NF EN 206-1 définit les teneurs maximales en ions chlorures du béton à respecter en fonction de son type d'utilisation. Elle définit quatre classes de teneur : Cl 1,0 / Cl 0,4 / Cl. 0,2 / Cl 0,1. Une cinquième classe à été définie dans l'annexe nationale de la norme NF EN 206-1 : la classe CL 0,65.

Tableau n° 6: classes de chlorures					
Classe de Chlorures	Cl 1,0	Cl 0,65	Cl 0,40	Cl 0,20	Cl 0,10
Teneur maximale (en Cl^-)	1 %	0,65 %	0,4 %	0,2 %	0,1 %

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

Tableau n° 7: classe de chlorures à respecter en fonction de l'utilisation du béton	
Utilisation du béton	***Classe de chlorure***
Béton ne contenant ni armatures en acier ni pièces métalliques noyées	Cl 1,0
Béton contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées et formulés avec un ciment de type CEM III	Cl 0,65
Béton contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées	Cl 0,40
Béton contenant des armatures de précontrainte en acier	Cl 0,20

2.2.8 - Valeurs limites pour le classement des attaques chimiques

La norme NF EN 206-1 définit les valeurs limites des paramètres correspondants aux attaques chimiques. Ces seuils correspondent à des caractéristiques chimiques des eaux de surfaces et souterraines ou des sols.

Tableau n° 8: valeurs limites pour les attaques chimiques des eaux de surfaces et souterraines			
Caractéristiques Chimiques	***sous classe d'exposition***		
	XA1	***XA2***	***XA3***
SO_4^{2-} en mg/l	200 à 600	600 à 3000	3000 à 6000
pH	5,5 à 6,5	4,5 à 5,5	4 à 4,5
CO_2 en mg/l	15 à 40	40 à 100	de 100 jusqu'à saturation
NH_4^+ en mg/l	15 à 30	30 à 60	60 à 100
Mg^{2+} en mg/l	300 à 1000	1000 à 3000	de 3000 jusqu'à saturation

Pour ce type d'environnement, l'annexe nationale de la norme NF EN 206-1 renvoie au fascicule de documentation P 18-011 « Bétons – classification des environnements agressifs », notamment pour le choix de ciments.

Tableau n° 9 : valeurs limites par les attaques chimiques des sols naturels

Caractéristiques Chimiques	sous classe d'exposition		
	XA1	XA2	XA3
SO_4^{2-} en mg/l	2000 à 3000	3000 à 12000	12000 à 24000
Acidité ml/kg	Supérieur à 200 Baumann Gully	n'est pas rencontré dans la pratique	

2.2.9 - Valeurs limites spécifiées pour les bétons

Les normes NF EN 206-1 définit des valeurs limites spécifiées relatives à la composition et aux propriétés du béton dans deux tableaux (NA.F.1 et NA.F.2).

Tableau n° 10 (extrait du tableau NA.F.1 de la norme NF EN 206-1) : valeurs limites spécifiées applicables en France à la composition et aux propriétés du béton

Classes d'exposition			Rapport E_{eff} / Liant éq maximal	Classe de résistance minimale	Teneur minimale en Liant éq. (kg/m³)	Teneur minimale en air (%)
Aucun risque de corrosion ou d'attaque		X0	–	–	150	–
Carbonatation		XC 1	0,65	C20/25	260	–
		XC 2	0,65	C20/25	260	–
		XC 3	0,60	C25/30	280	–
		XC 4	0,60	C25/30	280	–
Corrosion induite par les chlorures	Eau de mer	XS 1	0,55	C30/37	330	–
		XS 2	0,55	C30/37	330	–
		XS 3	0,50	C35/45	350	–
	Chlorures autres que l'eau de mer	XD 1	0,60	C25/30	280	–
		XD 2	0,55	C30/37	330	–
		XD 3	0,50	C35/45	350	–
Attaque gel/dégel		XF 1	0,60	C25/30	280	–
		XF 2	0,55	C25/30	300	4,0
		XF 3	0,55	C30/37	315	4,0
		XF 4	0,45	C30/37	340	4,0
Environnement contenant des substances chimiques agressives		XA 1	0,55	C30/37	330	–
		XA 2	0,50	C35/45	350	–
		XA 3	0,45	C40/50	385	–

Nota

La limitation du rapport E_{eff} / Liant éq. permet de réduire la porosité de la pâte interstitielle du béton. La teneur minimale en ciment permet d'assurer une quantité minimale de pâte interstitielle dans le béton.
Les tableaux NA.F.1 et NA.F.2 comportent également d'autres éxigences, en particulier sur les additions et la nature des ciments à utiliser.

Tableau n° 11 *(extrait du tableau NA.F.2 de la norme NF EN 206-1)* ***: valeurs limites spécifiées applicables en France pour la composition et les propriétés des produits en béton fabriqués en usine***

Classes d'exposition			*Rapport Eeff/liant éq maximal*	*Classe de résistance minimale*	*Absorption d'eau maximale (%)*	*Teneur minimale en air (%)*
Aucun risque de corrosion ou d'attaque		X0	–	C 20/25	–	–
Carbonatation		XC 1	0,60	C 25/30	7	–
		XC 2	0,55	C 30/37	6	–
		XC 3	0,50	C 35/45	6	–
		XC 4	0,50	C 35/45	5	–
Corrosion induite par les chlorures	Eau de mer	XS 1	0,45	C 35/45	6	–
		XS 2	0,45	C 40/50	6	–
		XS 3	0,40	C 40/50	4	–
	Chlorures autres que l'eau de mer	XD 1	0,50	C 35/45	6	–
		XD 2	0,50	C 35/45	5	–
		XD 3	0,45	C 40/50	5	–
Attaque gel/dégel		XF 1	0,50	C 35/45	6	–
		XF 2	0,50	C 35/45	5	4
		XF 3	0,45	C 35/45	5	4
		XF 4	0,40	C 35/45	4	4
Environnement contenant des substances chimiques agressives		XA 1	0,50	C 35/45	6	–
		XA 2	0,45	C 35/45	5	–
		XA 3	0,40	C 40/50	4	–

2.3 - Normes pour les produits préfabriqués en béton

2.3.1 - Nouvelles normes de produits européennes

Les normes de produits définissent les caractéristiques des produits et leurs constituants. Elles forment ainsi un référentiel technique destiné aux relations client-fournisseur. La famille des normes de produits préfabriqués en béton s'agrandit avec la parution des normes européennes harmonisées – ouvrant au marquage CE – pour les produits structuraux. Pour les autres produits préfabriqués en béton, de nombreuses normes « autoportantes », contenant en elles mêmes toutes les spécifications nécessaires, sont déjà applicables.

Avec la mise en place de la normalisation européenne dans le domaine des produits structuraux en béton, les référentiels techniques concernant les produits et ouvrages associés vont subir une évolution importante : les codes de calcul BAEL et BPEL seront progressivement remplacés par les Eurocodes et leurs Annexes Nationales. Les Avis Techniques vont être amenés à disparaître pour être remplacés, en ce qui concerne les produits, par les normes européennes harmonisées correspondantes, accompagnées d'une certification volontaire, facultative, de type marque NF. L'application de la norme harmonisée (et du marquage CE) sera rendue obligatoire environ quinze mois après la parution de son décret d'application au journal officiel. À cette date, l'Avis Technique correspondant ne sera plus applicable et disparaîtra.

Les performances des produits structuraux, vis à vis d'une utilisation et d'un ouvrage donné, sont définies par la norme harmonisée du produit. Cette dernière renvoie, directement ou via la norme NF EN 13369 : 2004, à l'édition nationale de l'Eurocode 2. La norme de produit complète s'il y a lieu ces textes ; son avant-propos national peut préciser certaines pratiques nationales.

En ce qui concerne l'ouvrage, lorsque le couple produit-ouvrage sera considéré comme traditionnel (cas général), la conception et la mise en œuvre seront traitées par une norme NF DTU pour les bâtiments ou par le Cahier des Clauses Techniques Générales pour les ouvrages de génie civil, qui se réfèreront aux Eurocodes. En cas de constat de non-traditionnalité pour l'utilisation du produit, l'ouvrage pourra être conçu dans le cadre d'un Document d'Application.

Durant la période transitoire entre le contexte actuel et les référentiels techniques européens, les différents codes de calcul pourront coexister (au maximum cinq ans). La norme NF DTU indiquera la démarche à suivre pendant cette période.

Pour la satisfaction des exigences essentielles telles que la résistance mécanique, la résistance au feu et la durabilité, les normes de produits structuraux font généralement référence à la norme NF EN 13369 « Règles communes pour les produits préfabriqués en béton » et ainsi indirectement aux Eurocodes et à leurs Annexes nationales. Le cas échéant l'avant propos national de la norme de produit stipule le texte à appliquer. Les éventuelles dispositions informatives relatives à l'ouvrage réalisé avec les produits peuvent être reprises dans la norme complémentaire NF DTU qui traitera de la conception de l'ouvrage et de la mise en œuvre des produits.

2.3.2 - Norme NF EN 13369

La norme NF EN 13369 : 2004 (NF P19-800) « Règles Communes pour les produits préfabriqués en béton » est la norme de base pour toutes les normes de produits structuraux. Elle précise les exigences relatives aux constituants et au béton, ainsi que les conditions générales d'application des Eurocodes pour le dimensionnement des produits préfabriqués en béton. Les Règles Communes servent également de texte de référence pour les produits non couverts par des normes ou des Agréments Techniques Européens (ATE).

La norme NF EN 13369 : 2004 reprend et applique, pour les aspects concernés, la norme NF EN 206-1 : 2004. Pour les produits structuraux préfabriqués, les normes de produits, les normes NF EN 13369 : 2004 et NF EN 206-1 : 2004, ainsi que les Eurocodes, constituent donc un ensemble cohérent. Leur respect à chaque étape de la réalisation des produits préfabriqués permet de réaliser des éléments performants, fiables et durables.

Comme les normes spécifient complètement les exigences relatives au produit fini prêt à être mis en œuvre, la seule référence à la norme du produit suffit pour la passation des marchés. Si le marché fait référence à la norme NF EN 206-1, la conformité des produits en béton aux normes européennes correspondantes (norme de produits ou en l'absence norme NF EN 13369) vaut donc satisfaction à la norme NF EN 206-1.

Principales exigences par rapport aux constituants

La norme NF EN 13369 spécifie que le béton est réalisé à partir de constituants dont l'aptitude à l'emploi est établie. L'aptitude à l'emploi d'un constituant est établie dès lors qu'il respecte l'un des textes ci-après définissant son utilisation dans le béton ou les produits en béton :
– une norme européenne ou mondiale (ISO) spécifique au constituant ;
– ou une norme ou des prescriptions nationales en vigueur sur le lieu d'utilisation du béton ;
– ou un Agrément Technique Européen (ATE).

Lorsque les produits en béton préfabriqués structuraux sont couverts par une norme de produit fixant des exigences de durabilité spécifiques alors seules celles-ci s'appliquent. Dans les autres cas, il est possible d'utiliser les spécifications relatives à la composition et aux performances du béton définies dans la norme NF EN 13369.

Celles-ci concernent notamment :
– le type et les classes de constituants ;
– le rapport maximal Eau $_{efficace}$ / Liant $_{équivalent}$;
– le dosage minimal en liant équivalent* ou l'absorption d'eau maximale ;
– et la résistance minimale à la compression du béton.

Ces spécifications sont définies dans deux tableaux (NA.F.1 et NA.F.2) communs aux normes NF EN 206-1 et NF EN 13369. L'industriel a la possibilité d'utiliser au choix les exigences de l'un ou l'autre des deux tableaux. Pour chaque type d'élément préfabriqué, une procédure documentée doit mentionner le tableau auquel il est fait référence.

Les spécifications du tableau NA.F.2 reposent sur une approche performantielle de la durabilité qui permet de prendre en compte l'ensemble des facteurs liés aux formules de béton et aux procédés de fabrication. Les principales différences du tableau NA.F.2 par rapport au tableau NA.F.1 concernent :
– la prescription de valeurs d'absorption d'eau maximales en remplacement des dosages minimaux en liant équivalent ;
– les limites sur les rapports Eau $_{efficace}$ / Liant $_{équivalent}$ plus contraignantes ;
– les classes de résistance minimales plus élevées pour les classes d'exposition XC, XS, XD et XF.

** Le dosage minimal en liant $_{équivalent}$ dépend du D_{max} du granulat.*

Accélération de l'hydratation par traitement thermique et protection contre la dessiccation (cure)

Les prescriptions relatives à la cure, permettent d'éviter que les surfaces des produits ne soient soumises à une dessiccation pouvant conduire à une fissuration du béton ou à une altération de l'hydratation du liant. Des mesures de protection appropriées pour limiter la dessiccation (précisées dans le tableau 2 de la norme NF EN 13369) doivent être prises jusqu'à obtention d'une résistance minimale (spécifiée dans le tableau 1 de la norme NF EN 13369) du béton. Cette résistance minimale est adaptée aux futures conditions environnementales du produit dans l'ouvrage.

Résistances propres aux produits préfabriqués et conditions de mise en précontrainte

Des classes de résistance minimales sont définies pour les bétons des produits préfabriqués : C20/25 pour les produits en béton armé et C30/37 pour les produits en béton précontraint.

Les classes de résistance conventionnelles des bétons sont souvent déterminées à partir des résistances potentielles c'est-à-dire celles mesurées sur des éprouvettes confectionnées et conservées dans des conditions de laboratoire. Le fabricant peut également utiliser la résistance structurale directe déterminée à l'aide d'éprouvettes prélevées dans l'élément fini ou la résistance structurale indirecte déterminée sur des éprouvettes fabriquées et conservées dans les conditions de l'usine. Dans ce cas le coefficient partiel de sécurité affectant la résistance du béton (γc) imposé par la norme EN 1992-1-1 (Eurocode 2) peut être réduit en le multipliant par le coefficient de conversion $\eta = 0,85$ habituellement appliqué aux résistances potentielles.

La norme NF EN 13369 fixe, pour la mise en tension et en précontrainte, les contraintes de tension initiale, la précision, la rentrée des fils de précontrainte et la résistance minimale du béton. Ces exigences visent à garantir les niveaux de précontrainte définis et à éviter les fissures incontrôlées, l'éclatement du béton ou les déformations excessives des produits.

Incidence des classes d'exposition sur l'enrobage minimal des aciers

La norme NF EN 13369 indique les valeurs minimales d'enrobage des armatures en référence à la norme EN 1992-1-1 (Eurocode 2). Pour chaque classe d'exposition (XO, XC, XD ou XS), l'enrobage minimal est spécifié en tenant compte de la résistance du béton et du type d'armatures (précontraintes ou passive). Pour les classes d'exposition XA et XF, l'exigence sur l'enrobage résulte de la classe d'exposition retenue vis-à-vis de la corrosion des armatures (XC ou XD). D'autres conditions peuvent être données dans les normes de produits.

Contrôle de la production en usine

Les exigences relatives au contrôle de la production en usine sont définies dans l'article 6.3 de la norme NF EN 13369. Les plans de contrôles pour le matériel (annexe D1), les matériaux (annexe D2), le procédé (annexe D3) et les produits finis (annexe D4) sont adaptés aux particularités des éléments préfabriqués. Ils se substituent à ceux de la norme NF EN 206-1.

Des règles sont fixées pour le passage du contrôle normal à un contrôle réduit (lorsque par exemple 10 résultats successifs sont bons) ou à un contrôle renforcé (lorsque deux résultats parmi au plus cinq résultats consécutifs n'ont pas été acceptés).

