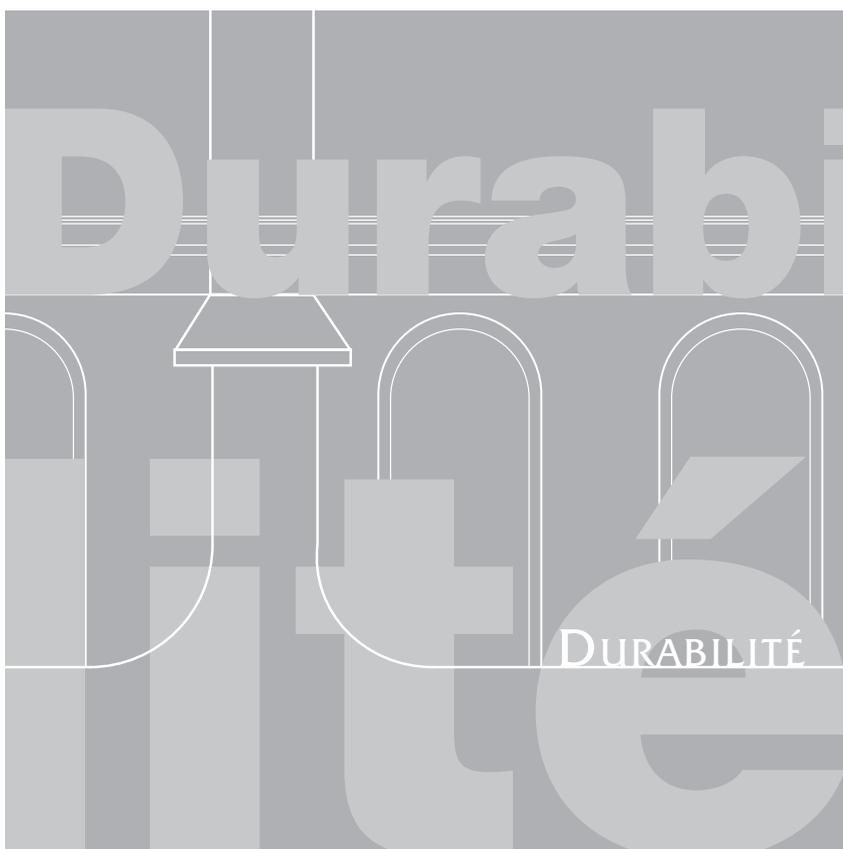


**GUIDE DE PRESCRIPTION DES CIMENTS
POUR DES CONSTRUCTIONS DURABLES**

Cas des bétons coulés en place



Sommaire

● 1 - Notion de durabilité	5
1.1 - Généralités	6
1.2 - Durée d'utilisation de projet	7
<hr/>	
● 2 - Constituants des bétons	9
2.1 - Différents types de ciment	10
2.1.1 - Ciments courants	10
2.1.1.1 - Normalisation, marquage CE et marque NF des ciments courants	10
2.1.1.2 - Constituants des ciments courants	11
2.1.1.3 - Constituants principaux	11
2.1.1.4 - Constituants secondaires	13
2.1.1.5 - Additifs	13
2.1.1.6 - Sulfate de calcium	13
2.1.1.7 - Classes de résistance	13
2.1.1.8 - Exigences physiques	14
2.1.1.9 - Exigences chimiques	14
2.1.1.10 - Types de ciments courants	15
2.1.1.11 - Exemple de désignation d'un ciment courant	16
2.1.1.12 - Ciments courants à caractéristiques complémentaires	17
2.1.2 - Ciments pour travaux à la mer PM	17
2.1.3 - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates ES	18
2.1.4 - Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint CP	18
2.1.5 - Ciment de haut-fourneau à faible résistance à court terme	19
2.1.6 - Ciment sursulfaté	20
2.1.7 - Ciment prompt naturel	20
2.1.8 - Ciment alumineux fondu	20
2.2 - Adjuvants	21
2.2.1 - Définition des adjuvants	21
2.2.2 - Classification des adjuvants	22
2.3 - Eau de gâchage	24
2.4 - Additions	24
2.4.1 - Généralités	24
2.4.2 - Fillers	25
2.4.3 - Fumées de silice	25
2.4.4 - Cendres volantes	25
2.4.5 - Laitiers vitrifiés moulus de haut-fourneau	25
2.5 - Notion de liant équivalent	26
<hr/>	
● 3 - Spécifications des bétons coulés en place	29
3.1 - Présentation générale de la norme NF EN 206-1	30
3.1.1 - Bétons concernés par la norme NF EN 206-1	31
3.1.2 - Exigences spécifiées par la norme NF EN 206-1	31
3.1.3 - Exigences liées aux classes d'exposition	32
3.1.4 - Trois types de béton	32

3.2 - Classification des bétons	33
3.2.1 - Classes de consistance du béton frais	33
3.2.2 - Classes de résistance à la compression du béton durci	33
3.2.3 - Classes de masse volumique	35
3.2.4 - Classes de teneurs en chlorures	36
3.2.5 - Dimension maximale des granulats	36
3.2.6 - Valeurs limites pour le classement des attaques chimiques	37
3.2.7 - Exigences sur les constituants	37
3.2.8 - Valeurs limites spécifiées applicables à la composition et aux propriétés des bétons	38
3.2.9 - Exemple de désignation des bétons	39
3.3 - Marque NF-BPE	40
3.4 - Particularités des bétons coulés en place	41
3.5 - Prise en compte de la durabilité dans le Fascicule 65	42
<hr/>	
● 4 - Prise en compte des actions dues à l'environnement	43
4.1 - Définition des classes d'exposition	44
4.2 - Détermination des classes d'exposition	49
4.3 - Attaques gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage	50
4.4 - Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer	53
4.5 - Corrosion induite par carbonatation	54
4.6 - Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine	55
4.7 - Attaques chimiques	55
4.8 - Combinaison des classes d'exposition	56
<hr/>	
● 5 - Principales agressions et attaques du béton	57
5.1 - Mécanismes de corrosion des armatures dans le béton	58
5.1.1 - Carbonatation	58
5.1.2 - Actions des chlorures	59
5.1.3 - Effets de la corrosion	60
5.2 - Actions de l'eau de mer	61
5.3 - Mécanismes développés par le gel et les sels de déverglaçage ...	62
5.3.1 - Actions des cycles de gel-dégel	63
5.3.2 - Actions des sels de déverglaçage	63
5.3.3 - Rôle du réseau de bulles d'air	64
5.4 - Actions des eaux agressives	65
5.4.1 - Attaques acides	65
5.4.2 - Lixiviation	65
<hr/>	

● 6 - Recommandations pour la maîtrise de la durabilité des bétons	67
6.1 - Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel	68
6.2 - Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction	71
6.2.1 - Phénomène d'alcali-réaction	71
6.2.2 - Recommandations	72
6.3 - Recommandations pour la prévention des désordres liés aux réactions sulfatiques internes	74
6.3.1 - Phénomène de réaction sulfatique interne	74
6.3.2 - Recommandations	76
6.4 - Fascicule de documentation FD P 18-011	82
<hr/>	
● 7 - Nouvelles exigences pour les maîtres d'ouvrage	85
7.1 - Exigences vis-à-vis du développement durable	86
7.2 - Exigences vis-à-vis de la durabilité de l'ouvrage	87
7.2.1 - Durée d'utilisation de projet	88
7.2.2 - Choix de matériaux spécifiques	88
7.2.3 - Détermination des agressions et attaques extérieures auxquelles sera soumis le béton	88
7.2.4 - Prévention vis-à-vis des risques de gonflement du béton	88
7.2.4.1 - Prévention vis-à-vis des risques d'alcali-réaction	89
7.2.4.2 - Prévention vis-à-vis des risques de réaction sulfatique interne	89
7.2.5 - Données climatiques spécifiques au site	89
<hr/>	
● 8 - Exigences à prendre en compte pour le choix du ciment	91
8.1 Exigences à prendre en compte au niveau de la conception	93
8.2 Exigences à prendre en compte au niveau de la réalisation	93



Chapitre

1

Notion de durabilité

1.1 - Généralités

1.2 - Durée d'utilisation de projet

1 - Notion de durabilité

1.1 - Généralités

Un ouvrage doit satisfaire, avec un niveau constant, les besoins des utilisateurs au cours du temps et résister aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...) et aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions induites par le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétisme.