Chapitre 3

Durabilité des bétons vis-à-vis des eaux agressives

3.1 - Action des eaux agressives

3.2 - Principes de prévention

3.3 - Recommandations complémentaires du fascicule de documentation P 18-011

3.1 - Action des eaux agressives

Un ouvrage peut être soumis à de multiples agressions engendrées par l'action des sels ou des gaz en solution dans l'eau (eaux souterraines, eau de mer, pluie, etc.). Les eaux peuvent être chargées de sels minéraux les plus divers en fonction des sols traversés. Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, et surtout sulfates de sodium, de calcium ou de magnésium).

L'agressivité des milieux dans lesquels peuvent se trouver les ouvrages en béton est liée à la présence d'eau et à l'aptitude de celle-ci à réagir avec certains minéraux de la matrice cimentaire du béton.

En effet, les agents agressifs dissous dans l'eau constituent une solution chimiquement agressive pour le béton qui peut provoquer plusieurs types de phénomènes lorsque la formule du béton n'est pas optimisée.

Les attaques acides

Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de ciment (la phase interstitielle contenue dans le béton a un pH très élevé). Il peut donc présenter une certaine susceptibilité vis-à-vis des solutions acides telles que les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone, les eaux résiduaires, les eaux des industries agroalimentaires ou industrielles contenant des acides organiques, les eaux chargées en acides minéraux, mais aussi les eaux pures.

La lixiviation

Dans une structure en béton exposée à l'air ambiant, l'eau ne s'évapore que sur une épaisseur limitée à quelques centimètres. Les pores sont saturés lorsque le béton est en contact de manière prolongée avec l'eau. Des ions en provenance du milieu extérieur peuvent transiter, dans la phase liquide interstitielle du béton. En fonction de la nature des éléments chimiques qui pénètrent dans le matériau, il peut en résulter des réactions chimiques de dissolution – précipitation et donc

une lixiviation progressive des hydrates. Les eaux pures ou très peu chargées ont un grand pouvoir de dissolution, elles peuvent dissoudre les constituants calciques du béton (portlandite notamment).

3.2 - Principes de prévention

Malgré la complexité des réactions chimiques générées par les eaux agressives, l'application de quelques principes de prévention élémentaires respectés au niveau de la formulation du béton, de la conception de l'ouvrage et lors de sa réalisation permettent d'obtenir des bétons résistants durablement dans les milieux agressifs.

Un béton compact et peu perméable

Les qualités intrinsèques du béton, sa compacité et sa perméabilité conditionnent sa durabilité. Le béton résiste d'autant mieux à l'action des eaux agressives que sa porosité et sa perméabilité sont faibles. Un béton peu poreux est peu accessible aux diverses solutions du milieu ambiant, les contacts potentiels entre la pâte et les divers agents agressifs sont limités. L'optimisation du béton permet de limiter les éventuelles altérations pendant la durée de service de l'ouvrage.

La porosité du béton est la conséquence naturelle de la quantité d'eau mise en plus de celle nécessaire à l'hydratation du ciment. Elle dépend également de la vibration et des précautions prises lors de la cure du béton. Le béton durci courant présente une porosité de 12 à 14 % due à la présence de pores capillaires qui apparaissent entre les grains de ciment hydratés.

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 ; les progrès réalisés en matière d'adjuvants ont permis d'élaborer des superplastifiants qui autorisent des réductions importantes de la teneur en eau tout en conservant un excellent comportement lors de la mise en œuvre (sans diminuer la plasticité du mélange et son ouvrabilité) ;
– une granulométrie comportant des éléments fins, éventuellement actifs, en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats. l'augmentation de l'étendue du squelette granulaire par l'utilisation de particules ultrafines (fumée de silice, microfiller calcaire, métakaolin, microfiller siliceux, etc.) permet d'accroître encore la compacité du béton ;
– l'optimisation de la vibration, du traitement thermique éventuel et de la cure.

Une formulation adaptée

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

Une conception de l'ouvrage adaptée

L'ouvrage doit être conçu de manière à éviter, dans la mesure du possible, de créer des zones d'accumulations et de stagnations d'eau et des cheminements préférentiels dus aux ruissellements – ce qui nécessite de prévoir des profils en pente permettant une évacuation rapide des eaux. Les remblais périphériques aux parties d'ouvrages enterrées doivent être équipés de systèmes de drainage canalisant les eaux de ruissellement. Les ouvrages plus particulièrement exposés sont, par exemple, les murs de soutènement, les bases des piles de ponts et les semelles de fondation.

Exemple de définition du domaine d'utilisation d'un produit en béton destiné à être enterré

Extrait de la norme NF P 16-345-2 : « Tuyaux et pièces complémentaires en béton non armé, béton fibré acier et béton armé » Partie 2.

Conditions d'emploi

Les tuyaux résistent naturellement aux conditions d'environnement usuelles dues aux eaux usées domestiques et de surface, ainsi qu'aux effets du sol et des eaux souterraines.

Les conditions usuelles d'emploi des tuyaux objet de la présente norme sont celles découlant de la norme NF EN 752-4 « Réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des bâtiments – Conception hydraulique et considérations liées à l'environnement. ».

Il s'agit d'un environnement modérément agressif défini de la façon suivante :

Effluent transporté

Eaux résiduaires et pluviales urbaines de caractéristiques moyennes suivantes :

– pH ≥ 4,5
– SO_4^{2-} < 600 mg/l
– CL- ≤ 750 mg/l
– NH_4^+ ≤ 30 mg/l
– Mg^{++} ≤ 1 000 mg/l

Les eaux résiduaires variant en débit et concentration de façon très large tout au long de la journée, il est admis que les valeurs ci-dessus puissent être dépassées occasionnellement.

Note
Ces caractéristiques couvrent les caractéristiques réglementaires des effluents urbains (arrêté du 22 décembre 1994) et des effluents des installations classées (arrêté du 2 février 1998) ainsi que celles du domaine de traitement garanti par l'article 11 du fascicule 81 – Titre II – Conception et exécution d'installations d'épuration d'eaux usées.

Sol environnant

– CO_2 agressif ≤ 40 mg/l
– pH ≥ 4,5
– SO_4^{2-} ≤ 3 000 mg/l (sulfates solubles du sol)
– CL^- ≤ 750 mg/l

Note 1
Ces caractéristiques couvrent la très grande majorité des milieux de France métropolitaine.
Note 2
Ces conditions concernant les effluents transportés et les sols environnants couvrent largement celles prévues par le Fascicule 70.

Une mise en œuvre soignée

La vibration doit être adaptée et homogène. La cure doit être efficace afin d'éviter en particulier tout phénomène de dessiccation excessive du béton au jeune âge. La température et l'humidité relative pendant la mise en œuvre du béton et les jours suivants sont des paramètres importants conditionnant les performances à du béton.

3.3 - Recommandations complémentaires du fascicule de documentation P 18-011

Le fascicule de documentation P 18-011 (Bétons : classification des environnements agressifs – juin 1992) fournit, pour les cas non couverts par d'autres textes de référence (notamment ceux relatifs aux produits en béton disposant de normes autoportantes) des recommandations complémentaires aux exigences de la norme NF EN 206-1 pour les bétons soumis à des environnements chimiques agressifs. Il recommande, en particulier, des mesures préventives pour la formulation des bétons (type de ciment, dosage minimal en ciment, valeur maximale du rapport E/C) afin d'assurer leur durabilité.

Il définit des mesures de protection pour les ouvrages en fonction des conditions environnementales agressives auxquelles ils sont soumis.

Il sera prochainement révisé pour tenir compte des nouvelles classes d'exposition définies dans la norme NF EN 206-1 (la version actuelle distinguant quatre classes d'agressivité, A1/A2/A3/A4).

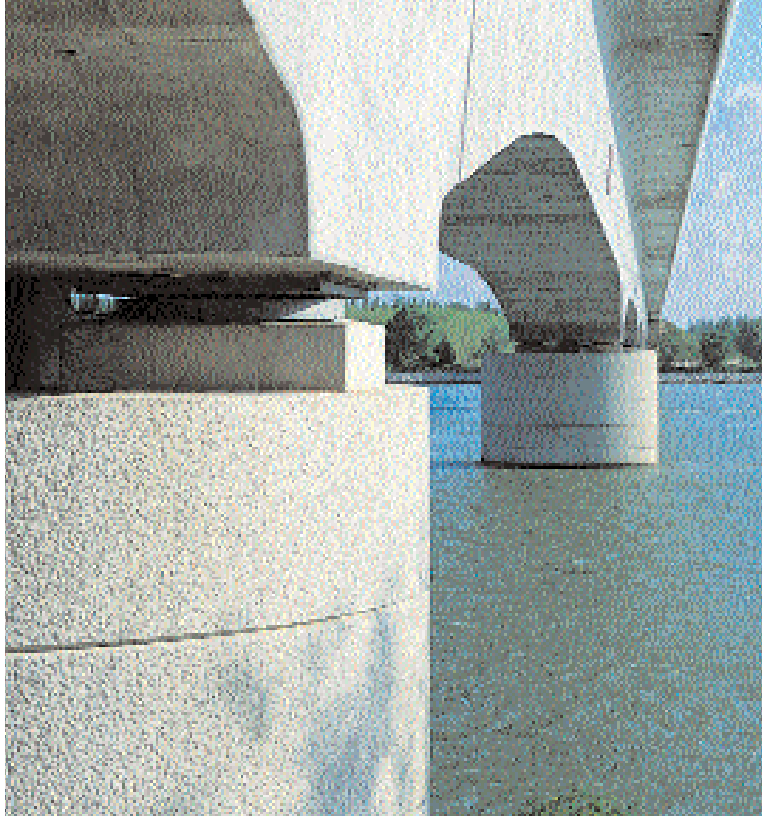


Tableau n° 12 : recommandations du fascicule de documentation P 18-011

Niveau d'agressivité	A1 Faiblement agressif	A2 Moyennement agressif	A3 Fortement agressif	A4 Très Fortement agressif
Dosage minimal en ciment (kg/m³)	–	$\frac{550}{\sqrt[5]{D}}$	$\frac{700}{\sqrt[5]{D}}$	$\frac{700}{\sqrt[5]{D}}$ éventuellement
E/C	–	≤ 0, 55	≤ 0,50	≤ 0,50
Type de ciment si le milieu contient des sulfates	–	CEM I / PM CEM II / PM CEM III / A et B CEM IV / C CEM V / A et B	CEM I avec C_3A ≤ 5 % certains CEM II / A et B avec C_3A ≤ 5 % CEM III / A et B CEM III C Ciments alumineux	Idem A3 + protection supplémentaire
Type de ciment si milieux acides	CEM I Teneur réduite en C_3A et C_3S certains CEM II	CEM I Teneur réduite en C_3A et C_3S certains CEM II CEMV CEM III/A, B et C	CEM III / A et B avec laitier ≥ 60 % CEM V / A et B avec Ca0 du ciment < à 50 %	Idem A3 + protection supplémentaire

Nota

D : dimension maximale des granulats.
CEM II avec ajouts de laitiers, cendres volantes.

Diamètre des granulats (mm)		8	10	16	20	25
Dosage minimal en ciment en Kg/m³	$\frac{500}{\sqrt[5]{D}}$	330	315	285	275	265
	$\frac{700}{\sqrt[5]{D}}$	460	440	400	385	370

Chapitre 4

Durabilité des bétons soumis au gel et aux sels de déverglaçage

4.1 - Mécanismes développés par le gel et les sels de déverglaçage

4.2 - Document de référence

4.3 - Principes de prévention

4.1 - Mécanismes développés par le gel et les sels de déverglaçage

Les mécanismes de dégradation du béton sont liés à l'alternance de cycles répétés de phases de gel et de dégel. Le risque de désordres est d'autant plus élevé que le degré de saturation en eau du béton est important. C'est le cas notamment des parties d'ouvrages non protégées des intempéries et en contact direct avec les rejaillissements de saumure. Une formulation mal adaptée et une mise en œuvre incorrecte du béton amplifient les dégradations.

Ce phénomène est aggravé, en surface, par l'application des sels de déverglaçage (ou fondants routiers), qui engendrent un accroissement des gradients de concentrations en sels, générant ainsi des pressions osmotiques plus élevées.

Les dégradations occasionnées par le gel peuvent être de deux types :
– une microfissuration répartie dans la masse du béton (feuilletage parallèle aux parois), provoquée par un mécanisme de gel interne ;
– un délitage de la zone superficielle (dégradation superficielle), appelé écaillage, sous l'effet conjugué des cycles de gel-dégel et des sels de déverglaçage.

Un gradient thermique important au voisinage de la surface, généré par l'application des sels à titre curatif sur un film de glace, amplifie la dégradation de surface.

Ces deux formes de dégradation peuvent se produire simultanément ou de manière indépendante, elles peuvent affecter la durabilité de la structure et en particulier la pérennité architecturale des ouvrages.

> *Nota*
> *La notion d'agents de déverglaçage couvre les sels de déverglaçage, les fondants routiers (saumure) et les produits dégivrants.*

L'action des cycles gel-dégel

Il est généralement admis que l'accroissement de volume, de l'ordre de 9 %, accompagnant la transformation de l'eau en glace (le béton contient toujours de l'eau non combinée, une partie de cette eau gèle dès que la température descend de quelques degrés en dessous de 0 °C) n'est pas la seule cause de la dégradation du béton.

Dans la zone atteinte par le gel, des cristaux de glace se forment dans les plus gros capillaires, créant un déséquilibre thermodynamique qui va déclencher une migration de l'eau des capillaires les plus fins vers les capillaires dans lesquels l'eau est gelée (l'eau dans les capillaires les plus fins restants à l'état liquide). C'est l'accroissement des pressions hydrauliques dans les capillaires, engendré par ces mouvements de l'eau interne non gelée vers les « fronts de congélation », ainsi que les pressions osmotiques créées par les différences de concentrations en sels dissous entre l'eau située à proximité de l'eau gelée et celle non gelée présente dans les capillaires fins, qui sont considérés aujourd'hui comme la cause principale des dégradations. Ces pressions (hydrauliques et osmotiques) peuvent localement fissurer la pâte de ciment si elles sont supérieures à la résistance à la traction de la pâte. Ce sont les modifications répétées et alternées de température (température positive à température négative) qui après un certain nombre de cycles peuvent dégrader le béton. Les dégradations sont le résultat d'un endommagement progressif. Elles dépendent de la vitesse de descente en température, du nombre de cycles et de la durée du gel.

Les dégradations de gel interne ne se produisent pas lorsqu'il existe dans le béton un réseau de petites bulles d'air, dense et homogène, permettant le déplacement de l'eau ou lorsque la quantité d'eau gelable est suffisamment faible (c'est le cas de certains BHP qui ont une compacité très élevée).

L'action des sels de déverglaçage

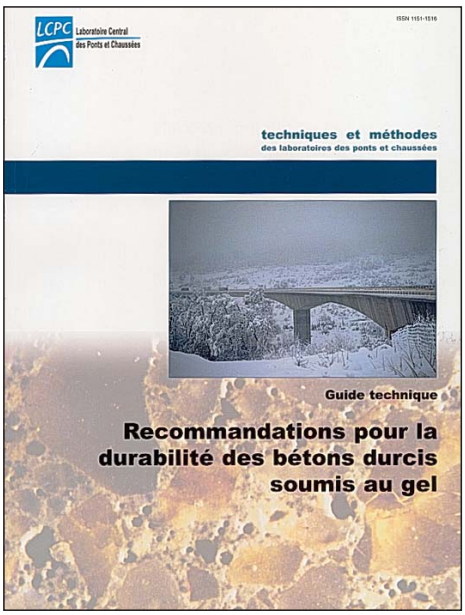
Il est admis que la cause principale des dégradations de surface pouvant résulter de la diffusion des sels de déverglaçage dans les capillaires du béton est un accroissement des pressions osmotiques.