La **durabilité** de l'ouvrage caractérise sa capacité à conserver 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 esthétique dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible (sous réserve de la mise en œuvre d'une maintenance préventive programmée). La durabilité du maintien de ses fonctions doit être assortie d'une durée, temps minimal et raisonnable pour lequel l'ouvrage est conçu qui est appelé la **durée d'utilisation de projet**.

La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, la qualité des matériaux et des produits utilisés, la qualité des dispositions constructives, de la réalisation de l'ouvrage et de la mise en œuvre des produits ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance.

Pour obtenir cette durabilité, les bétons ont été longuement spécifiés en considérant les performances mécaniques requises à 28 jours associées éventuellement à un dosage minimum en ciment. Un béton performant a, en principe, un dosage correct en ciment et une bonne compacité.

Aujourd'hui, la durabilité est appréhendée en considérant un ensemble de propriétés et de performances 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.

Prescrire un béton durable nécessite d'apprécier, dès sa conception, l'ensemble des contraintes environnementales et les agressions et attaques potentielles qu'il aura à subir pendant toute sa durée d'utilisation.

Il est possible désormais de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton, qui sont donc plus complètes et plus précises, en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée d'utilisation souhaitée.

Les connaissances actuelles sur les ciments et les bétons permettent d'optimiser et 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.

Un nouveau contexte normatif et réglementaire encadre désormais l'utilisation du matériau béton. Les normes et les recommandations constituent un ensemble homogène et complet qui permet de prendre en compte, dès la conception, tous les critères de durabilité. Cette évolution s'inscrit dans une logique de progrès visant à optimiser la qualité et les performances des bétons et à maîtriser la durabilité des ouvrages.

Mais quelles que soient les précautions prises pour adapter et optimiser la formulation du béton, l'ouvrage ne pourra assurer sa fonction durablement que si les "règles de l'art" ont été respectées lors de sa fabrication (malaxage efficace adapté à la formulation, respect des tolérances sur les constituants) et de sa mise en œuvre (vibration correcte, cure adaptée, prise en compte des conditions climatiques lors du bétonnage, retraits maîtrisés, respect des valeurs d'enrobage des armatures, etc.).

1.2 - Durée d'utilisation de projet

Les normes de dimensionnement Eurocodes accentuent désormais la prise en compte de la durabilité des ouvrages en s'appuyant sur la notion de durée d'utilisation de projet. (cf norme NF EN 1990 Tableau 2.1 - AN).

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



Chapitre

2

Constituants des bétons

2.1 - Différents types de ciment

2.2 - Adjuvants

2.3 - Eau de gâchage

2.4 - Additions

2.5 - Notion de liant équivalent

2 - Constituants des bétons

2.1 - Différents types de ciments

2.1.1 - Ciments courants

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

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

2.1.1.1 - Normalisation, marquage CE et marque NF des ciments courants

La norme NF EN 197-1 présente les caractéristiques et les spécifications des ciments courants et de leurs constituants. La première partie est descriptive, elle définit les constituants des ciments et les 27 ciments courants. La deuxième partie fixe les classes de résistance, les spécifications mécaniques et physico-chimiques. La troisième partie est consacrée aux critères de conformité, aux fréquences d'essais et aux valeurs limites.

En France, tous les ciments courants bénéficient d'un marquage CE et d'une marque NF.

Les ciments courants doivent être marqués CE depuis le 1er avril 2002 (sur les sacs ou sur les documents d'accompagnement pour le vrac). Ce marquage obligatoire atteste leur conformité à la norme harmonisée EN 197-1 et le respect des exigences essentielles de la Directive des Produits de Construction en matière de santé, sécurité et respect de l'environnement.

La marque de qualité NF, volontaire et complémentaire du marquage CE (certification de niveau 1+), atteste que le ciment (qui la porte) est conforme au niveau de qualité requis par le marché français en fonction des conditions climatiques et environnementales ainsi que des techniques de mise en œuvre pratiquées en France. La marque NF atteste que les ciments bénéficient de garanties complémentaires sur leur composition, leurs performances et leurs contrôles, en particulier :

- des critères de régularité de composition plus stricts ;
- des temps de début de prise plus longs pour les ciments des classes 32,5N/ 32,5R/ 42,5R/ 52,5N/ 52,5R ;
- des résistances à court terme plus élevées pour les ciments (de type CEM I et CEM II) des classes 32,5N/ 32,5R/ 42,5N.

Nota : le règlement de la marque NF-LH (Liants Hydrauliques) définit les conditions d'attribution de la marque par l'AFNOR. Il s'agit d'une certification par tierce partie, s'appuyant sur :

- l'acceptation et le contrôle du système qualité du fabricant ;
- l'autocontrôle du fabricant
- le contrôle extérieur et la vérification de l'autocontrôle.

Nota : l'AFNOR, a confié au Laboratoire d'Essais des Matériaux de la Ville de Paris (LEMVP) les missions de secrétariat technique, de laboratoire de contrôle, et d'organisme d'inspection pour la marque NF-LH.

La certification est réalisée sur la base de la norme EN 197-2 Ciment partie 2 "Evaluation de la conformité". Le droit d'usage de la marque est donné après certification de la conformité à la norme, sur la base d'un référentiel plus contraignant (que le marquage CE) en termes d'exigences et de contrôles.

2.1.1.2 - Constituants des ciments courants

On distingue les constituants principaux (matériau minéral représentant une proportion supérieure à 5 % en masse de la somme de tous les constituants principaux et secondaires) et les constituants secondaires (matériau minéral représentant une proportion inférieure ou égale à 5 % en masse de la somme de tous les constituants principaux et secondaires).

2.1.1.3 - Constituants principaux

• **Clinker Portland (K)**

Le clinker Portland est obtenu par cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile déterminé avec précision et contenant des proportions visées de chaux (CaO), de silice (SiO₂), d'alumine (Al₂O₃) et d'oxyde de fer (F₂O₃). Le clinker entre dans la composition de tous les ciments courants.

• **Laitier granulé de haut-fourneau (S)**

Le laitier granulé de haut-fourneau est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut-fourneau. C'est donc un coproduit de la fabrication de la fonte. Il doit présenter des propriétés hydrauliques latentes (c'est-à-dire qui se manifestent lorsqu'il a subi une activation) pour convenir à son emploi comme constituant du ciment. Il est composé principalement d'oxydes de calcium, de silice et d'alumine.

• **Pouzzolanes naturelles (P) ou naturelles calcinées (Q)**

Les pouzzolanes naturelles sont des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer présentant, soit naturellement (lorsqu'elles sont d'origine volcanique), soit après activation thermique, des propriétés pouzzolaniques. Les pouzzolanes doivent leur nom aux cendres volcaniques de la région de Pouzzoles, en Italie, qui étaient utilisées par les Romains pour la confection de leur liant hydraulique. Les pouzzolanes n'ont pas de propriétés hydrauliques intrinsèques mais, en présence de la chaux libérée par le clinker au cours de son hydratation, elles forment elles aussi des hydrates stables, semblables à ceux qui sont formés à la suite de l'hydratation du clinker.