L'importante chute de température de surface, due à la quantité de chaleur consommée pour provoquer la fusion de la glace, amplifie les effets du gel dans la zone du béton proche de la surface (la chute de température de surface peut atteindre 4 °C/minute au lieu de 4 °C/heure habituellement). La peau du béton va donc se refroidir brutalement. Mais ce phénomène est rarement générateur d'un écaillage, car les sels de déverglaçage sont répandus dans la plupart des cas à titre préventif sur les ouvrages d'art des réseaux routier et autoroutier, pour garantir la sécurité des usagers. Il n'y a donc pas de film de glace lorsque les sels sont répandus.

Parallèlement aux phénomènes essentiellement d'ordre physique, la présence des chlorures doit être considérée en vue de se prémunir des risques de corrosion des armatures, en respectant de manière rigoureuse les prescriptions relatives à l'enrobage.

4.2 - Document de référence

Les recommandations relatives à la prévention contre les mécanismes développés par le gel font l'objet d'un guide technique édité par le LCPC en décembre 2003 intitulé ***Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel***. Ce document fixe les recommandations spécifiques à l'élaboration des bétons traditionnels, des bétons à hautes performances et des bétons à technologie spécifique : béton à démoulage immédiat (bétons fabriqués en usine de préfabrication avec ou sans entraîneur d'air), bétons moulés sur site avec machine à coffrage glissant, bétons projetés.



Ces recommandations de niveau national traitent de la durabilité du béton pour l'ensemble de la France. Elles sont issues de recherches et de nombreux retours d'expériences acquises sur un grand nombre d'ouvrages ainsi que de l'évolution des connaissances et des composants des bétons. Elles ont été mises au point par des experts du réseau scientifique et technique du ministère de l'équipement, des professions cimentières, du béton prêt à l'emploi, de l'industrie du béton préfabriqué et des Fédérations Nationales des Travaux Publics et du Bâtiment, à partir d'un document proposé par le groupe Rhône Alpes.

Elles concernent les bétons réalisés sur chantier, en usines de préfabrication, et en centrales de béton prêt à l'emploi pour les ouvrages relevant du domaine d'application des Fascicules 65 A et 65 B (ouvrages de génie civil). Elles ne s'appliquent pas aux éléments préfabriqués en usines, conformes à des textes normatifs prévoyant des spécifications concernant le comportement au gel avec ou sans sels de déverglaçage, pour les conditions d'environnement considérées et dont la conformité est attestée par une certification de produits accréditée COFRAC. Elles sont adaptées pour la réalisation d'ouvrages d'une durée de service de 100 ans.

Elles peuvent être appliquées aux marchés privés, à condition qu'elles soient explicitement mentionnées.

Elles permettent :
– de maîtriser les agressions pouvant résulter des cycles de gel-dégel en présence ou non de sels de déverglaçage ;
– de formuler et de confectionner des bétons durables en ambiance hivernale.

Elles concernent les ouvrages soumis :
– au gel pur ;
– au gel pur en présence de sels de déverglaçage.

Elles s'appuient sur la norme XP P 18-540 pour les granulats puis sur les normes granulats NF EN 12620 et XP P 18-545 dès leur mise en application ainsi que sur la norme NF EN 1367-1 pour la sensibilité au gel des granulats.

Elles tiennent compte de l'évolution des constituants des bétons (ciments, adjuvants, etc.) et définissent les essais à mettre en œuvre ainsi que les caractéristiques à exiger sur le béton durci pour satisfaire la durabilité aux cycles gel-dégel en présence ou non de sels de déverglaçage.

4.3 - Principes de prévention

Les principes de prévention présentés et résumés dans ce paragraphe sont issus du guide technique du LCPC. Il convient de s'y référer pour toute précision.

Les principes de prévention permettant d'assurer la durabilité des bétons durcis en ambiance hivernale reposent sur les constatations suivantes :

• Le béton résiste d'autant mieux,
  – que sa compacité et sa résistance mécanique, en particulier en traction, sont élevées ;
  – que son degré de saturation en eau est faible ;
  – qu'il est imperméable et ne se laisse pas saturer par les sels de déverglaçage ;
  – que le réseau de bulles d'air est adapté à la quantité d'eau gelable.

• Le béton doit être compact (rapport E/C faible et dosage en ciment élevé), présenter lorsque nécessaire un réseau de bulles d'air approprié, et être formulé en utilisant des granulats non gélifs.

Les principes de prévention concernent tous les paramètres de formulation, les conditions environnementales et les conditions de fabrication et de mise en œuvre du béton (temps de transport, vibration, talochage, cure, etc.).

> ***Nota***
> *Toutefois le niveau de la résistance mécanique n'est pas un critère de résistance au gel. Des bétons de résistance caractéristique à 28 jours comprise entre 50 et 80 MPa, formulés sans agents entraîneur d'air, n'ont pas forcément un bon comportement au gel, notamment à l'écaillage.*

4.3.1 - Notion de facteur d'espacement des bulles

Pour empêcher l'apparition de pressions excessives dans le béton, il est possible de créer, grâce à un agent entraîneur d'air, un réseau de bulles qui doivent être nombreuses, de petites dimensions, bien réparties et suffisamment rapprochées. Le respect de la quantité d'air entraîné dans un béton n'est pas suffisant pour garantir sa résistance au gel, il faut créer un véritable réseau de bulles d'air. Leurs dimensions ne doivent pas dépasser quelques dizaines de microns. Leur espacement, qui détermine le niveau de pression, proportionnel au trajet parcouru par

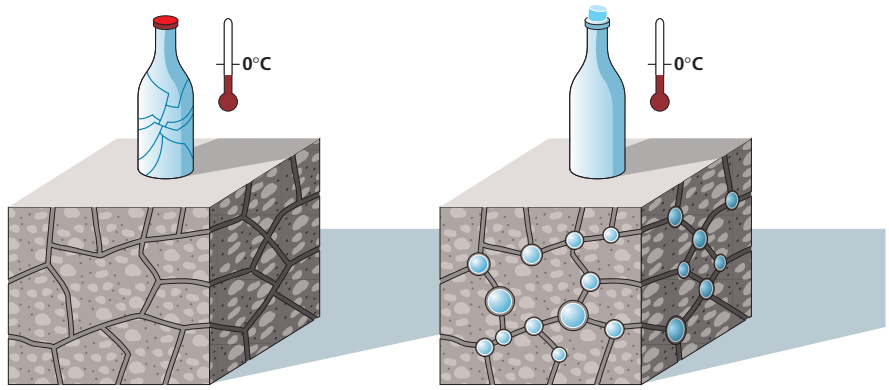


Fig.1 : La création d'un réseau bien réparti de micro-bulles d'air, accroît la résistance au gel de certains types de bétons en diminuant les tensions internes dans les capillaires.

l'eau pour atteindre le front de gel le plus proche, doit être inférieur à une valeur seuil de l'ordre de quelques centaines de microns. Ce réseau de bulles va servir de « vases d'expansion » permettant les mouvements de l'eau et la formation de glace sans préjudice pour le matériau.

L'agent entraîneur d'air a un double rôle :
– maintenir dans le béton un pourcentage d'air de l'ordre de 3 à 8 % du volume de béton ;
– fractionner les bulles en de nombreuses petites bulles de faibles dimensions (créer le plus grand nombre de bulles de petites dimensions).

L'utilisation d'un agent entraîneur d'air permet de stabiliser les bulles qui ont été créées au moment du malaxage, sous forme d'un réseau homogène et dense de petites bulles d'air.

Nota
Les agents entraîneurs d'airs sont des molécules organiques qui ont des propriétés de surfactants. Ils permettent d'abaisser la tension superficielle air-eau et créer à énergie de malaxage donnée des bulles plus petites et plus stables.

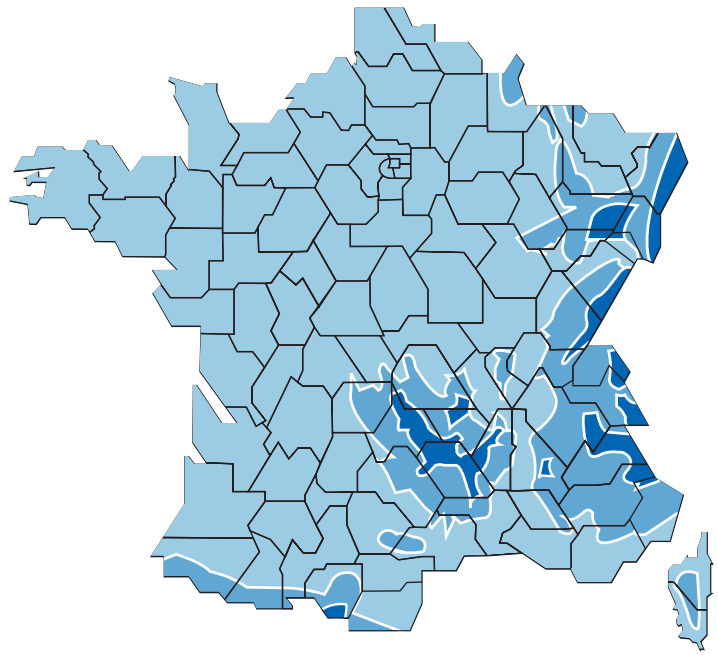
Un réseau efficace de bulles d'air est caractérisé par deux paramètres :
– le volume d'air total exprimé en pourcentage du volume du béton (la mesure de ce paramètre est effectuée sur béton frais au moyen d'un aéromètre) ;
– le facteur d'espacement des bulles d'air L (barre) qui correspond approximativement à la demi-distance moyenne séparant les parois de deux bulles voisines d'un réseau supposé régulier. Il représente la distance moyenne que doit parcourir l'eau pour atteindre une bulle d'air. Le facteur d'espacement conditionne la tenue au gel des bétons formulés avec un agent entraîneur d'air, sa valeur doit être inférieure à des valeurs seuil précisées dans les paragraphes suivants.

4.3.2 - Niveaux de gel

La sévérité potentielle des dégradations dépend du nombre de cycles de gel - dégel, et de la température minimale atteinte, de la vitesse de chute de la température et de la durée du gel (maintien prolongé du béton à de basses températures). Pour prendre en compte simplement ces paramètres, trois niveaux de gel sont définis dans le fascicule 65A et la norme NF EN 206-1 qui donne la carte des zones de gel en France :

- gel faible : moins de 3 jours par an avec une température < – 5 °C ;
- gel sévère : plus de 10 jours par an avec une température < – 10 °C ;
- gel modéré : dans les autres cas.

CARTE DE GEL (cf. norme NF EN 206-1)



Gel faible ou modéré : XF1 (sans agents de déverglaçage) / XF2 (avec agents de déverglaçage)

Gel sévère : XF3 (sans agents de déverglaçage) / XF4 (avec agents de déverglaçage)

Gel modéré ou sévère : suivant l'altitude

Nota

Les zones de gel faible ne sont pas concernées par ces principes de prévention. Le fascicule de documentation P 18-326 « Bétons-zones de gel en France » donne les niveaux de gel par cantons. Toutefois, le classement ne prend pas en compte les conditions particulières locales d'environnement.

4.3.3 - Niveaux de salage

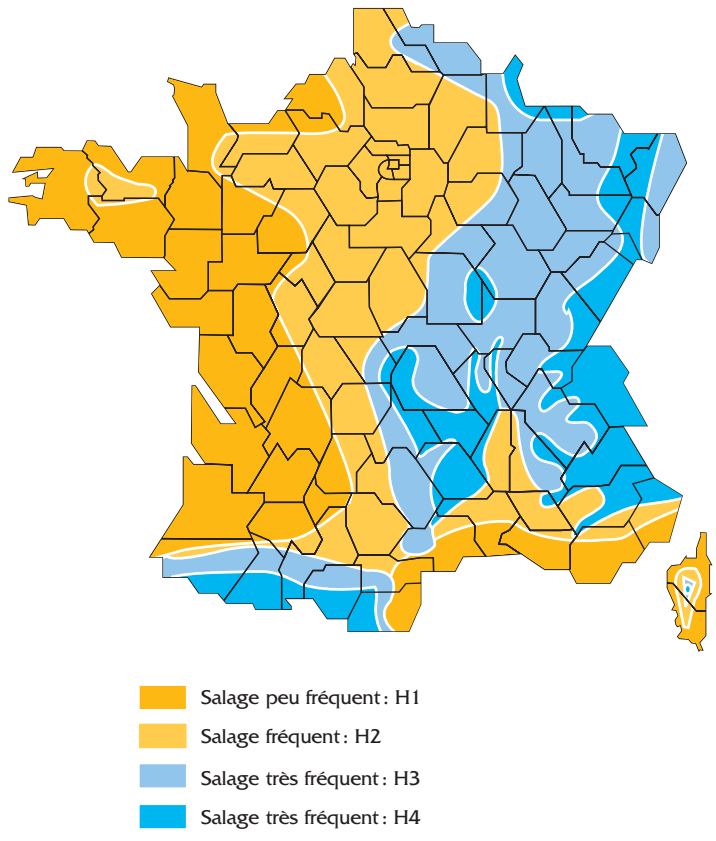
Les niveaux de salage sont définis par référence à la carte des zones de rigueur hivernale Hi, (SETRA de novembre 1994, ***Aide à l'élaboration du dossier d'organisation de la viabilité hivernale***).

Cette notion introduite dans le fascicule 65-A est développée dans le guide technique du LCPC.

n = nombre de jours de salage :

– salage peu fréquent $n < 10$;
– salage fréquent $10 \leq n < 30$;
– salage très fréquent $n \geq 30$.

CARTE DES DEGRÉS DE SALAGE



Le marché doit préciser toutes les données caractérisant l'environnement dans lequel sont situées les parties de l'ouvrage ainsi que les classes d'exposition

4.3.4 - Degrés de saturation en eau du béton

Le degré de saturation en eau de la pâte de ciment conditionne sa tenue au gel. Un béton sera d'autant plus dégradé par le gel, s'il est entièrement saturé d'eau ou dans un état proche de la saturation. Les parties d'ouvrages les plus vulnérables sont donc celles qui sont au contact de l'eau et soumises au rejaillissement de la saumure.

La norme NF EN 206-1 distingue deux degrés de saturation en eau du béton :

- **forte saturation en eau :**
  - surfaces horizontales exposées à la pluie et au gel avec ou sans sel de déverglaçage ;
  - surfaces verticales exposées au gel et directement soumises aux projections des sels de déverglaçage ;
- **saturation en eau modérée :**
  surfaces verticales de béton exposées à la pluie, au gel ainsi qu'au gel et à l'air véhiculant des sels de déverglaçage ou des brouillards salins.

4.3.5 - Classes d'exposition concernées

Quatre « sous-classes » d'exposition définies dans la Norme NF EN 206-1 concernent les bétons soumis à l'action du gel et/ou aux sels de déverglaçage.

XF1 : saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage.
XF2 : saturation modérée en eau avec agents de déverglaçage.
XF3 : forte saturation en eau, sans agent de déverglaçage.
XF4 : forte saturation en eau, avec agents de déverglaçage ou de mer.

4.3.6 - Types d'ouvrages concernés

Les principes de prévention s'appliquent à tous les ouvrages non protégés des intempéries ou au contact avec l'eau ou les rejaillissement de saumure et soumis à deux types d'exposition spécifiques : le gel pur ou le gel pur en présence de sels de déverglaçage.

Pour les ouvrages d'art, ils concernent plus particulièrement les appuis (piles, chevêtres, piédroits et culées) soumis à des projections d'eau chargées de sels de déverglaçage et tous les éléments de superstructures (longrines de scellement des joints de chaussées et des dispositifs de sécurité, corniches, contre-corniches, bordures de trottoirs, caniveaux, etc.).

Ils peuvent concerner aussi le long des réseaux routiers, les murs de soutènement, les écrans acoustiques, les entrées de tunnels et de tranchées couvertes ainsi que les glissières de sécurité en béton (GBA, DBA).

> ***Nota***
> *Les joints de chaussées étant rarement étanches, les encorbellements des tabliers de certains ouvrages peuvent également être concernés.*

Tableau n° 13 : corrélation entre les classes d'exposition, les niveaux de gel et les niveaux de salage

Classes d'exposition	*Niveaux de gel*	*Niveaux de salage*
XF1	Modéré	Peu fréquent
XF2	Modéré	Fréquent
XF3	Modéré	Peu fréquent
	Sévère	Peu fréquent
XF4	Modéré	Fréquent
	Sévère	Fréquent
	Modéré	Très fréquent
	Sévère	Très fréquent

4.3.7 - Quatre types de béton soumis au gel

Selon le niveau de gel auquel est soumis l'ouvrage, le degré de saturation du béton et le niveau de salage, on distingue quatre types de bétons :
– béton soumis au gel modéré sans eau avec peu de sels de déverglaçage (salage peu fréquent) ;
– béton soumis au gel modéré en présence de sels de déverglaçage (salage fréquent) ;

– béton soumis au gel sévère sans sels de déverglaçage. Ces bétons sont dénommés **béton G** (béton formulé pour résister au gel interne seul) ;
– béton soumis au gel modéré et sévère en présence de sels de déverglaçage. Ces bétons sont dénommés **béton G + S** (béton formulé pour résister au gel interne et à l'action des sels de déverglaçage).

Tableau n° 14 : classification des différents types de bétons

Choix du type de bétons		***Type de gel***	
		modéré	***Sévère***
Type de salage	Peu fréquent	Béton adapté [1]	Béton G
	Fréquent	Béton adapté avec [1] Teneur en air minimale = 4 % ou essais de performance	Béton G + S
	Très fréquent	Béton G + S	Béton G + S

1. Béton adapté : béton conforme à la NF EN 206-1 et possédant une bonne compacité. Seuls les bétons correspondants aux cases grisées font l'objet de prescriptions particulières dans le guide technique du LCPC.

4.3.8 - Indicateurs de durabilité

Résistance au gel interne

La résistance au gel du béton dans la masse est évaluée de deux manières suivant le type de béton :
– béton formulé avec un agent entraîneur d'air ;
Le facteur d'espacement L (barre) est déterminé dès le stade de la formulation du béton. Il est mesuré sur béton durci selon la norme ASTM C 457 à une échéance de 4 à 5 jours et permet de valider l'efficacité du réseau de bulles d'air entraîné. Les paramètres du réseau de vides d'air dans le béton durci sont déterminés au microscope.
– béton formulé sans ou avec peu d'agent entraîneur d'air :
La résistance au gel interne de ces bétons est évaluée avec l'essai de performance défini dans la norme P 18-424 pour le gel sévère avec un degré de saturation en eau du béton fort et dans la norme P 18-425 pour le gel modéré quel que soit le degré de saturation en eau du béton, et pour le gel sévère avec une saturation modéré en eau du béton. La durée des essais est de l'ordre de 3,5 mois.

Résistance à l'écaillage

La résistance à l'écaillage représente le comportement de la surface du béton soumis aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage. Elle est déterminée selon la norme XP P 18-420 en mesurant la masse de matière écaillée (sur quatre éprouvettes cubiques de béton durci exposées à des cycles de gel-dégel en présence d'une solution saline). La durée de l'essai est de l'ordre de trois mois.

4.3.9 - Recommandations spécifiques pour l'élaboration des bétons

Le guide technique du LCPC donne toutes les informations utiles pour obtenir des bétons résistants au gel. Elles concernent la formulation, les spécifications sur les constituants, les spécifications exigées sur le béton durci ainsi que les informations essentielles concernant la fabrication, la mise en œuvre et les dispositions constructives.

4.3.9.1 Bétons traditionnels

Les recommandations concernent les bétons de résistances caractéristiques à 28 jours inférieures à 50 MPa, formulés avec un entraîneur d'air.

Spécifications sur les granulats et sur les ciments

La qualité intrinsèque des granulats est importante vis-à-vis de la durabilité du béton au gel-dégel.

Les granulats doivent être de catégorie A selon la norme XP 18-540 ou satisfaire les spécifications des normes NF EN 12620 et XP P 18-545 et respecter les spécifications complémentaires spécifiées dans le guide technique concernant notamment la non gélivité.

Le type et la classe des ciments sont strictement limités. Les ciments contenant des cendres volantes sont notamment interdits. La préconisation de ciments PM ou ES est justifiée par la présence de sulfates dans les sels de déverglaçage, en quantité supérieure ou égale à 3 %. Le dosage minimal en ciment est fixé à 385 kg/m^3 par les bétons G et G+S.

Spécifications sur les additions

Les cendres volantes sont interdites dans tous les cas, compte tenu de leur teneur importante en imbrûlés.

Les fumées de silice, les laitiers moulus et les additions calcaires peuvent être utilisés comme correcteur de la granularité des sables et addition au ciment uniquement avec les ciments CEM I, mais ne sont autorisés en substitution partielle au ciment que pour les bétons G. Le guide technique précise les dosages maximaux à ne pas dépasser pour chaque type d'addition.

Caractéristiques exigées sur les bétons traditionnels

Tableau n° 15 : **caractéristiques exigées sur les bétons**

Caractéristiques	***Béton G***	***Béton G + S***
Rapport Eau Efficace/ciment	≤ 0,50	≤ 0,45
Résistance caractéristique en compression	≥ 30 MPa	≥ 35 MPa
Facteur d'espacement		
L (barre)		
- étude et convenance	≤ 250 µm	≤ 200 µm
- contrôle	≤ 300 µm	≤ 250 µm
Écaillage		
- étude et convenance	Sans objet	≤ 600 g/m²
- contrôle	Sans objet	≤ 750 g/m²

Nota
Les recommandations précisent des possibilités de dérogations aux spécifications sur les granulats et au seuil de facteur d'espacement (en effectuant un essai de performance).

4.3.9.2 - Bétons à Hautes Performances

Les recommandations concernent les bétons de résistances caractéristiques à 28 jours supérieures ou égales à 50 MPa formulés avec ou sans entraîneur d'air.

Les recommandations distinguent deux classes de BHP en fonction du rapport E/C :
– classe 1 E/C ≥ 0,32
– classe 2 E/C < 0,32

et 2 types de formulations :
– béton formulé sans entraîneur d'air ;
– béton formulé avec entraîneur d'air.

Spécifications sur les granulats et les ciments

Elles sont identiques à celles des bétons traditionnels sauf pour ce qui concerne la classe des ciments qui est fixée à 52,5 MPa.

Spécifications sur les additions

Les cendres volantes sont également interdites dans tous les cas, compte tenu de leur teneur importante en imbrûlées.

Les fumées de silice, les laitiers moulus et les additions calcaires peuvent être utilisés comme correcteur de la granularité des sables, et addition au ciment mais uniquement avec les ciments CEM I. Par contre les additions ne sont pas autorisées en substitution partielle au ciment. Le guide technique précise les dosages maximaux à ne pas dépasser pour chaque type d'addition.

Caractéristiques exigées sur les bétons

Tableau n° 16 : **caractéristiques exigées sur les bétons**

Caractéristiques	***Béton G***	***Béton G + S***
Résistance caractéristique en compression	≥ 50 MPa	≥ 50 MPa
Bétons formulés avec un entraîneur d'air		
Facteur d'espacement L (barre)		
– étude et convenance	≤ 250 µm	≤ 200 µm
– contrôle	≤ 300 µm	≤ 250 µm
Écaillage		
– étude et convenance	sans objet	≤ 600 g/m²
– contrôle	sans objet	≤ 750 g/m²
Bétons formulés sans entraîneur d'air		
Gel interne : normes P 18-424 ou P 18-425		
– étude et convenance		
allongement $\frac{\Delta 1}{1}$	≤ 400 µm/m	≤ 400 µm/m
rapport des carrés des fréquences de résonance $f^2 0/f^2 1$	≥ 75	≥ 75
– contrôle		
allongement $\frac{\Delta 1}{1}$	≤ 500 µm/m	≤ 500 µm/m
$f^2 0/f^2 1$,	≥ 60	≥ 60
Écaillage norme XP P 18-420		
– étude et convenance	sans objet	≤ 600 g/m²
– contrôle	sans objet	≤ 750 g/m²

Nota

• Les essais de performance de gel interne sur béton durci formulé sans entraîneur d'air définis dans les normes P 18-424 et P 18-425, consistent à appliquer à des éprouvettes prismatiques en béton des cycles de gel-dégel et à mesurer les allongements (gonflement) et les fréquences de résonance des éprouvettes.

La norme P 18-424 est appliquée dans les cas de gel sévère avec une forte saturation en eau du béton.

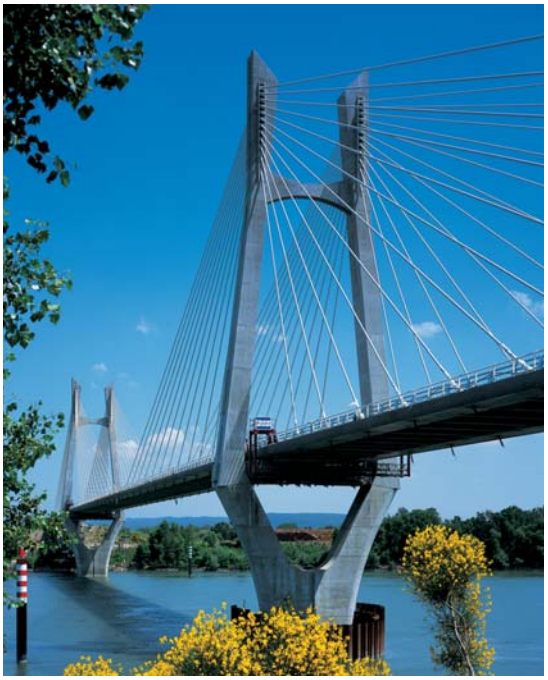
La norme P 18-425 est appliquée dans les cas suivants :

– gel modéré, quel que soit le degré de saturation en eau du béton ;

– gel sévère avec une saturation modérée en eau du béton.

Informations complémentaires concernant les bétons traditionnels et les BHP

Les recommandations précisent des possibilités de dérogation aux spécifications sur les granulats et au seuil du facteur d'espacement.



Le guide technique consacre aussi un chapitre spécifique aux modalités de réalisations des épreuves d'étude et de convenance et donne les bases pour la mise en place d'un plan de contrôle de la qualité des bétons.

L'étude de formulation doit valider la compatibilité de l'entraîneur d'air avec les autres adjuvants et le ciment. L'entraîneur d'air doit permettre de créer un réseau de bulles d'air stable tout en maintenant une rhéologie adaptée à l'ouvrage et aux conditions de mise en œuvre du béton.

Un complément d'étude sur la centrale de fabrication est fortement conseillé afin d'ajuster les quantité d'adjuvants et notamment celle de l'agent entraîneur d'air, afin de respecter la fourchette d'air entrainé définie à l'étude et permettant d'obtenir la résistance au gel du béton.

Chapitre 5

Prévention contre les phénomènes d'alcali-réaction

5.1 - Introduction

5.2 - Phénomène d'alcali-réaction

5.3 - Document de référence

5.4 - Principes de prévention

5.1 - Introduction

Le phénomène d'alcali-réaction résulte de l'action des alcalins solubles (oxyde de sodium Na_2O et oxyde de potassium k_2O) du béton sur une certaine forme de silice réactive, en présence d'eau. Il correspond à un ensemble de réactions chimiques complexes qui peuvent se déclencher entre certaines phases minérales contenues dans les granulats et la solution interstitielle fortement basique du béton, lorsque plusieurs conditions sont réunies simultanément : présence d'une forme de silice des granulats dite « potentiellement réactive », des alcalins du béton et de l'eau en quantité suffisante.

5.2 - Phénomène d'alcali-réaction

Il s'agit de réactions internes au béton mettant en jeu essentiellement les éléments présents à l'origine dans le béton et un apport d'eau externe. En l'absence de précaution, cette pathologie peut apparaître dans les parties d'ouvrages les plus sévèrement exposées à l'humidité, en général au bout de quelques années (voire plusieurs dizaines d'années). On observe la formation d'un gel gonflant qui peut provoquer, en particulier, au cœur du béton, des déformations et une microfissuration du matériau. Les contraintes expansives génèrent, si elles dépassent la résistance en traction du béton, un décollement à l'interface pâte-granulats et la formation de microfissures à l'interface béton-armatures qui se matérialise en surface par une fissuration orientée selon la direction des aciers.

Trois conditions sont donc nécessaires pour amorcer et entretenir les réactions de ce phénomène exceptionnel : il faut que simultanément, l'environnement soit fortement humide, la teneur en alcalins solubles dans la solution interstitielle soit élevée et dépasse un seuil critique et qu'il existe dans le béton de la silice réactive en quantité suffisante (apportée par des granulats potentiellement réactifs).

Le rôle fondamental de l'humidité (80 à 85 % d'humidité relative moyenne) a été mis en évidence par de nombreux essais en laboratoire et par des constatations sur des ouvrages.

Des travaux de recherche importants ont été engagés en France dès le début des années 1970 associant les experts du réseau du ministère de l'équipement et de l'industrie cimentière afin de trouver une explication à cette réaction et de mettre au point des essais d'analyse. Ces travaux ont abouti à l'établissement de recommandations de préventions, provisoires en 1991 puis définitives en 1994.

Quelques ouvrages conçus en France dans les années 1970 à 1980 ont présenté des pathologies générées par l'alcali-réaction sans mettre en cause leur capacité structurelle et sans affecter les propriétés mécaniques du béton. les recherches menées entre les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, les analyses des données d'observation sur des ouvrages et des expériences en laboratoires ont permis de mettre en œuvre des mesures préventives qui se sont avérées efficaces. La mise en place d'un ensemble cohérent de recommandations de prévention a enrayé depuis plus de 10 ans toute manifestation du phénomène.

Le phénomène d'alcali-réaction est depuis plusieurs années parfaitement maîtrisé, il est maintenant possible de prévenir tout risque d'alcali-réaction dans les bétons et éviter tout désordre.

5.3 - Document de référence

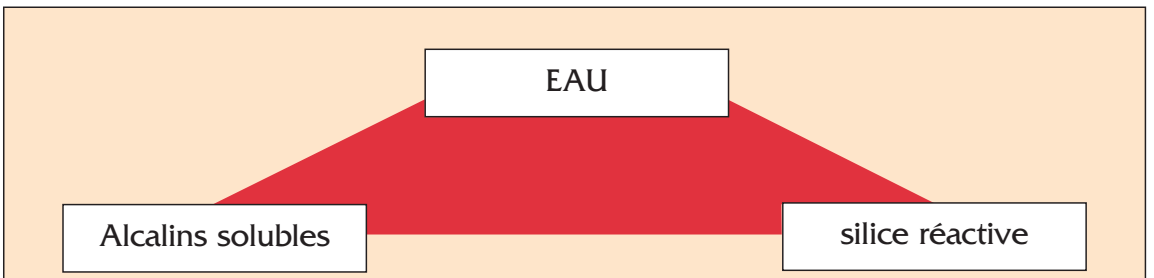
Les recommandations relatives à la prévention contre les phénomènes d'alcali-réaction font l'objet d'un fascicule édité par le LCPC en juin 1994 intitulé : **Recommandations pour les préventions des désordres dûs à l'alcali-réaction.**

Les mesures de prévention consistent en fonction de l'environnement et de la destination de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage, à déterminer le niveau de risque et de prévention à atteindre, puis compte tenu de cette approche à vérifier que la formulation prévue pour le béton est satisfaisante.