• **Cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W)**

Les cendres volantes sont des particules pulvérulentes obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de chaudières alimentées au charbon pulvérisé. Elles peuvent être de nature siliceuse (V - propriétés pouzzolaniques) ou calcique (W- propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques).

• **Schistes calcinés (T)**

Les schistes acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques lorsqu'ils sont activés thermiquement. C'est en particulier le cas des schistes houillers brûlés dans les chaudières. Ils ont des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques.

• **Calcaires (L, LL)**

Les calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium - CaCO_3 - supérieure à 75 %. Les calcaires L et LL ont une teneur en carbone organique (TOC maximale) respectivement de 0,5 % et 0,2 % en masse.

• **Fumées de silice (D)**

Les fumées de silice sont des particules très fines (environ $1\mu\text{m}$) qui présentent une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium. Ce sont des particules environ 100 fois plus petites que les grains de ciment.

2.1.1.4 - Constituants secondaires

Les constituants secondaires sont des matériaux minéraux naturels ou des matériaux dérivés du processus de fabrication du clinker ou des constituants définis comme constituants principaux (sauf s'ils sont déjà inclus en tant que constituants principaux du ciment). Ils ne peuvent excéder 5 % du poids total du ciment.

2.1.1.5 - Additifs

Les additifs sont des constituants qui ne figurent pas dans ceux énumérés ci-dessus et qui sont ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés du ciment. La quantité totale des additifs doit être inférieure ou égale à 1 % de la masse de ciment. La proportion des additifs organiques, sous forme d'extrait sec, doit être inférieure ou égale à 0,5 % de la masse de ciment. L'additif le plus courant est l'agent de mouture qui permet d'augmenter le débit des broyeurs.

2.1.1.6 - Sulfate de calcium

Il est ajouté aux autres constituants du ciment pour réguler la prise (de 3 à 5% du poids du ciment). C'est en général du gypse (sulfate de calcium hydraté $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre CaSO_4) ou de l'hémihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$).

2.1.1.7 - Classes de résistance

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance 32,5 - 42,5 - 52,5 définies par la valeur de la résistance du ciment. Cette résistance correspond à la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours sur éprouvettes de mortier conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en MPa.

Tableau n°1 : classes de résistance des ciments courants

Classes de résistance	Résistance à la compression en MPa			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2 jours	7 jours	28 jours	
32.5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5
32.5 R	≥ 10,0	-		
42.5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5
42.5 R	≥ 20,0	-		
52.5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-
52.5 R	≥ 30,0	-		

Pour chaque classe de résistance courante, deux classes de résistance à court terme sont définies, une classe avec résistance à court terme ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec résistance à court terme élevée (indiquée par la lettre R). Pour les ciments de classe de résistance 32,5 et 42,5 une valeur maximale de la résistance à 28 jours est fixée.

2.1.1.8 - Exigences physiques

Les ciments doivent satisfaire à diverses exigences physiques telles que :

- le temps de début de prise
- la stabilité ou expansion

dont les valeurs à respecter sont fonction des classes de résistance.

Suivant les types de ciment, le temps de début de prise doit être supérieur à 45, 60 ou 75 minutes.

L'expansion se mesure suivant un essai normalisé (norme NF EN 196-3) avec les aiguilles de Le Chatelier. Il permet de s'assurer de la stabilité du ciment. L'expansion ne doit pas être supérieure à 10 mm sur pâte pure pour tous les ciments.

Tableau n°2 : temps de début de prise et stabilité des ciments

Classe de résistance	Temps de début de prise (min)	Stabilité (expansion) (mm)
32.5 N	≥ 75	≤ 10
32.5 R		
42.5 N	≥ 60	
42.5 R		
52.5 N	≥ 45	
52.5 R		

2.1.1.9 - Exigences chimiques

Les exigences chimiques sur les ciments sont définies en termes de valeurs caractéristiques. Elles concernent en particulier :

- la perte au feu : < 5 %
- le résidu soluble : < 5 %
- la teneur en ions sulfate (SO_3^{2-}) : ≤ 3,5 % ou 4 % selon la classe de résistance
- la teneur en ions chlorure (Cl^-) : ≤ 0,10 %

2.1.1.10 - Types de ciments courants

La norme NF EN 197-1 définit 27 ciments courants regroupés en cinq types selon leur composition.

- **CEM I : Ciment Portland**
- **CEM II : Ciment Portland composé**
- **CEM III : Ciment de haut-fourneau**
- **CEM IV : Ciment pouzzolanique**
- **CEM V : Ciment composé**

Tableau n°3 : composition des ciments courants

Type de ciment	Nombre de ciments de ce type	Clinker K %	Autres constituants principaux %	Constituants secondaires %
CEM I	1	95 à 100	0	0 à 5
CEM II	19	65 à 94	S/D/P/Q/V/W/T/L/LL : 6 à 35	0 à 5
CEM III	3	5 à 64	S : 36 à 95	0 à 5
CEM IV	2	45 à 89	D/P/Q/V/W : 11 à 55	0 à 5
CEM V	2	20 à 64	S/P/Q/V/W : 36 à 80	0 à 5

Avec :

- | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|
| K : Clinker | V : Cendres volantes siliceuses |
| S : Laitier de haut-fourneau | W : Cendres volantes calciques |
| D : Fumée de silice | T : Schiste calciné |
| P : Pouzzolanes naturelles | L et LL : Calcaire |
| Q : Pouzzolanes naturelles calcinées | |

Liste des 27 ciments courants

Ciment Portland	: CEM I
Ciment Portland au laitier	: CEM II / A – S ; CEM II / B – S
Ciment Portland à la fumée de silice	: CEM II / A – D
Ciment Portland à la pouzzolane	: CEM II / A – P ; CEM II / B – P
	: CEM II / A – Q ; CEM II / B – Q
Ciment Portland aux cendres volantes	: CEM II / A – V ; CEM II / B – V
	: CEM II / A – W ; CEM II / B – W
Ciment Portland aux schistes calcinés	: CEM II / A – T ; CEM II / B – T
Ciment Portland au calcaire	: CEM II / A – L ; CEM II / B – L
	: CEM II / A – LL ; CEM II / B – LL
Ciment Portland composé	: CEM II / A – M ; CEM II / B – M
Ciment de laitier de haut-fourneau	: CEM III/A ; CEM III/B ; CEM III / C
Ciment pouzzolanique	: CEM IV/A ; CEM IV/B
Ciment composé	: CEM V/A ; CEM V / B