5.4 - Principes de prévention

5.4.1 - Principe de la démarche de prévention

Le principe de la démarche préventive consiste à ne pas se retrouver dans une situation dans laquelle sont présentes simultanément les trois conditions nécessaires à l'amorçage de la réaction. Il convient donc d'éviter la conjonction des trois facteurs **eau** (condition d'humidité relative supérieure à 80 - 85 %) **alcalins** (concentration en alcalins solubles élevée dans la solution interstitielle) **silice réactive** (présence de granulats réactifs).



Principe de prévention : se placer en dehors de la zone rouge.

Lorsque le niveau de prévention le plus élevé est requis, il faut, pour prévenir les désordres, si l'on est dans un environnement humide, confectionner le béton avec des granulats non réactifs ou adapter la formulation du béton pour la rendre compatible en limitant la teneur en alcalins actifs solubles avec des granulats potentiellement réactifs.

Les conditions de risques d'apparition du phénomène d'alcali-réaction et son incidence sont donc fonction des classes d'expositions dans lesquelles se trouve l'ouvrage ou les parties d'ouvrages, du type d'ouvrage et des paramètres de formulation du béton.

La méthode de prévention se décline en deux étapes :
– **définition du niveau de prévention nécessaire** à atteindre (ou niveau acceptable de risque) par type d'ouvrage (ou partie d'ouvrage) et par classe d'exposition ;
– en fonction du niveau de prévention, **détermination des recommandations à adopter**.

5.4.2 - Niveau de prévention

Types d'ouvrage

Les ouvrages sont classés en trois types en fonction de leur nature, de leur importance stratégique et de la sécurité apportée aux usagers.

Type I
Éléments non porteurs
Risques d'apparition des désordres faibles ou acceptables :
– ouvrages provisoires ou facilement remplaçables ;
– la plupart des produits préfabriqués en béton.

Type II
Risques d'apparition des désordres peu tolérables :
la plupart des ouvrages de génie civil.

Type III
Risques d'apparition des désordres inacceptables :
– ponts ou viaducs exceptionnels, centrales nucléaires, barrages, tunnels…
– monuments ou bâtiments de prestige.

Cette classification permet de mettre en œuvre des recommandations de prévention adaptées à l'importance de l'ouvrage.

Nota
Cette classification des ouvrages relève du maître d'ouvrage après analyse du niveau de risque vis-à-vis de l'alcali réaction qu'il est prêt à accepter pour son ouvrage.

Classes d'exposition

Les contraintes environnementales auxquelles est soumis l'ouvrage sont regroupées en quatre classes prenant en compte tout particulièrement les critères liés à l'hygrométrie et aux apports d'alcalins.

Classe 1 : environnement sec ou peu humide (hygrométrie inférieure à 80 %).
Classe 2 : environnement avec hygrométrie supérieure à 80 % ou en contact avec l'eau.
Classe 3 : environnement avec hygrométrie supérieure à 80 % et avec gel et fondants.
Classe 4 : environnement marin.

Niveau de prévention nécessaire

On distingue trois niveaux de prévention (A, B ou C) qui sont fonction du type d'ouvrage et de la classe d'exposition de l'ouvrage.

Le niveau de prévention est donné dans le tableau n° 20. Il s'applique à l'ouvrage entier ou à des parties de l'ouvrage.

Tableau n° 20 : niveau de prévention

Type d'ouvrage	**Classe d'exposition**			
	1	**2**	**3**	**4**
I	A	A	A	A
II	A	B	B	B
III	C	C	C	C

Pour les ouvrages d'art le niveau de prévention à envisager est le niveau B pour la majorité des ouvrages et C pour les ouvrages exceptionnels.

5.4.3 - Recommandations

RECOMMANDATIONS :

NIVEAU A : pas de spécifications particulières

NIVEAU B : six possibilités d'acceptation de la formule béton

NIVEAU C : utilisation de granulats non réactifs (granulats PRP sous conditions)

À chaque niveau de prévention sont associées des recommandations.

- **Niveau A :** pas de spécification particulière.
- **Niveau B :** six possibilités d'acceptation de la formule béton.
  Il convient de répondre **au moins une fois positivement** à l'une des six questions :

1 – l'étude du dossier granulats montre-t-elle que les granulats sont non-réactifs ?
2 – la formulation satisfait-elle à un critère analytique (bilan des alcalins satisfaisant) ?
3 – la formulation satisfait-elle à un critère de performance ?
4 – la formulation présente-t-elle des références d'emplois suffisamment convaincantes ?
5 – le béton contient-il des additions minérales inhibitrices en proportions suffisantes ?
6 – les conditions particulières aux granulats PRP sont-elles satisfaites ?

Si la formulation ne répond positivement à aucune de ces six questions, il convient de modifier tout ou partie des granulats, ou de choisir un ciment mieux adapté ou d'incorporer des additions minérales normalisées inhibitrices et de revérifier ces six conditions d'acceptation.

• **Niveau C :** utilisation recommandée de granulats non réactifs (NR), granulats potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP) éventuellement autorisés sous réserve que les conditions particulières à leur emploi soient satisfaites, sur la base d'un essai de performance.

> ***Nota***
> *La solution la plus simple pour s'affranchir de tout risque d'alcali-réaction consisterait à n'employer que des granulats non réactifs. Mais cette solution n'est souvent pas économique, voire non réalisable dans certaines zones géographiques. Il est donc nécessaire de disposer de principes de prévention qui puissent autoriser l'utilisation de granulats potentiellement réactifs.*

5.4.4 - Classification des granulats

(éléments de réponse à la question 1)

Les granulats sont les « émetteurs » potentiels de silice réactive. La connaissance des granulats, constituants essentiels du béton, est donc indispensable pour formuler un béton ne présentant aucun risque vis-à-vis de l'alcali-réaction. Les granulats sont classés en trois catégories vis-à-vis de l'alcali-réaction à l'aide de plusieurs essais normalisés de réactivité alcaline (analyses physico-chimiques, minéralogiques ou examens pétrographiques, mesure de la dissolution de la silice, essais de stabilité dimensionnelle en milieu alcalin) :

– granulats non réactifs : NR ;
– granulats potentiellement réactifs : PR ;
– granulats potentiellement réactifs mais avec effet de pessimum : PRP
(dans ces granulats la proportion de silice réactive est située au-delà d'une plage de valeurs dites pessimales – ils sont réactifs sous certaines conditions).

Cette démarche de qualification des granulats permet de mieux connaître leur teneur en alcalins libérables et leur susceptibilité à réagir en présence d'un excès d'alcalins. Une formulation du béton adaptée peut convenir à l'utilisation de granulats potentiellement réactifs.

Nota

Principales normes d'essais sur les granulats :

– P 18-557 Granulats – éléments pour l'identification des granulats ;
– P 18-589 Granulats – réactivité potentielle de type alcali-silice et alcali-silicate ;
– P 18-585 Granulats – stabilité dimensionnelle en milieu alcalin, essai sur mortier ;
– P 18-587 Granulats – stabilité dimensionnelle en milieu alcalin, essai sur béton ;
– P 18-588 Granulats – stabilité dimensionnelle en milieu alcalin, essai accéléré sur mortier microbar.

Nota

On distingue trois types de réactions potentielles en fonction de la nature des granulats. Les réactions alcali-silices qui se produisent avec des granulats contenant des variétés de silice mal cristallisées (quartz, cristobalite, trydimite, opale, etc.), les réactions alcali-silicates générées par des granulats tels que grès, gneiss, granite, basalte ; les réactions alcali-carbonates provoquées avec des granulats dolomitiques.

5.4.5 - Bilan des alcalins

(éléments de réponse à la question 2)

Le critère analytique consiste à déterminer le taux d'alcalins actifs dans le béton et à le comparer à une valeur limite. En effet, si le béton contient peu d'alcalins actifs, la réaction alcali-silice ne peut pas se développer, quelle que soit la réactivité des granulats. La détermination de la quantité totale d'alcalins actifs contenus dans tous les constituants du béton et la comparaison à un taux limite, permet de s'assurer du non-déclenchement de la réaction.

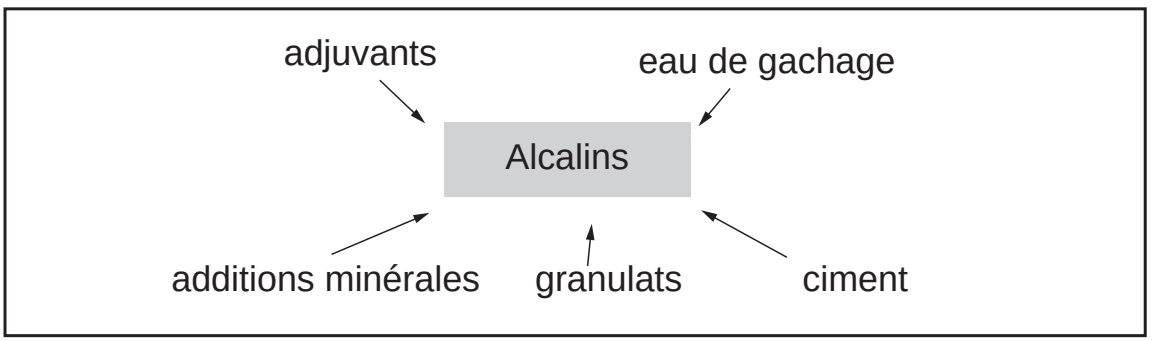
L'annexe E du fascicule de recommandations du LCPC présente une méthode de calcul pour le bilan des alcalins.

Détermination de la quantité d'alcalins

Les alcalins ne sont pas apportés uniquement par le ciment. Il convient de déterminer la quantité totale d'alcalins actifs (c'est-à-dire capables de passer en solutions) contenus dans tous les constituants du béton :
– ciment (alcalins réactifs) ;
– granulats (alcalins libérables) ;
– adjuvants et eau (alcalins totaux) ;
– additions éventuelles.
La teneur en alcalins actifs du béton est égale à la somme des alcalins actifs apportés par chaque constituant.

> ***Nota***
> *On désigne par alcalins les oxydes de potassium (K_2O) et les Oxydes de sodium (Na_2O). Ils sont exprimés en pourcentage massique d'oxyde Na_2O et K_2O, sous forme d'équivalent Na_2O selon la formule $Na_2O + 0{,}658\ K_2O$ avec 0,658 = rapport des masses molaires entre Na_2O et K_2O).*

Tous les constituants sont susceptibles de fournir des alcalins



La quantité totale d'alcalins actifs (c'est-à-dire ceux qui sont effectivement disponibles pour la solution interstitielle) est désignée par la teneur T exprimée en kg/m³ de béton.

Taux limites

• Valeur maximale à ne pas dépasser T max < 3,5 kg/m³ de béton

• Valeur moyenne à ne pas dépasser

$$T\,m < \frac{3{,}5}{1+2Vc}$$ en kg/m³ de béton

avec Vc coefficient de variation de la teneur en alcalin actif du ciment,

$Vc = \frac{T}{m}$ avec T = écart type, m = moyenne

> ***Nota***
> *Si les résultats statistiques des teneurs en alcalins actifs du ciment ne sont pas disponibles, il convient de vérifier que : Tmax < 3,3 kg / m³ de béton, et Tm < 3,0 kg / m³ de béton.*

5.4.6 - Critère de performance

(Éléments de réponse à la question 3)

La formulation du béton peut être validée par un essai accéléré (de stabilité dimensionnelle) qui consiste à mesurer l'allongement d'une éprouvette béton (7 x 7 x 28 cm^3) et à le comparer à une valeur limite fixée.

Le mode opératoire de l'essai est précisé dans l'annexe VI du fascicule de recommandations du LCPC. Le seuil d'allongement maxi à respecter est de 0,02 % mais l'échéance de l'essai est fonction du type de granulats (3 mois ou 5 mois). Cette démarche permet de qualifier les bétons qui seront effectivement mis en œuvre dans l'ouvrage.

5.4.7 - Références d'emploi

(Éléments de réponse à la question 4)

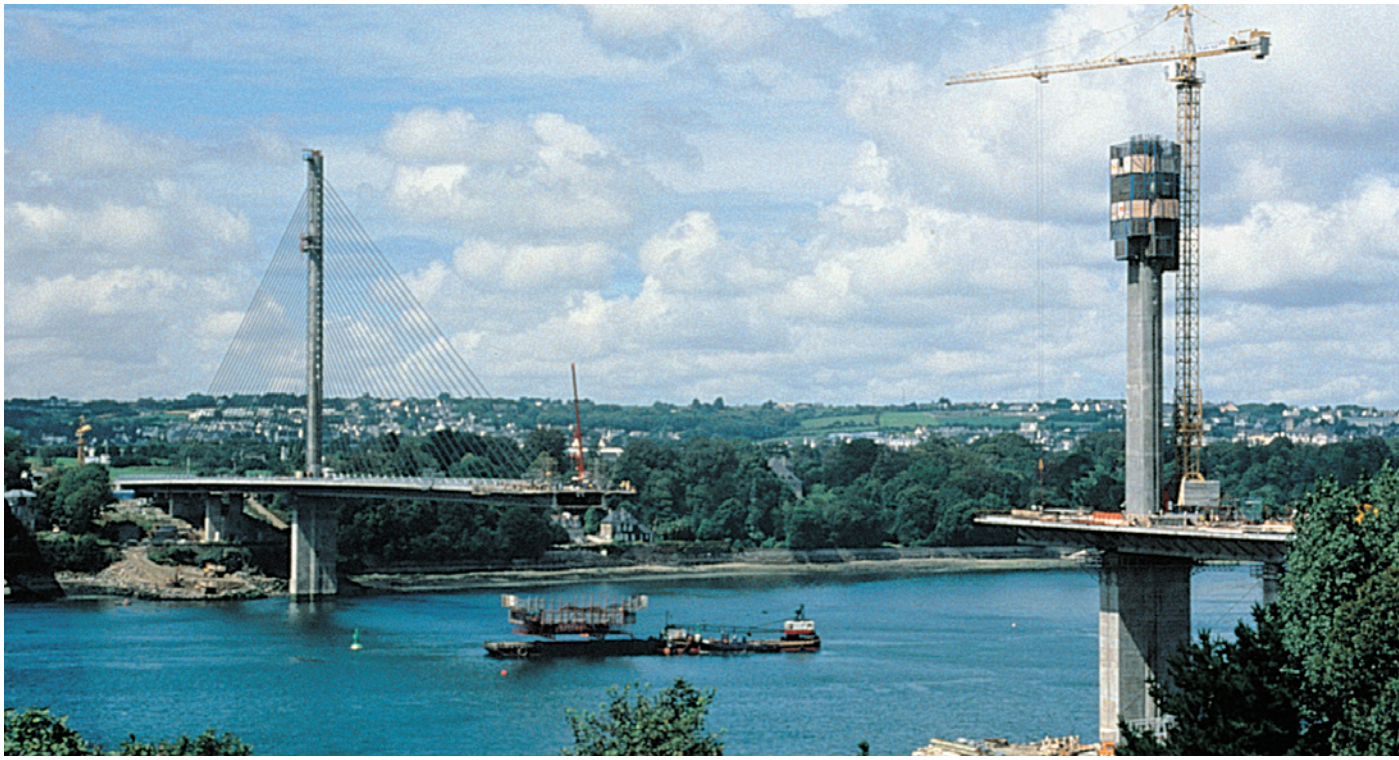
La validation de la formulation selon les références d'emploi nécessite une analyse précise des ouvrages réalisés depuis plus de dix ans dans la région, elle permet une optimisation des ressources en granulats locaux.

5.4.8 - Additions minérales

(Éléments de réponse à la question 5)

Certaines additions minérales normalisées (laitier de haut fourneau, cendres volantes silico-alumineuse, fumées de silice, etc.) ont un effet bénéfique vis-à-vis de la prévention contre le phénomène d'alcali-réaction dans la mesure où elles sont bien dosées et de composition adaptée. Elles peuvent être incorporées au ciment ou introduites lors de la fabrication du béton.