Tableau n°4 : valeurs de A, B, C en fonction du type de ciment

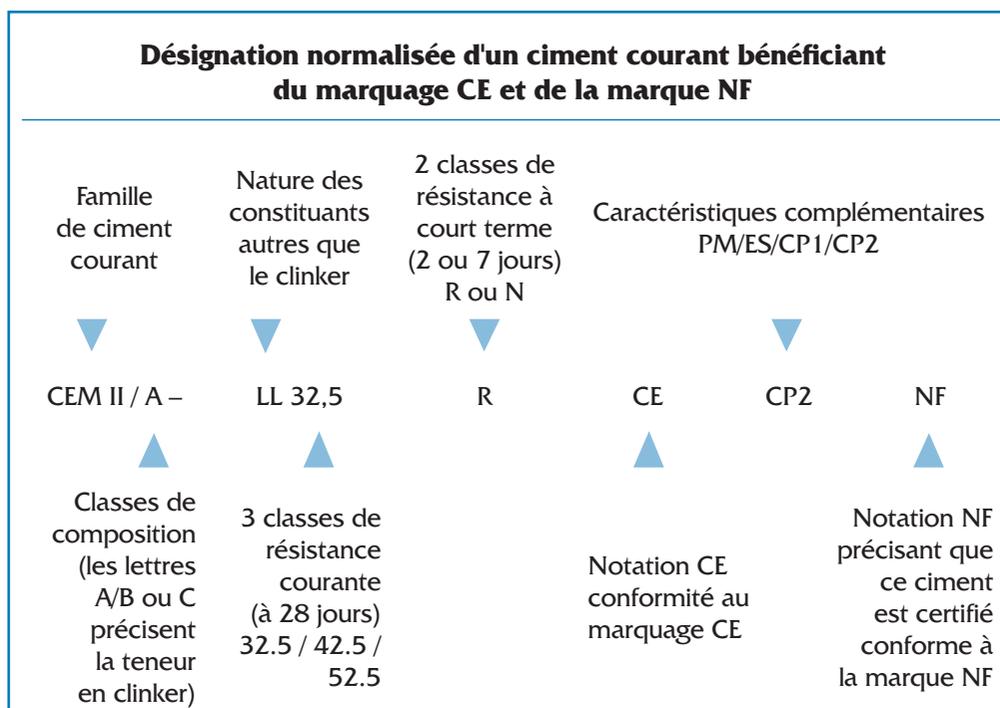
	CEM II	CEM III	CEM IV	CEM V
A	80 à 94 %	35 à 64	65 à 89	40 à 64
B	65 à 79 %	20 à 34	45 à 64	20 à 38
C	/	5 à 19	/	/

Les lettres A, B et C précisent la teneur en clinker.

2.1.1.11 - Exemple de désignation d'un ciment courant

Les ciments courants doivent être identifiés par les lettres CEM suivies du type (I, II, III, IV, V) et par un nombre indiquant la classe de résistance (32,5 ; 42,5). Les lettres N ou R qualifient la résistance à court terme. Les caractéristiques complémentaires éventuelles sont rappelées par les notations PM/ES/CP1/CP2.

La désignation normalisée des ciments figure sur les sacs ou sur les bons de livraison (dans le cas de ciment livré en vrac).



2.1.1.12 - Ciments courants à caractéristiques complémentaires

Des caractéristiques complémentaires peuvent être nécessaires pour certaines classes d'exposition, certaines applications ou certains types d'ouvrages. En effet, tous les ciments n'ont pas la même résistance face aux agressions chimiques liées à l'environnement.

Ces ciments courants à caractéristiques complémentaires font l'objet de normes spécifiques.

Nota : *les ciments courants à caractéristiques complémentaires PM, ES ou CP, portent le marquage CE comme tous les ciments courants, mais celui-ci ne couvre pas les caractéristiques complémentaires qui font l'objet respectivement des normes françaises NF P 15-317, NF P15-319 et NF P 15-318. La conformité à ces normes est attestée par la marque NF.*

2.1.2 - Ciments pour travaux à la mer PM

Ces ciments font l'objet de la norme NF P 15-317 "ciments pour travaux à la mer", qui définit des prescriptions de composition et de caractéristiques physiques et chimiques, complémentaires à la norme NF EN 197-1. Ces ciments présentent des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C3A) qui leur permettent de conférer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence d'ions chlorure, au cours de la prise et ultérieurement.

Les ciments pour travaux à la mer sont :

- des CEM I et des CEM II qui possèdent des caractéristiques physiques adaptées et doivent respecter des spécificités chimiques complémentaires ;
- des CEM III/A (si la teneur en laitier est supérieure à 60%), B ou C et des CEM V/A ou B qui sont naturellement qualifiés pour cet usage ;
- des ciments prompts naturels (CNP) définis par la norme NF P 15-314 et des ciments alumineux fondus (CA) définis par la norme NF EN 14647.

Ces ciments comportent la mention PM (Prise Mer) sur l'emballage ou le bon de livraison.

Nota : *les spécificités des ciments PM portent sur la composition chimique du clinker (limitation du C3A et du C3S pour les CEM I et CEM II...), sur une limitation de la proportion de constituants autres que le clinker (pour les CEM II), des constituants secondaires (3 % pour les CEM I et les CEM II) et d'additifs (0,1 %).*

2.1.3 - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates ES

La norme NF P 15-319 définit les ciments pour les travaux en eaux à haute teneur en sulfates. Elle spécifie des limites de composition ainsi que des caractéristiques physiques et chimiques complémentaires de la norme NF EN 197-1.

Les spécificités de ces ciments portent en particulier sur une limitation de la nature et de la proportion des constituants secondaires et des additifs, ainsi que sur la composition chimique du clinker.

Ces ciments présentent des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C3A) qui leur permettent de conférer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfates au cours de la prise et ultérieurement.

Ces ciments sont :

- des ciments CEM I et des CEM II/A et B qui présentent des caractéristiques complémentaires ;
- des CEM III/A, B ou C et des CEM V/A et B naturellement qualifiés pour cet usage ;
- des ciments alumineux fondus (CA).

Ces ciments comportent la mention ES (Eaux Sulfatées) sur l'emballage et le bon de livraison.

2.1.4 - Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint CP

Ces ciments font l'objet de la norme NF P 15-318. Ce sont des CEM I, CEM II/A et B, CEM III/A et B, CEM IV/ A et B et CEM V/A et B dont la teneur en sulfures est inférieure à une valeur donnée. Ils présentent une hydratation peu exothermique (faible chaleur d'hydratation). La norme prévoit deux classes notées CP1 et CP2 avec des teneurs limites supérieures en ions sulfure.

- Classe CP1 : ions sulfures $S^{2-} < 0.7 \%$
- Classe CP2 : ions sulfures $S^{2-} < 0.2 \%$

Ils sont destinés aux ouvrages réalisés en béton précontraint. Ils comportent la mention CP sur l'emballage ou le bon de livraison.

Les ciments de type CP1 sont destinés à la précontrainte par post-tension, les CP2 à la précontrainte par pré-tension. Ils sont aussi utilisés pour des ouvrages pour lesquels des résistances mécaniques mais aussi une limitation des réactions exothermiques sont souhaitées.

2.1.5 - Ciments de haut-fourneau à faible résistance à court terme

Les ciments de haut-fourneau à faible résistance à court terme sont des liants hydrauliques dont les réactions et le processus d'hydratation sont identiques à ceux des ciments courants. Mais le processus d'hydratation est ralenti à court terme du fait de la composition, la finesse ou la réactivité des constituants. Ces ciments sont conformes à la norme NF EN 197-4 qui fournit les compositions, les spécifications et les critères de conformité, ainsi que les exigences physiques, mécaniques et chimiques de trois ciments et de leurs constituants : CEM III/A, CEM III/B, CEM III/C. Ces ciments sont désignés par la lettre L. On distingue trois classes de résistance 32,5 L, 42,5 L et 52,5 L.

Les 3 types de ciments de haut-fourneau à faible résistance à court terme sont :

- CEM III/A : avec 35 à 64 % de clinker et 36 à 65% de laitier de haut-fourneau
- CEM III/B : avec 20 à 34% de clinker et 66 à 80% de laitier de haut-fourneau
- CEM III/C : avec 5 à 19% de clinker et 81 à 95% de laitier de haut-fourneau

Ces ciments contiennent de 0 à 5 % de constituants secondaires.

Tableau n°5 : classe de résistance des ciments à faible résistance à court terme

Classes de résistance	Résistance à la compression en MPa			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2 jours	7 jours	28 jours	
32,5L	-	> 12	> 32,5	< 52,5
42,5L	-	> 16	> 42,5	< 62,5
52,5L	> 10	-	> 52,5	-

Cette norme définit également les ciments à faible résistance à court terme et à faible chaleur d'hydratation : ce sont les liants, dont la chaleur d'hydratation (quantité de chaleur développée par l'hydratation du ciment en un temps donné) mesurée selon la norme EN 196-8 à 7 jours ou selon la norme EN 196-9 à 41 heures est inférieure à 270 J/g. Ils sont désignés par les lettres LH.

2.1.6 - Ciment sursulfaté

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

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

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

2.1.7 - Ciment prompt naturel

Ce ciment fait l'objet de la norme NF P 15-314. Il résulte de la cuisson à température modérée d'un calcaire argileux de composition régulière extrait de bancs homogènes, suivie d'un broyage très fin.

Ses constituants lui confèrent des propriétés particulières de prise et de durcissement rapides, de quelques minutes à une demi-heure et de résistances aux acides, aux sulfates et à l'eau de mer. Le ciment prompt naturel répond aux spécifications de la norme NF P 15-317 (PM).

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

2.1.8 - Ciment alumineux fondu

Ce ciment fait l'objet de la norme NF EN 14647 "Ciment d'aluminates de calcium - Composition, spécifications et critères de conformité".

Il résulte de la mouture après cuisson jusqu'à la fusion d'un mélange composé principalement d'alumine, de chaux, d'oxydes de fer et de silice.

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

Le dosage généralement recommandé est de 400 kg/m³ (avec un E/C ≤ 0,40), à moduler en fonction des performances visées. La formulation doit être établie en fonction des exigences de résistance mécanique et de durabilité, en tenant compte du phénomène de conversion des hydrates.

2.2 - Adjuvants

2.2.1 - Définition des adjuvants

Un adjuvant est un produit dont l'incorporation à faible dose (inférieure à 5 % de la masse de ciment) aux bétons, mortiers ou coulis lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, provoque des modifications des propriétés du mélange, à l'état frais ou durci.

Les adjuvants font l'objet de la norme NF EN 934, Partie 2 "Adjuvants pour béton, mortier et coulis. Définition - exigences - conformité - marquage et étiquetage."

L'emploi d'un adjuvant ne doit pas altérer les caractéristiques mécaniques, physiques ou chimiques du béton, du mortier ou du coulis, ni les armatures.

Chaque adjuvant est défini par une fonction principale, caractérisée par la ou les modifications majeures qu'il apporte aux propriétés des bétons, des mortiers ou des coulis, à l'état frais ou durci. L'efficacité de la fonction principale de chaque adjuvant peut varier en fonction de son dosage et des autres composants. Un adjuvant présente généralement une ou plusieurs fonctions secondaires qui sont le plus souvent indépendantes de la fonction principale. L'emploi d'un adjuvant peut aussi entraîner des effets secondaires non directement recherchés. Ainsi un adjuvant réducteur d'eau peut avoir une fonction secondaire de retardateur de prise.

Lors de la formulation d'un béton pour une application donnée, le couple ciment/adjuvant doit donc être optimisé pour éviter d'éventuels problèmes de rhéologie et de maniabilité. Certains couples ciment/adjuvant sont sensibles à des variations de dosage ou de température du béton. Dans le cas d'emploi de plusieurs adjuvants, il faut aussi vérifier la compatibilité des adjuvants entre eux. Il est donc indispensable, lors de l'utilisation d'un adjuvant, de s'assurer, par des essais préalables représentatifs des conditions de réalisation du chantier, de son efficacité et de vérifier l'étendue des effets secondaires.

2.2.2 - Classification des adjuvants

La norme NF EN 934-2 classe les adjuvants pour bétons, mortiers et coulis suivant leur fonction principale.

On peut distinguer trois grandes catégories d'adjuvants :

- Ceux qui modifient l'ouvrabilité du béton :
 - Plastifiants
 - Plastifiants-réducteurs d'eau
 - Superplastifiants
- Ceux qui modifient la prise et le durcissement :
 - Accélérateurs de prise
 - Accélérateurs de durcissement
 - Retardateurs de prise
- Ceux qui modifient certaines propriétés particulières :
 - Entraîneurs d'air
 - Hydrofuges de masse
 - Rétenteurs d'eau.

Cette norme fixe les exigences pour les adjuvants utilisés dans les bétons, les mortiers et les coulis, et spécifie les caractéristiques et les critères de conformité.

Elle s'applique aux bétons de consistance normale :

- Non armés
- Armés
- Précontraints
- Prêts à l'emploi
- Préfabriqués
- Fabriqués sur chantier

Elle ne traite pas des dispositions relatives à l'utilisation pratique des adjuvants pour la production du béton.

Définition des 11 types d'adjuvants

Plastifiant réducteur d'eau	Adjuvant qui, sans modifier la consistance, permet de réduire la teneur en eau d'un béton donné ou qui, sans modifier la teneur en eau, en augmente l'affaissement/l'étalement, ou qui produit les deux effets à la fois
Superplastifiant haut réducteur d'eau	Adjuvant qui, sans modifier la consistance, permet de réduire la teneur en eau d'un béton donné ou qui, sans modifier la teneur en eau, en augmente considérablement l'affaissement / l'étalement ou qui produit les deux effets à la fois
Rétenteur d'eau	Adjuvant qui réduit la perte en eau en diminuant le ressuage
Entraîneur d'air	Adjuvant qui permet d'incorporer pendant le malaxage, une quantité contrôlée de fines bulles d'air uniformément réparties et qui subsistent après durcissement
Accélérateur de prise	Adjuvant qui diminue le temps de début de transition du mélange, pour passer de l'état plastique à l'état rigide
Accélérateur de durcissement	Adjuvant qui augmente la vitesse de développement des résistances initiales du béton, avec ou sans modification du temps de prise
Retardateur de prise	Adjuvant qui augmente le temps de début de transition du mélange pour passer de l'état plastique à l'état rigide
Hydrofuge de masse	Adjuvant qui réduit l'absorption capillaire du béton durci
Plastifiant réducteur d'eau retardateur de prise	Adjuvant qui combine les effets d'adjuvant plastifiant /réducteur d'eau (fonction principale) et ceux d'adjuvant retardateur de prise (fonction secondaire)
Superplastifiant haut réducteur d'eau retardateur de prise	Adjuvant qui combine les effets d'adjuvant superplastifiant / haut réducteur d'eau (fonction principale) et ceux d'adjuvant retardateur de prise (fonction secondaire)
Plastifiant réducteur d'eau accélérateur de prise	Adjuvant qui combine les effets d'adjuvant plastifiant / réducteur d'eau (fonction principale) et ceux d'adjuvant accélérateur de prise (fonction secondaire)

2.3 - Eau de gâchage

L'eau de gâchage pour les bétons fait l'objet de la norme NF EN 1008 "eau de gâchage pour bétons : spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton".

Cette norme spécifie les prescriptions pour l'eau convenant à la production du béton conforme à la norme béton NF EN 206-1. Elle présente aussi les différents types d'eau et les méthodes permettant d'apprécier l'aptitude à l'emploi de l'eau.

L'eau ne doit pas contenir de composés risquant d'attaquer le ciment, les granulats ou les armatures. Plusieurs types d'eau peuvent être utilisés pour la fabrication du béton. L'eau potable peut être utilisée sans aucun essai. L'eau récupérée issue de la fabrication du béton (eau de lavage, eau excédentaire...) doit satisfaire à des exigences spécifiques (définie dans l'annexe A de la norme NF EN 1008).

Les eaux d'origine souterraine (nappe phréatique), les eaux de surface et les eaux de rejets industrielles peuvent être utilisées mais doivent être soumises à des essais avant utilisation. Les eaux de mer peuvent être utilisées uniquement pour la fabrication du béton non armé. Dans le cas du béton armé ou précontraint, il faut éviter le gâchage à l'eau de mer en raison des risques de corrosion des armatures. Les eaux usées ne conviennent pas.