Leur efficacité peut être validée en vérifiant que le béton satisfait le critère de performance (voir le paragraphe 5.4.6).



5.4.9 - Granulats PRP

(éléments de réponse à la question 6)

Les granulats potentiellement réactifs mais avec effet de pessimum (PRP) peuvent être utilisés en particulier si la formulation contient uniquement des granulats, sables et gravillons PRP et si les critères d'expansion d'éprouvettes en béton sont respectés.

Chapitre 6

Prévention contre les phénomènes de gonflement interne sulfatique

6.1 - Introduction

6.2 - Phénomène de gonflement interne sulfatique

6.3 - Document de référence

6.4 - Principes de prévention

6.1 - Introduction

L'ettringite est un hydrate contenant des sulfates dont les propriétés de gonflement sont connues depuis plus d'un siècle. C'est pourquoi, des précautions particulières sont prises lorsqu'un béton est exposé à un environnement riche en sulfate, notamment vis-à-vis des caractéristiques du ciment.

Cependant, dans certains cas rares, lorsque le béton subi un échauffement au jeune âge, la formation différée d'ettringite peut avoir lieu sans apport d'ions sulfate externes. Ces réactions sont susceptibles de provoquer un gonflement important du béton. Les dégradations sont caractérisées par de nombreuses fissures en surface qui apparaissent après plusieurs années d'exposition à des conditions sévères caractérisées par une forte humidité. En France, la découverte de cette pathologie et de ses manifestations délétères est récente, avec les premiers cas identifiés vers les années quatre-vingt-dix. Ce phénomène rare peut se rencontrer, seulement dans des environnements humides, dans des pièces massives de ponts en béton coulées en place et également sur des pièces de béton ayant subi un traitement thermique. Les cas de structures concernées par cette pathologie, sont peu nombreux. L'origine du gonflement et la nature des paramètres impliqués ont fait l'objet de nombreuses études. La principale difficulté réside dans la complexité du mécanisme de gonflement et du nombre important de paramètres impliqués.

6.2 - Phénomène de gonflement interne sulfatique

LES TROIS TYPES D'ETTRINGITE

Il y a toujours de l'ettringite (trisulfoaluminate de calcium hydraté) dans le béton. Sa formation nécessite la consommation d'une grande quantité d'eau.

On distingue trois types d'ettringite

Ettringite primaire
Elle se forme dans les premiers instants d'hydratation du ciment sous l'action des sulfates d'origine interne du béton (les sulfates de calcium introduits dans le ciment comme régulateur de prise réagissent au contact de l'eau avec l'aluminate tricalcique C_3A et donnent naissance à l'ettringite primaire). Elle n'est jamais expansive ni pathologique. Elle se décompose ensuite pour former du monosulfoaluminate de calcium. Elle se présente le plus généralement sous forme d'aiguilles.

Ettringite secondaire
Elle se développe quand le béton a déjà durci. Si les sulfates sont d'origine interne, l'ettringite est stable et n'est pas à caractère expansif. Si les sulfates sont d'origine externe, l'ettringite peut générer de l'expansion.

Ettringite différée
Elle se développe quand le béton a déjà durci, elle peut provoquer ou non de l'expansion. Les ions sulfate sont d'origine interne. Il s'agit de béton pour lequel l'ettringite primaire n'a pu se former dans les premiers instants de l'hydratation. Cette formation d'ettringite engendre des contraintes internes dans le béton, qui peuvent être suffisamment importantes pour provoquer sa microfissuration et à terme son gonflement.
De nombreuses conditions doivent être réunies tant au niveau des constituants du béton que de l'échauffement et de l'humidité de l'environnement pour que ce type d'ettringite apparaisse, ce qui explique sa rareté.

On distingue deux types de réactions sulfatiques

Les réactions sulfatiques d'origine externe

Il faut distinguer le phénomène de réaction sulfatique d'origine interne (RSI), du phénomène de réaction sulfatique d'origine externe (RSE), connu depuis 1887, et signalé par Candlot à la suite d'observations sur les mortiers des fortifications de PARIS lorsqu'ils se trouvaient en contact avec des eaux gypseuses. Les sources de sulfates pouvant agir sur les bétons sont multiples. Les sulfates d'origine externe peuvent être apportés par les sols (décomposition de substances organiques, présence de gypse, utilisation intensive d'engrais) et les sels de déverglaçage véhiculés par les eaux souterraines, les eaux d'infiltration, l'eau de mer ou les eaux générées par des sites industriels (usine de fabrication d'engrais, industrie chimique, etc.). Ils pénètrent par le réseau capillaire du béton et ils peuvent provoquer la formation d'ettringite dite « secondaire » qui peut générer des phénomènes d'expansion et donc des dégradations du béton. Les sulfates les plus agressifs pour le béton sont les sulfates de calcium, de sodium, de magnésium et d'ammonium. La démarche de prévention pour s'affranchir de ces phénomènes de réactions sulfatiques d'origine externe consiste à formuler des bétons avec des constituants conformes aux normes, avec un rapport E/C faible, et en privilégiant selon les classes d'exposition dans lequel se trouve le béton des ciments adaptés (CEM III et CEM V) contenant des ajouts de laitiers (supérieur à 60 %) et de cendres volantes, ou de caractéristiques complémentaires E S (ciments conformes à la norme XP P 15-319). La compacité du béton doit être optimisée, car la perméabilité du béton est le facteur essentiel à réduire pour éviter la diffusion des sulfates jusqu'aux aluminates de calcium de la pâte de ciment hydraté.

Les réactions sulfatiques d'origine interne

Ce phénomène de réaction sulfatique d'origine interne peut apparaître sans apport de sulfate par une source extérieure. Il est souvent dénommé DEF (Delayed Ettringite Formation), traduction anglaise de Formation Différée d'Ettringite.

Les ions sulfates d'origine interne proviennent du ciment et des autres constituants. Ils peuvent dans certaines conditions être dissous dans la solution interstitielle du béton. Les réactions sulfatiques mettent en jeu ces ions sulfates présents dans la solution interstitielle et les aluminates du ciment, elles peuvent conduire à la formation d'ettringite suceptible de provoquer de l'expansion dans le béton durci. Le phénomène de gonflement interne sulfatique peut se manifester par l'apparition à la surface du béton d'une fissuration multi-directionnelle à maille relativement large.

Les principaux symptômes de la pathologie attribuée à la formation d'ettringite différée expansive sont :
– une fissuration multi-directionnelle à large maille de 10 à 30 cm dans la masse du béton ;
– une fissuration présentant une orientation préférentielle en fonction de la distribution des armatures et des contraintes ;
– une ouverture millimétrique des fissures ;
– un bombement de la surface.

Il n'y a pas de symptômes spécifiques à la formation différée d'ettringite expansive car d'autres pathologies peuvent présenter les mêmes symptômes en particulier les phénomènes d'alcali-réaction.

Le premier cas de pathologie attribuée à la formation d'ettringite différée est apparu en Allemagne dans les années quatre-vingt, en France dans les années quatre-vingt-dix. Cette pathologie est rare. Les symptômes sont apparus entre 10 et 30 ans après la mise en service de l'ouvrage.

Il a été constaté que les éléments en béton atteints de cette pathologie sont :
– des pièces massives soumises à un environnement humide sévère pendant plusieurs années ;
– coulés en période estivale ;
– ayant subi une température estimée supérieure à 65 °C au cœur de l'ouvrage pendant le durcissement du béton.

Ce phénomène ne concerne pas uniquement les bétons traités thermiquement mais aussi les bétons coulés en grande masse. Il résulte d'une remobilisation des sulfates « libres » initialement contenus dans la matrice cimentaire, susceptibles de réagir à long terme et former de l'ettringite dite différée.

Les causes, les mécanismes physico-chimiques et la cinétique de la réaction engendrant le phénomène de gonflement interne sulfatique et l'incidence des divers paramètres intervenant lors de la réaction sulfatique, ne sont pas à ce jour parfaitement connus et font l'objet de nombreuses recherches. On a constaté l'incidence importante de la température du béton lors de la prise et des traitements thermiques appliqués au béton, l'incidence de la teneur en alcalin sur la solubilité de l'ettringite, l'incidence de la nature des granulats (expansion plus rapide en présence de granulats siliceux) et de l'humidité (l'eau est l'un des facteurs fondamentaux de la réaction).

LA RÉACTION DE FORMATION D'ETTRINGITE

SULFATES
+
ALUMINATES → **ETTRINGITE (TSA*)**
+
EAU

*TSA : Tri-sulfato-aluminate de calcium hydraté.

Nota
Lorsqu'il y a formation différée d'ettringite, elle n'est pas systématiquement suivie d'expansion. Elle peut générer de l'expansion si elle précipite en milieu confiné.

Nota
Un examen visuel microscopique seul est insuffisant pour faire un diagnostic de la réaction sulfatique interne. Le diagnostic de la DEF est difficile, car l'ettringite est un minéral rencontré dans les bétons sains et qu'il peut y avoir confusion avec des désordres similaires dus à l'alcali-réaction par exemple. Il nécessite une approche globale qui doit prendre en compte les aspects microscopiques liés au béton (examens au microscope électronique à balayage, bilan minéralogique, calcul de l'histoire thermique de la pièce en béton) et les aspects macroscopiques liés à la structure. (environnement, sollicitations mécaniques).

6.3 - Document de référence

Il n'y a pas à ce jour de documents synthétisant les recommandations à mettre en œuvre pour éviter les phénomènes de gonflement interne sulfatique. Un groupe de travail piloté par des experts du LCPC s'est constitué pour rédiger un guide de recommandations pour se prémunir contre le développement de réactions sulfatiques internes. De nombreuses recherches sont en cours aussi bien au sein du réseau des laboratoires de l'équipement que dans les centres de recherches de l'industrie cimentière. Ces études visent à mettre au point et valider des principes de prévention à mettre en œuvre.

Les experts du LCPC en partenariat avec ceux de l'ATILH et du CERIB on développé un test de performance accéléré sur béton permettant d'évaluer la durabilité des couples « Formule de béton et échauffement du béton » vis-à-vis de la formation d'ettringite différée suivie d'expansion, qui soit représentatif des phénomènes observés dans des cas réels et adaptés aux conditions d'exécution tels que le cycle de traitement thermique appliqué au béton lors de l'étuvage en usine de préfabrication et l'échauffement d'une pièce massive coulée en place sur chantier.

Cet essai faisant actuellement l'objet d'une validation complémentaire devra permettre de valider une formulation de béton et de déterminer sa réactivité potentielle à la formation différée d'ettringite ainsi que les combinaisons de paramètres admissibles pour éviter le phénomène. Il est défini dans un projet de mode opératoire (ref: N° 59 - LPC).

6.4 - Principes de prévention

Cinq facteurs sont déterminants pour le développement de la réaction :

- **un apport d'humidité permanent (apport d'eau de l'extérieur ou cycle d'humidification séchage) ;**
- **un fort échauffement du béton pendant son durcissement ;**
- **une teneur élevée en alcalins dans la solution interstitielle du béton ;**
- **une teneur élevée en sulfates ;**
- **une teneur élevée en aluminates.**

Ces divers paramètres doivent *a priori* être réunis simultanément pour provoquer la formation d'ettringite différée.

La conjonction nécessaire et indispensable des cinq facteurs limite le nombre d'ouvrages susceptibles d'être exposés au phénomène.

La démarche préventive consisterait à limiter l'incidence d'un de ces facteurs.

- **Utiliser des constituants du béton conformes aux normes**
  (ciment : NF EN 197-1/eau de gâchage XP P 18-303/Granulats XP P 18-545)
  afin de limiter l'apport en sulfates.

- **Limiter l'échauffement du béton au cœur de la structure**
  Il existe plusieurs moyens pour limiter cet échauffement en intervenant soit au niveau de la formulation du béton, soit au niveau de sa fabrication, soit lors de la réalisation de l'ouvrage :

– en privilégiant, quand cela est possible, un ciment peu exothermique (CEM II, CEM III ou CEM V) ;
– en évitant un dosage excessif en ciment ;
– en diminuant la température des constituants du béton (arrosage des granulats, eau froide) ;
– en évitant les bétonnages en période de forte chaleur ;
– en évitant dans la mesure du possible de concevoir des pièces massives ;
– en évitant les coffrages isolants en période chaude ;
– en adaptant pour la préfabrication les cycles de traitement thermique (optimisation des différents paramètres : température et durée de la période d'attente, vitesse de montée en température, température maximale atteinte par le béton, durée du palier) ;
– en mettant en œuvre des systèmes de refroidissement des bétons (circulation d'eau froide dans des tubes, vaporisation d'eau froide sur les coffrages).

• **Adapter la formulation du béton :**

– en choisissant des ciments à basse teneur en aluminates (ciments de caractéristiques complémentaires, ES) avec ajouts de laitier et à teneur en alcalins modérée (les experts du LCPC recommandent un seuil critique de 3 kg/m³) ;

> ***Nota***
> *L'état actuel des connaissances ne permet pas d'estimer le comportement d'un béton vis-à-vis de l'expansion liée à la réaction sulfatique interne en fonction des teneurs en SO_3 et C_3A du ciment. Il semble confirmé cependant que plus la teneur en alcalin du béton est élevée, plus la température à partir de laquelle il y a un risque de développement de la réaction est basse.*

– en utilisant des additions minérales (laitiers, cendres volantes silico-alumineuses, etc.) ;
– en évitant dans la mesure du possible les granulats siliceux de type quartz ;
– en testant la réactivité du béton par un essai de performance (projet de méthode d'essai LPC n° 59 – réactivité d'une formule béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne – mai 2003).

• **Éviter l'apport extérieur d'eau pendant la vie de l'ouvrage :**

– en adaptant si possible la géométrie et la forme de l'ouvrage (en évitant par exemple, des zones de rétention d'eau) ;
– en prévoyant des systèmes de drainage en périphérie de l'ouvrage ;
– en mettant en œuvre des systèmes d'étanchéité adaptés.

La démarche préventive sera adaptée de celle mise au point pour la prévention des phénomènes d'alcali réaction. Elle consistera à définir les classes d'exposition

auxquelles sera soumis l'ouvrage, les niveaux de risque en fonction de la catégorie d'ouvrage pour en déduire les niveaux de prévention à mettre en œuvre. Les principes de prévention seront basés prioritairement sur la maîtrise de la valeur maximale de la température susceptible d'être atteinte au sein de l'ouvrage.

Exemple d'exigences relatives au traitement thermique et à la cure pour les produits structuraux préfabriqués (NF EN 13369)

Accélération de l'hydratation par traitement thermique

Dans le cas où un traitement thermique à pression atmosphérique est appliqué au béton pendant la fabrication afin d'accélérer son durcissement, il doit être démontré par des essais initiaux que la résistance requise est obtenue pour chaque famille de bétons.

Pour éviter la micro-fissuration et/ou une mauvaise durabilité, les conditions suivantes doivent être remplies à moins qu'une expérience antérieure positive n'ait montré que ces prescriptions ne sont pas nécessaires :
– une période de préchauffage adéquate doit être appliquée lorsque le traitement thermique implique une température maximale moyenne $\overline{T}$ supérieure à 40 °C ;
– quand la température maximale moyenne $\overline{T}$ dépasse 40 °C, les différences de température entre parties adjacentes des éléments doivent être limitées à 20 °C pendant les périodes de montée en température et de refroidissement.

La période de préchauffage et la vitesse de montée en température doivent être documentées.

Pendant le chauffage et le refroidissement, la température maximale moyenne $\overline{T}$ ne doit pas dépasser les valeurs du tableau ci-dessous. Toutefois des températures supérieures peuvent être acceptées sous réserve que la durabilité du béton sous les conditions environnementales prévues ait été démontrée par une expérience positive à long terme.

Conditions pour l'hydratation accélérée

Environnement des produits	***Température maximale moyenne du béton $\overline{T}$ [a]***
À prédominance sec ou modérément humide	$\overline{T} \leq 85°C$[b]
Humide ou alternance d'humidité et de séchage	$\overline{T} \leq 65$ °C.

[a] : $\overline{T}$ est la température maximale moyenne dans le béton, les valeurs individuelles peuvent être supérieures de 5 °C.
[b] : Quand 70 °C < $\overline{T}$ ≤ 85 °C des essais initiaux doivent avoir démontré que la résistance requise est respectée à 90 jours.

Pour les environnements humide ou alternance d'humidité et de séchage, en l'absence d'expérience positive à long terme, la pertinence du traitement à plus haute température doit être démontrée ; les limites suivantes peuvent servir de base pour cette démonstration : pour le béton teneur en $Na_2Oeq \leq 3{,}5$ kg/m^3, pour le ciment : teneur en $SO_3 \leq 3{,}5$ % en masse.

Dans ce cas, selon le matériau et les conditions climatiques, des prescriptions plus sévères peuvent être appliquées au traitement thermique des éléments destinés dans certaines zones à être placés à l'extérieur.

Les limites précédentes sur Na_2Oeq et la teneur en SO_3 peuvent évoluer ou des limites sur d'autres composants peuvent être instituées selon les acquis de l'expérience scientifique ou technique. Il convient que les toutes dernières connaissances soient prises en compte.

Chapitre 7

Durabilité des bétons en site maritime

7.1 - Actions de l'eau de mer sur le béton

7.2 - Principes de prévention

7.3 - Recommandations complémentaires du fascicule de documentation P 18-011

7.1 - Actions de l'eau de mer sur le béton

Un béton exposé en site maritime peut être l'objet de plusieurs types d'agressions :
– agressions mécaniques dues à l'action des vagues et des marées, abrasion due aux chocs des matériaux flottants et érosion due aux effets des vagues ;
– agressions chimiques dues à l'action des chlorures présents dans l'eau de mer (la salinité des mers, des océans et des lacs peut être très variable de quelques grammes par litre à plus de 200 g par litre, la salinité des grands océans est de l'ordre de 35 g/l) et des sulfates ;
– agressions climatiques dues aux variations de température et éventuellement à des phénomènes de gel-dégel.

Les structures situées en site maritime sont exposées à trois types de configurations. Selon les variations du niveau de la mer, elles peuvent être :
– continuellement immergées (béton situé sous le niveau de la mer à marée basse), les bétons situés dans cette zone sont rarement l'objet de dégradations importantes ;
– continuellement émergées et soumises aux embruns et brouillards marins contenant des chlorures, les bétons situés dans cette zone (pour les bétons de structure, la norme NF EN 206-1 étend cette zone jusqu'à 1 km de la côte) peuvent subir de légères agressions ;
– alternativement émergées ou immergées en fonction du niveau de la mer (zones de marnage déterminées par les niveaux de marée haute et basse) ou soumises aux éclaboussures provoquées par les vagues, les bétons situés dans cette zone sont les plus agressés.

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

Le béton en présence d'eau de mer est soumis à plusieurs réactions chimiques faisant intervenir des sulfates, des chlorures et des ions magnésium selon plusieurs mécanismes (cristallisation de sels expansifs, précipitation de composés insolubles, attaques ioniques, dissolution de la portlandite, etc.).

Certaines réactions peuvent avoir des effets bénéfiques sur le béton (telle que par exemple la création d'une couche protectrice ou l'obturation des pores par les précipités), d'autres peuvent générer des phénomènes d'expansion ou de lixiviation. La présence d'ions chlorure peut provoquer des phénomènes de corrosion des armatures, si la compacité du béton et l'enrobage des armatures ne sont pas adaptés aux conditions d'exposition. Les sulfates et les chlorures peuvent réagir sur les composés hydratés du ciment.

Les parties d'ouvrages plus particulièrement exposés aux actions de l'eau de mer sont :
– les piles et culées des ponts situées en zone de marnage ;
– les blocs de défense maritime ;
– les murs de quais.

7.2 - Principes de prévention

Les principes de prévention à mettre en œuvre sont les suivants.

Un béton compact et peu perméable

Le facteur essentiel qui garantit le bon comportement du béton en site maritime est sa compacité. Plus le béton sera compact, plus les agents agressifs auront des difficultés à pénétrer et à circuler dans son réseau poreux. Ce qui suppose une formulation prévoyant un rapport E/C relativement faible (par l'utilisation de super-plastifiants ou d'adjuvants réducteurs d'eau) et une optimisation du squelette granulaire.

Une formulation à base d'un ciment adapté suffisamment dosé

La formulation du béton doit comprendre un ciment de caractéristiques complémentaires PM (Prise Mer), conforme à la norme NF P 15-317 (ciments pour travaux à la mer) ou des ciments à base de laitier (des expériences ont démontré la très bonne résistance à l'eau de mer des ciments contenant plus de 60 % de laitier).

Le respect des valeurs d'enrobage des armatures

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

L'EUROCODE 2 précise pour les structures, les enrobages minimaux à respecter en fonction de la classe d'exposition, du type d'armatures (précontrainte, passive), de la compacité du béton et de la durée de service.

Une mise en œuvre et une cure soignées

Un vibration adéquate et une cure efficace permettent d'obtenir les performances souhaitées et éviter la dessiccation de surface du béton. L'hydratation optimale du ciment permet de réduire la porosité et d'accroître la résistance du béton.

7.3 - Recommandations complémentaires du fascicule de documentation P 18-011

Le fascicule de documentation P 18-011 (juin 1992, en révision) fournit, pour les cas non couverts par d'autres textes de références, des recommandations complémentaires aux exigences de la norme NF EN 206-1 pour les bétons soumis à l'action de l'eau de mer et précise le mode d'action de l'eau de mer sur le béton.

Il recommande des mesures préventives pour la formulation des bétons en milieux marins.

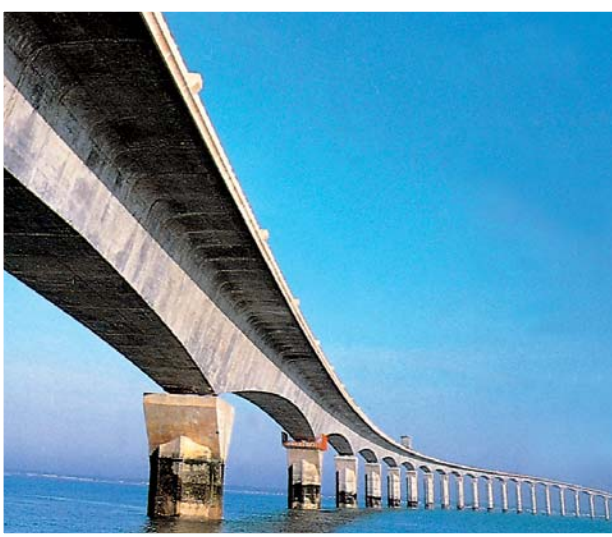


Tableau n° 21 : recommandations du fascicule de documentation P 18-011		
Condition d'exposition	***Immersion complète dans l'eau de mer***	***Zones de marnage et d'aspersion***
Dosage minimal En ciment (kg/m³)	$\frac{700}{\sqrt[5]{D}}$	$\frac{700}{\sqrt[5]{D}}$
E/C	≤ 0,55	≤ 0,50
Type de ciment	CEM I avec C_3A < à 10 % CEM II A et B clinker avec C_3A < à 10 % CEM III A et B ou C CEM V A et B ciments alumineux	CEM I avec C_3A < 5 % CEM III A et B avec laitier > à 60 % CEM III C CEM V A et B ciments alumineux

Chapitre 8

Optimisation de l'enrobage des armatures

8.1 - Incidence de la qualité de l'enrobage

8.2 - Philosophie de l'enrobage selon l'EUROCODE 2

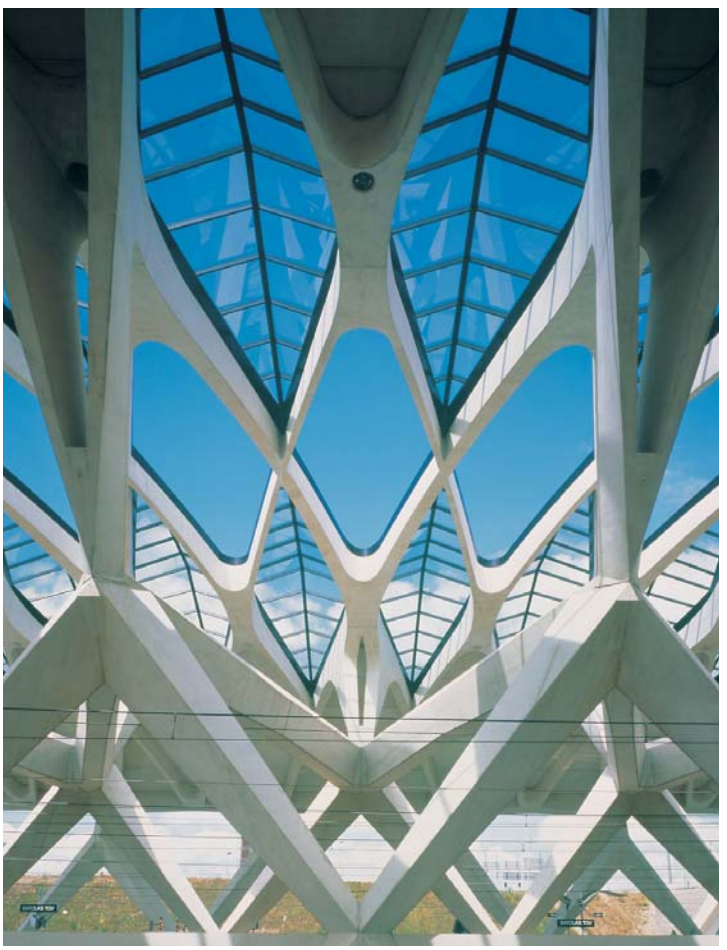
8.3 - Enrobage minimal

8.1 - Incidence de la qualité de l'enrobage

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

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 de service. Ainsi il est possible de placer les armatures hors d'atteinte des agents agressifs en les protégeant par une épaisseur suffisante d'un béton compact.

Dans des conditions normales, les armatures enrobées d'un béton compact et non fissuré sont naturellement protégées des risques de corrosion par un phénomène de passivation qui résulte de la création, à la surface du métal, d'une pellicule protectrice de ferrite Fe_2O_3 CaO (dite de passivation). Cette pellicule est formée par l'action de la chaux libérée par les silicates de calcium sur l'oxyde de fer. La présence de chaux maintient la basicité du milieu entourant les armatures (l'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique de pH élevé de l'ordre de 13). Tant que les armatures se trouvent dans un milieu présentant un pH compris entre 9 et 13,5, elles sont protégées.



Le diagnostic des ouvrages affectés par une détérioration du béton d'enrobage recouvrant les armatures révèle que les dommages sont dus, dans la grande majorité des cas, à une épaisseur d'enrobage trop mince et/ou à un béton d'enrobage trop poreux et pas assez résistant.

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

– la carbonatation du béton par le gaz carbonique de l'air ;

– la pénétration des ions chlorure jusqu'au niveau des armatures.

La plus ou moins grande rapidité d'action de ces divers agents est en relation directe avec la porosité du béton et avec la présence éventuelle de fissures qui favorisent la diffusion des gaz ou des liquides agressifs.

La carbonatation

En présence du dioxyde de carbone de l'air et d'eau, les composés hydratés du ciment se carbonatent selon la réaction :

$$Ca(OH)_2 + CO_2 + H_2O \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O$$

Le gaz carbonique pénètre dans le béton sous forme gazeuse et il réagit avec l'eau présente dans les pores. Il provoque un phénomène dit « de carbonatation » qui peut affecter tous les ouvrages non constamment immergés mais qui n'est pas nocif pour le béton non armé. Dans un premier temps, la carbonatation protège le béton en modifiant la distribution de la taille des pores en colmatant la porosité capillaire de la matrice cimentaire, en diminuant sa perméabilité aux gaz et aux liquides. Dans un second temps, elle a pour conséquence une neutralisation (chute du pH) du milieu de protection des armatures qui peuvent alors s'oxyder. Le milieu basique se trouve progressivement modifié par la neutralisation de l'alcalinité du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 8, n'assurant plus une protection suffisante des armatures et entraînant une dépassivation de l'acier (destruction de la couche de passivation). Cette dépassivation entraîne le développement de réaction d'oxydation à la surface des armatures.

Le front de carbonatation avance progressivement depuis la surface, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur. Il est ralentit par la formation des carbonates qui colmatent partiellement la porosité. La vitesse de progression de la carbonatation diminue donc avec la profondeur atteinte.

L'humidité relative de l'air joue, en particulier, un rôle important sur la vitesse de carbonatation qui, pour les bétons courants, est maximum pour une humidité relative de l'ordre de 60 % et pratiquement nulle en atmosphère sèche ou pour des bétons complètement saturés en eau. Elle est plus faible pour les surfaces exposées à la pluie que pour les surfaces protégées (la vitesse de migration du dioxyde de carbone est dix mille fois plus faible dans l'eau que dans l'air).

La cinétique et la profondeur de carbonatation d'un béton sont donc fonction de sa composition, de sa structure poreuse et de la classe d'exposition dans laquelle est situé l'ouvrage. Elle dépend aussi de la concentration en dioxyde de carbone de l'atmosphère environnant. Des études ont démontré que pour un béton courant, l'épaisseur de la couche carbonatée augmente proportionnellement à la racine carrée du temps.

Paramètres influençant la cinétique de carbonatation

De nombreuses études ont démontré que la migration du dioxyde de carbone à travers la texture poreuse du béton est significativement réduite lorsque la compacité du béton d'enrobage est augmentée. La porosité totale du béton et la distribution de la taille des pores sont les paramètres déterminants pour la diffusivité du dioxyde carbone.

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

La cinétique de carbonatation croît aussi en fonction de la température et de la concentration en dioxyde de carbone. Elle est inversement proportionnelle aux performances mécaniques du béton et est fortement influencée par l'humidité relative.

Action des chlorures

L'action des chlorures est particulière à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton, comme les ouvrages soumis aux sels de déverglaçage ou situés en site maritime (zone de marnage, surfaces soumises aux embruns).

Les ions chlorure peuvent migrer par capillarité à l'intérieur du béton, franchir la zone d'enrobage, atteindre les armatures, attaquer la couche passive (par un mécanisme de piles électro-chimiques), et provoquer des corrosions initialement ponctuelles qui se propagent ensuite à toute la surface de l'acier.

La vitesse de pénétration des chlorures dépend en particulier de la porosité du béton. Elle décroît avec le rapport E/C.

La corrosion des armatures s'amorce dès que la teneur en chlorure au niveau des armatures atteint un certain seuil de dépassivation. Ce seuil est fonction du pH de la solution interstitielle. Il est atteint plus rapidement si le béton est carbonaté. Il est de l'ordre de 0,4 % à 0,5 % du poids du ciment.

Effets de la corrosion

Le développement de la corrosion des armatures peut provoquer des efforts sur le béton d'enrobage. Les oxydes de fer étant plus volumineux que l'acier, ils génèrent des contraintes internes dans le béton qui peuvent être supérieures à sa résistance en traction. Ces contraintes peuvent entrainer une altération de l'aspect extérieur de l'ouvrage (éclatement localisé, apparition en surface de trace de rouille, décollement du béton d'enrobage) et une réduction de la section efficace de l'armature et de son adhérence au béton.

Les enrobages et les caractéristiques des bétons préconisés sont suffisants pour garantir la protection naturelle des aciers durant la durée de service escomptée de l'ouvrage, sous réserve d'une mise en œuvre soignée.