2.4 Additions

2.4.1 Généralités

Les additions pour le béton sont définies dans la norme NF EN 206-1. Une addition est un matériau minéral finement divisé et pouvant être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés, ou pour lui conférer des propriétés particulières.

Il existe deux types d'additions :

- les additions quasiment inertes (type I)
- les pouzzolanes ou les additions à caractère hydraulique latent (type II)

Les additions peuvent être utilisées :

- soit en substitution partielle au ciment de type CEM I pour constituer un liant équivalent conformément aux spécifications de la norme NF EN 206-1 ;
- soit incorporées au béton sans substitution du ciment.

Nota : l'utilisation d'additions permet de réduire la teneur en portlandite et donc de conférer au béton un meilleur comportement face à diverses attaques agressives (solutions acides, eaux pures...).

2.4.2 - Fillers

Les fillers sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles. Ils peuvent être d'origine siliceuse (norme NF P 18-509) ou calcaire (norme NF P 18-508). Ces additions calcaires ou siliceuses sont de type I.

2.4.3 - Fumées de silice

Les fumées de silice sont des particules très fines (environ $1\mu\text{m}$) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium.

Elles font l'objet des normes NF P 18-502 et EN 13263-1

Ces normes fixent les spécifications auxquelles doivent satisfaire les fumées de silice destinées à la confection des bétons. Elles s'appliquent aux produits obtenus dans l'électrometallurgie du silicium et de ses alliages, par condensation et filtration des fumées.

Les fumées de silice sont utilisées pour leur rôle correcteur de composition granulaire, pour optimiser la compacité par remplissage des vides du béton en complément des autres composants et pour leurs qualités pouzzolaniques. Les fumées de silice sont des additions de type II. Leur masse volumique absolue est comprise entre 2100 et 2400 kg/m^3 .

Elles sont réparties en deux classes A et B en fonction de caractéristiques physico-chimiques (teneur en CaO, teneur en sulfate, en chlorure et en carbone libre) et physiques (masse volumique absolue et aire massique).

2.4.4 Cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules pulvérulentes obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de chaudières alimentées au charbon pulvérisé. Elles font l'objet des normes NF EN 450-1 et NF P 18-050. Elles sont de type II.

2.4.5 Laitiers vitrifiés moulus de haut-fourneau

Le laitier vitrifié moulu provient du broyage du laitier vitrifié (granulé ou bouleté) coproduit de la fabrication de la fonte, obtenu par trempe du laitier de haut-fourneau en fusion. Il est défini dans la norme NF EN 15167-1. Cette

norme fixe les spécifications des laitiers vitrifiés moulus utilisés comme addition dans le béton et qui sont destinés à modifier certaines de ses propriétés comme : le comportement en milieux agressifs, la porosité. Ces modifications sont fonction du taux d'addition et de la finesse de mouture du laitier.

Le laitier de haut-fourneau est une addition de type II.

Il est caractérisé en particulier par sa surface massique blaine et sa masse volumique absolue (comprise entre 2700 et 3000 kg/m³), son module chimique I (produit de la teneur en chaux par la teneur en alumine) et son indice d'activité.

Nota : L'indice d'activité correspond au rapport entre la résistance à la compression d'un mortier composé de 50% de laitier et 50% de ciment Portland de référence et la résistance du mortier fabriqué avec 100 % du même ciment.

2.5 - Notion de liant équivalent

Un liant équivalent est un liant hydraulique obtenu en mélangeant un ciment de type CEM I et des additions. Ce liant est défini en terme d'équivalence vis-à-vis des résistances mécaniques. L'équivalence dépend de l'addition considérée. Ce concept permet de prendre en compte des additions de type II et certaines additions de type I.

Il s'exprime par la formule : $L_{\text{éq}} = C + kA$

avec :

C : quantité de ciment de type CEM I (42.5N/ 42.5R/52.5N/52.5R) par m³ de béton

A : quantité d'additions normalisées par m³ de béton se substituant partiellement au ciment

k : coefficient d'équivalence qui dépend de l'addition. Il permet de prendre en compte le caractère pouzzolanique ou hydraulique de certaines additions.

k = 1 pour une addition qui a un comportement identique au ciment.

k = 0 pour une addition totalement inerte.

Le coefficient k est défini dans la norme NF EN 206-1, tableau NA 5.2.5.2.2

Tableau n° 6 : valeur de k en fonction du type d'addition

Addition	Valeur de k	Conditions supplémentaires
Cendres volantes	0,6	Si $i_{28} \geq 0,83$ et $i_{90} \geq 0,95$
	0,5	Si $i_{28} \geq 0,80$ et $i_{90} \geq 0,90$
	0,4	Si $i_{28} \geq 0,75$ et $i_{90} \geq 0,85$
Fumées de silice	1 ou 2	/
Laitier vitrifié Moulu de haut-fourneau	0,9	$h_{3/7} \geq 0,7$ $h_{3/28} \geq 0,85$
Additions calcaires	0,25	$i_{28} \geq 0,71$

i_{28} , i_{90} , $h_{3/7}$ et $h_{3/28}$ sont les indices d'activités ou de pouvoir hydraulique des additions.

Le ciment n'est jamais totalement substituable. C'est pourquoi la norme NF EN 206-1 précise dans le tableau NA.F.1 en fonction de chaque classe d'exposition la nature de l'addition admise et la valeur maximale du rapport A/ (A+C).

Si une plus grande quantité d'addition est utilisée, elle n'est pas prise en compte dans le calcul du liant équivalent. Il est possible de remplacer le terme E/C par le terme E/L_{Éq} et de remplacer l'exigence relative au dosage minimal en ciment par la même exigence en l'appliquant au dosage en liant équivalent.

Nota : les additions utilisées en substitution du ciment de type CEM I ne sont admises que pour les classes d'exposition pour lesquelles la nature du ciment n'est pas imposée.



Chapitre

3

Spécifications des bétons coulés en place

- 3.1 - Présentation générale de la norme
NF EN 206-1**
- 3.2 - Classification des bétons**
- 3.3 - Marque NF-BPE**
- 3.4 - Particularités des bétons coulés
en place**
- 3.5 - Prise en compte de la durabilité
dans le fascicule 65**

3 - Spécifications des bétons coulés en place

3.1 - Présentation générale de la norme NF EN 206-1

Les bétons coulés en place, destinés aux bâtiments et ouvrages de génie civil font l'objet de la norme NF EN 206-1 (béton partie 1 : spécifications, performances, production et conformité). Cette norme définit pour les bétons de structures 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). Elle fournit des règles précises concernant la spécification, la production et la livraison.

Elle impose au prescripteur de définir les risques d'agressions et d'attaques auxquels le béton de l'ouvrage ou de chaque partie d'ouvrage va être exposé pendant la durée d'utilisation de la structure afin de prescrire le béton parfaitement adapté.

La norme homologuée NF EN 206-1 publiée par l'AFNOR est d'application effective depuis le 1er janvier 2005. Elle est composée de la norme européenne EN 206-1 et de l'Annexe Nationale Française indispensable pour son utilisation, qui spécifie les dispositions complémentaires à respecter en France en tenant compte des spécificités climatiques et géographiques françaises. Ces dispositions complémentaires sont intégrées au texte de la norme européenne avec l'indice repère NA. Elle s'applique lorsque le lieu d'utilisation du béton est situé en France.

Nota : la norme NF EN 206-1 est accompagnée d'une vingtaine de normes d'essais sur les bétons (séries de norme NF EN 12350 pour les bétons frais et NF EN 12390 pour les bétons durcis) et sur les constituants : granulats pour béton NF EN 12620 et XP P 18-545, ciments courants NF EN 197-1, adjuvants pour bétons NF EN 934-2, laitier de haut-fourneau NF P 18-506, cendres volantes pour béton NF EN 450, fumées de silice NF P 18-502 eau de gâchage NF EN 1008 et ciments avec caractéristiques complémentaires NF P 15-317 et NF P 15-319.

Le respect de la norme NF EN 206-1 est exigé par les textes concernant l'exécution des ouvrages et des structures en béton, en particulier le fascicule 65 pour le Génie civil et le DTU 21 (norme NF P 18-201) pour le bâtiment.

Elle prend en compte la notion de durabilité en s'appuyant sur la notion de classe d'exposition. Elle permet, par une combinaison de classes d'exposition, de définir avec précision l'environnement de chaque partie d'ouvrage. Elle spécifie, en termes de composition et de performance, des formules de béton adaptées pour chaque classe d'exposition et fournit les critères de conformité et les règles pour l'évaluation de la conformité.

3.1.1 - Bétons concernés par la norme NF EN 206-1

Le domaine d'application de la norme NF EN 206-1 comprend les bétons destinés aux structures ou éléments de structures de bâtiments et d'ouvrages de génie civil.

La norme NF EN 206-1 couvre :

- les bétons dont l'air occlus (autre que l'air entraîné) est négligeable ;
- les bétons de masse volumique normale (comprise entre 2 000 et 2 600 kg/m³) ;
- les bétons lourds (masse volumique supérieure à 2 600 kg/m³) ;
- les bétons légers (masse volumique comprise entre 800 et 2 000 kg/m³).

Elle ne concerne pas les bétons non structuraux et les bétons particuliers tels que les bétons de tranchée, de remplissage, de calage, de propreté...

Nota : des exigences complémentaires peuvent être données dans d'autres normes européennes spécifiques pour les bétons de fibres, les bétons destinés aux routes et aux aires de circulation, les bétons dont le D_{max} est inférieur 4 mm (mortier), les bétons projetés, les bétons pour stockage de déchets liquides et gazeux, les bétons pour réservoirs de stockage de produits polluants, les bétons pour des structures massives (barrages...), les bétons prémélangés à sec...

3.1.2 - 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.

3.1.3 - Exigences liées aux classes d'exposition

La résistance du béton aux diverses conditions environnementales auxquelles il est soumis pendant la durée d'utilisation 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 ;
 - 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.

Les exigences de durabilité du béton doivent prendre en compte la durée d'utilisation prévue des structures de 50 ans pour les bâtiments et 100 ans pour les ouvrages d'art, dans des conditions d'entretien optimales.

3.1.4 - Trois types de béton

La norme NF EN 206-1 décline trois types de béton.

- **Béton à Propriétés Spécifiées (BPS)**

Béton pour lequel les propriétés requises et les caractéristiques supplémentaires sont spécifiées par le prescripteur au producteur. Le producteur 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 par le prescripteur au producteur. Le producteur est responsable de fournir un béton respectant cette composition. Les contrôles sur les performances atteintes ne sont pas de sa responsabilité. La responsabilité du prescripteur est de réaliser une étude de formulation et d'établir la composition détaillée du béton qu'il doit communiquer au producteur.

- **Béton à Composition Prescrite dans une norme**

En France, l'un des exemples est la norme NF P 18-201 - DTU 21 qui spécifie des compositions de béton pour des applications particulières (ouvrages de catégorie A - dans l'article 4.5.3). Le prescripteur a la responsabilité dans ce cas de sélectionner, dans la norme, la composition appropriée à l'ouvrage.

3.2 - Classification des Bétons

La norme NF EN 206-1 définit des spécifications sur les bétons à l'état frais et à l'état durci.

3.2.1 - 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°7 : 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

Nota : la mesure de l'affaissement est réalisée à l'aide du cône d'Abrams.

3.2.2 - Classes de résistance à la compression du béton durci

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 ($\varnothing = 150 \text{ mm} - H = 300 \text{ mm}$ / $\varnothing = 160 \text{ mm} - H = 320 \text{ mm}$ / $\varnothing = 110 \text{ mm} - H = 220 \text{ mm}$).
- **fck-cube :**
résistance caractéristique (fractile 5 %) en compression du béton déterminée par essais sur éprouvettes cubiques (côté : 100 ou 150 mm).

La norme NF EN 206-1 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.

Elle définit respectivement seize classes de résistance pour les bétons de masse volumique normale et les bétons lourds de C 8/10 à C 100/115 et quatorze classes pour les bétons légers de LC 8/9 à LC 80/88.

Nota : la classe de résistance C 30/37 correspond à une résistance caractéristique de 30 N/mm² sur cylindre et 37 N/mm² sur cube.

Tableau n°8 : classes de résistance à la compression pour les bétons de masse volumique normale et les bétons lourds

Classe	fck-cyl (en N/mm ²)	fck-cube (en N/mm ²)
C 8/10	8	10
C12/15	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°9 : classes de résistance à la compression pour les bétons légers

Classe	fck-cyl (en N/mm ²)	fck-cube (en N/mm ²)
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

3.2.3 - Classes de masse volumique

La norme NF EN 206-1 couvre les bétons de masse volumique normale (2 000 à 2 600 kg/m³), les bétons lourds (masse volumique supérieure à 2 600 kg/m³) et les bétons légers (masse volumique comprise entre 800 et 2 000 kg/m³).

Les bétons légers sont classés selon 6 plages de masse volumique.

Tableau n°10 : type de béton en fonction de sa masse volumique

Béton	Masse volumique (en kg/m ³)
Béton léger	de 800 à 2000
Béton de masse volumique normale	de 2000 à 2600
Béton lourd	supérieure à 2600

Tableau n°11 : classification de la masse volumique des bétons légers

Classe de masse volumique	D 1,0	D 1,2	D 1,4	D 1,6	D 1,8	D 2,0
Plages de masse volumique en kg/m ³	≥ 800 et ≤ 1000	> 1000 et ≤ 1200	> 1200 et ≤ 1400	> 1400 et ≤ 1600	> 1600 et ≤ 1800	> 1800 et ≤ 2000

3.2.4 - Classes de teneurs en chlorures

La norme NF EN 206-1 définit (article 5.2.7 et NA 5.2.7) les teneurs maximales en ions chlorures du béton à respecter en fonction de son type d'utilisation. Elle définit quatre classes de teneur : CI 1,0 / CI 0,4 / CI 0,2 / CI 0,1. Une cinquième classe a été introduite dans l'annexe nationale de la norme NF EN 206-1 : la classe CI 0,65.

Les classes de chlorures permettent d'adapter la composition du béton en fonction des risques de corrosion des armatures.

Tableau n°12 : classes de chlorures

Classe de chlorures	CI 1,0	CI 0,65	CI 0,40	CI 0,20	CI 0,10
Teneur maximale (en CI-)	1 %	0,65 %	0,4 %	0,2 %	0,1 %

Nota : 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°13 : classes 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	CI 1,0
Béton contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées et formulées avec un ciment de type CEM III	CI 0,65
Béton contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées	CI 0,40
Béton contenant des armatures de précontrainte en acier	CI 0,20

3.2.5 - Dimension maximale des granulats

La classification du béton est fonction de la dimension maximale des granulats : dimension nominale supérieure du plus gros granulat présent dans le béton (Dmax).

3.2.6 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°14 : valeurs limites pour les attaques chimiques des eaux de surface et souterraines

Caractéristiques chimiques	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

Tableau n°15 : valeurs limites pour les attaques chimiques des sols naturels

Caractéristiques chimiques	Classe d'exposition		
	XA1	XA2	XA3
SO ₄ ²⁻ en mg/l	2000 à 3000	3000 à 12 000	12 000 à 24 000
Acidité en ml/kg	Supérieur à 200 Baumann Gully	N'est pas rencontré dans la pratique	

Pour ces classes d'exposition, l'annexe nationale de la norme NF EN 206-1 renvoie au fascicule de documentation FD P 18-011 qui fournit des recommandations complémentaires, notamment pour le choix de ciments.