8.2 - Philosophie de l'enrobage selon l'EUROCODE 2

Les recommandations de l'EUROCODE 2 (EN 1992) en matière d'enrobage des bétons de structures sont novatrices. Elles visent, en conformité avec la norme NF EN 206-1, à optimiser de manière pertinente la durabilité des ouvrages. En effet la détermination de la valeur de l'enrobage doit prendre en compte :

– la classe d'exposition dans laquelle se trouve l'ouvrage (ou la partie d'ouvrage) ;
– la durée de service attendue ;
– la classe de résistance du béton ;
– le type de systèmes de contrôles qualité mise en œuvre pour assurer la régularité des performances du béton et la maîtrise du positionnement des armatures ;
– le type d'armatures (précontraintes ou non) et leur nature (acier au carbone, acier inoxydable) et leur éventuelle protection contre la corrosion.

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

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

L'EUROCODE 2 permet aussi de dimensionner l'ouvrage pour une durée de service supérieure en augmentant la valeur de l'enrobage. L'optimisation des performances du béton et de l'enrobage des armatures constitue un facteur de progrès essentiel pour garantir la durabilité des ouvrages.

8.3 - Enrobage minimal

Des dispositions constructives relatives à l'enrobage des aciers doivent être respectées afin de satisfaire aux exigences de durabilité pendant toute la durée de service de l'ouvrage. Un enrobage minimum des armatures permet de satisfaire les exigences de durabilité des ouvrages soumis à des contraintes environnementales.

Pour tous les bétons armés avec des armatures en acier standard qui, pendant la durée de service peuvent être exposés à des risques de corrosion, une solution classique préventive consiste à augmenter l'enrobage et/ou la compacité du béton. Cette augmentation étant proportionnelle aux risques potentiels de corrosion, fonction de la classe d'exposition.

L'enrobage et la compacité ont un impact immédiat sur la période de propagation qui précède l'initiation et le développement de la corrosion des armatures. À titre d'exemple, il est couramment reconnu que l'augmentation de l'enrobage minimal d'une valeur de 10 mm permet d'augmenter la durée du service de l'ouvrage pour passer de 50 ans à 100 ans.

L'EUROCODE 2 prévoit aussi la possibilité de réduire l'enrobage quand la résistance du béton a atteint un niveau spécifié.

L'enrobage minimal est défini dans l'EUROCODE 2, section 4 (article 4.4.1). Il doit satisfaire en particulier aux exigences de bonnes transmissions des forces d'adhérences et aux conditions d'environnement.

Il est donné par la formule :

$$\mathbf{C_{min} = max\ [C_{min,b} / C_{min,dur} + \Delta C_{dur,y} - \Delta C_{durst} - C_{dur,add} / 10\ mm}$$

• Avec $C_{min,b}$: enrobage minimal vis-à-vis des exigences d'adhérence (béton/armature).
Il convient que Cmin ne soit pas inférieur :
– au diamètre de la barre dans le cas d'armature individuelle ;
– au diamètre équivalent dans le cas de paquet d'armatures.
$C_{min,b}$ est majoré de 5 mm si le diamètre du plus gros granulat du béton est supérieur à 32 mm.

• Avec $C_{min,dur}$: enrobage minimal vis-à-vis des conditions d'environnement.
$C_{min,dur}$ tient compte de la classe d'exposition et de la classe liée à la structure (qui dépend de la durée d'utilisation du projet). Sa valeur est donnée dans l'Annexe Nationale à l'EUROCODE 2 reprise dans le tableau n° 22, dans le cas du béton armé (un tableau équivalent concerne le béton précontraint).

• Et :

$\Delta C_{dur,y}$: marge de sécurité (valeur recommandée 0) ;

$\Delta C_{dur,st}$: réduction de l'enrobage minimal dans le cas d'utilisation d'acier inoxydable ;

$\Delta C_{dur,add}$: réduction de l'enrobage minimal dans le cas de protections supplémentaires.

Tableau n° 22 : valeurs de $C_{min,dur}$ en fonction des classes d'expositions (cas du béton armé)

$C_{min,dur}$ mm	Classe d'exposition						
Classe liée à la structure	X0	XC1	XC2 XC3	XC4	XD1 XD2	XD3 XS2	XD3 XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Il existe 6 classes liées à la structure. Les valeurs de $c_{min,dur}$ recommandées pour une durée de service de 50 ans correspondent à la classe S4.

Nota 1

La valeur de l'enrobage peut aussi être réduite, en particulier, si la classe de résistance du béton est supérieure à celle spécifiée par la classe d'exposition ou si l'on maîtrise la qualité de production du béton.

Nota 2

L'enrobage nominal C_{nom} résulte de l'enrobage minimal majoré selon des *règles précisées dans l'article 4.4.1.3 de l'édition nationale de l'EUROCODE 2.*

Nota 3

Ne pas confondre les 6 classes liées à la structure (S1 à S6) avec les 5 classes de consistance du béton frais (S1 à S5) définies dans la norme NF EN 206-1.

Chapitre 9

Annexes

Annexe 1

Principales normes de référence

Annexe 2

Principaux documents de référence

Annexe 3

Tableaux comparatifs entre ancien et nouveau référentiels des principaux textes normatifs

Annexe 1
Principales normes de référence

NF EN 197-1	Ciments – partie 1. Composition, spécifications et critères de conformité des ciments.
NF P 15-317	Liants hydrauliques Ciments pour travaux à la mer.
NF P 15-318	Liants hydrauliques Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint.
XP P 15-319	Liants hydrauliques Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates.
FD P 18-011	Bétons Classifications des environnements agressifs.
NF EN 206-1	Béton – partie 1. Spécifications, performances, production et conformité.
NF EN 13 369	Règles communes pour les produits préfabriqués en béton.
FD P 18-326	Bétons – Zones de gel en France.
XP ENV 13670-1	Exécution des ouvrages en béton – Partie 1.

Annexe 2
Principaux documents de référence

Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction LCPC, juin 1994.

Alcali-réaction du béton – essai d'expansion résiduelle sur béton durci, Projet de méthode d'essai lpc 44, LCPC, 1997.

Recommandation pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel LCPC, décembre 2003.

Guide Technique – Aide à la gestion des ouvrages atteints de réaction de gonflement interne, LCPC, novembre 2003.

Manuel d'identification des réactions de dégradation interne du béton dans les ouvrages d'art, LCPC.

Projet de Méthode d'essai des LPC n° 59 – Réactivité d'une formule de béton vis à vis d'une réaction sulfatique interne – Essai de performance.

Résultats et recommandations du projet national CALIBE – La maîtrise de la qualité des bétons – RGCU/IREX/Presses de l'ENPC.

Bulletin du laboratoire des Ponts et Chaussés 240, septembre-octobre 2002 – Comment se prémunir des réactions sulfatiques des bétons ? Point sur les normes actuelles et quelques recommandations, L. DIVET.

Guide pour l'élaboration du dossier carrières, Document annexe aux recommandations pour la préventions des désordres dus à l'alcali-réaction, LCPC, juin 1994.

Prévention des désordres dus à l'alcali-réaction. Guide pour la rédaction des pièces écrites des marchés, Comité technique alcali-réaction, SETRA, juin 1996.

Essais de granulats – Détermination des alcalins solubles dans l'eau de chaux – Méthode d'essai N° 37, Techniques et méthodes des LPC, LCPC, février 1993.

Guide technique AFGC – Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction – État de l'art et guide pour une mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité, juillet 2004.

Conception et réalisation des ouvrages avec les produits structuraux en béton – Europe la nouvelle donne, Cimbéton G 58.

Annexe 3
Tableaux comparatifs entre ancien et nouveau référentiels des principaux textes normatifs

Produits préfabriqués en usine	
Ancien référentiel	***Nouveau référentiel***
– Normes françaises de produits	– Normes européennes harmonisées de produits
– NF EN 13369 (2001) Règles communes pour les produits préfabriqués en béton	– NF EN 13369 (2004) Règles communes pour les produits préfabriqués en béton
– Cahier des charges FIB Eléments architecturaux + additif de septembre 2002 pour la durabilité au gel-dégel	– Cahier des charges FIB Eléments architecturaux[1] – Certification volontaire QualiF-IB[2]
– Cahier des charges FIB Escalier	– Cahier des charges FIB Escalier – Certification volontaire QualiF-IB
– Cahier des charges FIB référentiel QualiF-IB produits d'environnement	– NF EN 12839 Eléments pour clôtures – Certification volontaire NF
	– NF EN 13198 Mobilier urbain et de jardin – Certification volontaire Qualif-IB
	– Cahier des charges FIB référentiel QualiF-IB produits d'environnement

1. Les cahiers des charges FIB restent tous en vigueur tant que la norme NF EN correspondante n'est pas parue au JORF.
2. La certification volontaire QUALI-IB perdure tant que le marquage CE et la certification volontaire NF ne sont pas en place.

Béton coulé en place	
Ancien référentiel	***Nouveau référentiel***
– XP P 18-305 Béton – Béton prêt à l'emploi	– NF EN 206-1 (2004) Béton – Partie 1 : spécification, performances, production et conformité

Granulats	
Ancien référentiel	***Nouveau référentiel***
– XP P 18-540, Granulats – Définitions, conformité, spécifications.	– NF EN 12620, Granulats pour béton.
– FD P 18-940, Granulats – Guide d'interprétation de la norme XP P 18-540.	– NF EN 13055-1 Granulats légers – Partie 1 : granulats légers pour bétons et mortiers
– Normes françaises pour la caractérisation des granulats : par exemple NF P 18-560 Analyse granulométrique par tamisage	– XP P 18-545, Granulats – Éléments de définition, conformité et codification
	– Série NF EN 933 Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats
	– Série NF EN 1097, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats
	– Série NF EN 1744, Essais relatifs aux propriétés chimiques des granulats
Alcali-réaction :	***Alcali-réaction*** :
– FD P 18-542, Granulats – Critères de qualification des granulats naturels pour béton hydraulique vis-à-vis de l'alcali-réaction.	– FD P 18-542, Granulats — Critères de qualification des granulats naturels pour béton hydraulique vis-à-vis de l'alcali-réaction.
– XP P 18-594, Granulats — Méthodes d'essai de réactivité aux alcalins.	– XP P 18-594, Granulats — Méthodes d'essai de réactivité aux alcalins.
– Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction (LCPC-1994)	– Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction (LCPC-1994)
	– NF P 18-454, Béton — Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction — Essai de performance.

Ciments	
Ancien référentiel	***Nouveau référentiel***
– NF EN 197-1, Ciments – Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.	– NF EN 197-1, Ciments – partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
– NF EN 196-2, Méthodes d'essais des ciments	– NF EN 196-2, Méthodes d'essais des ciments – Partie 2 : analyse chimique des ciments
– NF P 15-314, Liants hydrauliques – Ciment prompt naturel.	– NF P 15-314, Liants hydrauliques – Ciment prompt naturel.
– NF P 15-315, Liants hydrauliques – Ciment alumineux fondu.	– NF P 15-315, Liants hydrauliques – Ciment alumineux fondu.
– FD P 15-316, Liants hydrauliques – Emploi du ciment alumineux fondu en éléments de structure.	– FD P 15-316, Liants hydrauliques – Emploi du ciment alumineux fondu en éléments de structure.
– NF P 15-317, Liants hydrauliques – Ciments pour travaux à la mer.	– NF P 15-317, Liants hydrauliques – Ciments pour travaux à la mer.
– NF P 15-318, Liants hydrauliques – Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint.	– NF P 15-318, Liants hydrauliques – Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint.
– XP P 15-319, Liants hydrauliques – Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates.	– XP P 15-319, Liants hydrauliques – Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates.

Additions	
Ancien référentiel	***Nouveau référentiel***
– NF P 18-501 Additions pour béton hydraulique – Fillers.	– NF EN 450, Cendres volantes pour béton
– NF P 18-502, Additions pour béton hydraulique – Fumées de silice.	– NF P 18-502, Additions pour béton hydraulique – Fumées de silice. Sera remplacée à terme par la norme NF EN 13263-1 Fumée de silice pour béton
– NF P 18-506, Additions pour béton hydraulique – Laitier vitrifié moulu de haut-fourneau.	– NF P 18-506, Additions pour béton hydraulique – Laitier vitrifié moulu de haut-fourneau.
– NF P 18-508, Additions pour béton hydraulique – Additions calcaires – Spécifications et critères de conformité.	– NF P 18-508, Additions pour béton hydraulique – Additions calcaires – Spécifications et critères de conformité.
– NF P 18-509, Additions pour béton hydraulique – Additions siliceuses – Spécifications et critères de conformité.	– NF P 18-509, Additions pour béton hydraulique – Additions siliceuses – Spécifications et critères de conformité.

Fibres	
Ancien référentiel	***Nouveau référentiel***
	– NF EN 14 889-1[(1)] Fibres pour béton – Partie 1 fibres d'acier
	– NF EN 14 889-2[(2)] Fibres pour béton – Partie 2 fibres de polymère

1. En préparation.
2. En préparation.

Adjuvants	
Ancien référentiel	***Nouveau référentiel***
– NF P 18-103 et 353 Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis	– NF EN 934-2 Adjuvants pour béton, mortiers et coulis – Partie 2 : Adjuvants pour béton
– NF P 18-370 Adjuvants – Produits de cure pour bétons et mortiers	– NF EN 934-3 Adjuvants pour béton, mortier et coulis – Partie 3 : Adjuvants pour mortier à maçonner
	– NF P 18-370 Adjuvants – Produits de cure pour bétons et mortiers

Eaux de gâchage	
Ancien référentiel	***Nouveau référentiel***
– XP P 18-303 Eau de gâchage pour béton	– NF EN 1008, Eau de gâchage pour béton

Autres constituants	
Ancien référentiel	***Nouveau référentiel***
	– EN 12878, Pigments de coloration

Essais de caractérisation du béton	
Ancien référentiel	***Nouveau référentiel***
Normes françaises dont: – NF P 18-406 Béton – Essai de compression – NF P 18-407 Béton – Essai de flexion	– Série NF EN 12350, Essai pour béton frais – Série NF EN 12390, Essai pour béton durci – Série NF EN 12504[1] , Essai pour béton dans les structures. – NF EN 13791[2] Évaluation de la résistance en compression dans les structures ou les éléments structuraux.

1. En préparation.
2. En préparation.

Autres textes normatifs sur la durabilité	
Ancien référentiel	***Nouveau référentiel***
– FD P 18-011 (1992) Bétons – Classification des environnements agressifs.	– FD P 18-011[1] Bétons – Classification des environnements agressifs.
– Recommandations spécifiques à l'élaboration des bétons pour les parties d'ouvrage non protégées des intempéries et soumises à l'action du gel. (Groupe de travail Rhône-Alpes-1992)	– Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel (LCPC-2003)
– XP P 18-420, Béton – Essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline.	– XP P 18-420, Béton – Essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline.
– XP P 18-424, Bétons – Essai de gel sur béton durci – Gel dans l'eau – Dégel dans l'eau.	– XP P 18-424, Bétons – Essai de gel sur béton durci – Gel dans l'eau – Dégel dans l'eau.
– XP P 18-425, Bétons – Essai de gel sur béton durci – Gel dans l'air – Dégel dans l'eau.	– XP P 18-425, Bétons – Essai de gel sur béton durci – Gel dans l'air – Dégel dans l'eau. – FD P 18-326 Zones de gel en France.

1 Une nouvelle édition devrait paraître pour prendre en compte les classes d'exposition de la norme NF EN 206-1.

Maquette et réalisation
Amprincipe – Paris
R.C.S. Paris B 389 103 805

Impression : Gibert Clarey

Tous droits
photographiques réservés

Édition, novembre 2004