Nota : le choix de la classe se fait par rapport à la caractéristique chimique conduisant à l'agression la plus élevée.

3.2.7 - Exigences sur les constituants

Choix du ciment

Le choix du ciment doit prendre en considération :

- les contraintes d'exécution de l'ouvrage,
- l'utilisation finale du béton,
- les conditions de cure,
- les dimensions de la structure (développement de chaleur lors de l'hydratation du ciment),
- les agressions environnementales auxquelles la structure est exposée,
- la réactivité potentielle des granulats aux alcalins des constituants.

Choix des granulats

Le type, la dimension et les catégories de granulats doivent être sélectionnés en tenant compte :

- des contraintes d'exécution de l'ouvrage,
- de l'utilisation finale du béton,
- des conditions environnementales auxquelles sera soumis le béton,
- de toutes les exigences liées aux traitements de surface appliqués au béton frais ou durci,

Le maximum de la dimension nominale supérieure des granulats (D_{max}) est sélectionné en prenant en compte la valeur d'enrobage, la géométrie des sections et les dispositions constructives des armatures.

3.2.8 - Valeurs limites spécifiées applicables à la composition et aux propriétés des bétons

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

L'Annexe Nationale française de la norme NF EN 206-1 définit des valeurs limites spécifiées relatives à la composition et aux propriétés du béton applicables en France en fonction de chaque classe d'exposition dans deux tableaux (NA.F.1 et NA.F.2).

Ces tableaux précisent en fonction de chaque classe d'exposition :

- le rapport Eau efficace / liant équivalent maximal,
- la classe de résistance minimale du béton,
- la teneur minimale en air (le cas échéant).

Ils comportent d'autres exigences, en particulier sur les additions et la nature des ciments à utiliser.

Le tableau NA.F.1 concerne les bétons coulés en place. Il précise aussi la teneur minimale en liant équivalent. Le tableau NA.F.2, relatif aux produits préfabriqués en béton en usine introduit l'absorption d'eau maximale du béton en tant qu'indicateur de la compacité du béton. Ces tableaux précisent aussi les quantités maximales autorisées pour chaque addition (cendres volantes, fumées de silice, laitier moulu, addition calcaire et siliceuse).

Tableau n°16 : valeurs limites spécifiées applicables en France à la composition et aux propriétés du béton (extrait du tableau NA.F.1 de la norme NF EN 206-1)

Classes d'exposition		Rapport $E_{eff}/Liant_{eq}$ maximal	Classe de résistance minimale	Teneur minimale en Liant _{eq} (kg/m ³)	Teneur minimale en air (%)	
Aucun risque de corrosion ou d'attaque		X0	-	150	-	
Carbonatation		XC1	0,65	C20/25	260	-
		XC2	0,65	C20/25	260	-
		XC3	0,60	C25/30	280	-
		XC4	0,60	C25/30	280	-
Corrosion induite par les chlorures	Eau de mer	XS1	0,55	C30/37	330	-
		XS2	0,55	C30/37	330	-
		XS3	0,50	C35/45	350	-
	Origine autre que marine	XD1	0,60	C25/30	280	-
		XD2	0,55	C30/37	330	-
		XD3	0,50	C35/45	350	-
Attaques gel/dégel		XF1	0,60	C25/30	280	-
		XF2	0,55	C25/30	300	4,0
		XF3	0,55	C30/37	315	4,0
		XF4	0,45	C30/37	340	4,0
Attaques chimiques		XA1	0,55	C30/37	330	-
		XA2	0,50	C35/45	350	-
		XA3	0,45	C40/50	385	-

Nota : en France, certaines classes d'exposition correspondent à des spécifications identiques (XC2 et XC1/XC3 et XF1/XC4 et XF1/XS1 et XS2/XD1 et XF1).

3.2.9 - Exemple de désignation des bétons

La commande d'un béton coulé en place, BPS ou BCP, doit impérativement comporter les informations spécifiées dans l'article 6 de la norme.

> Bétons à Propriétés Spécifiées (BPS)

BPS NF EN 206-1 C 30/37 XC1 (F) Dmax 22,4 S2 CI 0,65

Cette désignation reprend dans l'ordre :

- Le type de béton : BPS
- La conformité à la norme : NF EN 206-1
 - La classe de résistance à la compression : C 30/37
 - La classe d'exposition : XC1 (F)

- La dimension maximale des granulats : D_{\max} 22,4
- La classe de consistance : S 2
- La classe de teneur en chlorure : C1 0,65

La désignation peut aussi comprendre le type et la classe de ciment si celle-ci est spécifiée, conformément à la norme NF EN 197-1, soit par exemple CEM III/B 32,5 N CE PM ES NF.

Des caractéristiques complémentaires peuvent le cas échéant être demandées en plus des spécifications de base, avec des niveaux de performances contrôlées suivant des méthodes d'essais définies.

Nota : en France, la spécification de la classe d'exposition doit être suivie du sigle F (l'Annexe Nationale a adapté les classes d'exposition définies dans la norme EN 206-1 au contexte climatique et géographique français).

Un même béton peut être soumis à plusieurs classes d'exposition différentes. Dans ce cas, le béton doit respecter la sélection des plus sévères exigences définies pour chaque classe.

> Bétons à Composition Prescrite (BCP)

Les informations minimales pour définir les BCP sont :

- la référence à la norme NF EN 206-1,
- le dosage en ciment,
- le type et la classe de résistance du ciment,
- le rapport E/C ou la consistance du béton,
- la dimension maximale nominale des granulats ainsi que leur type, leur catégorie et leur teneur maximale en chlorures,
- le cas échéant, le type, la quantité et l'origine des adjuvants et des additifs.

3.3 - Marque NF - BPE

La certification NF-Béton Prêt à l'Emploi de conformité aux normes est matérialisée par la marque NF délivrée par AFAQ AFNOR Certification. Cette marque apporte la garantie :

- que le producteur met en place un système d'assurance qualité et vérifie par des essais sur les constituants et sur les bétons, le respect des caractéristiques normalisées ;
- que le système d'assurance qualité du producteur ainsi que son auto contrôle sont vérifiés.

La marque NF-Béton Prêt à l'Emploi est une marque de qualité volontaire, créée le 27 janvier 1967. Elle atteste de la conformité des produits aux normes, sur la base d'un référentiel de certification qui a été révisé pour intégrer les évolutions liées à la norme NF EN 206-1.

Nota : le Béton Prêt à l'Emploi est fabriqué par du personnel qualifié dans des installations fixes performantes. Les centrales à béton sont de véritables unités de production industrielle.

Sur les 1 700 centrales de Béton Prêt à l'Emploi existant en 2008, les 2/3 environ sont certifiés NF BPE.

Lors des audits périodiques, les vérifications permettent de donner à l'utilisateur du béton et au client final, l'assurance de la qualité et de la conformité du béton :

- sur l'application effective des procédures définies dans les documents qualité ;
- sur l'aptitude à confectionner un béton conforme aux exigences normatives.

Nota : la norme NF EN 206-1 décrit très précisément la nature et la fréquence des contrôles, et les critères de conformité, selon que la production fasse l'objet ou non d'une certification.

3.4 - Particularités des bétons coulés en place

La démarche pour définir les spécifications des bétons consiste à décomposer l'ouvrage en parties d'ouvrage et, pour chaque partie d'ouvrage, à déterminer la combinaison des classes d'exposition auxquelles elle est soumise. A chaque partie d'ouvrage est associée un Béton à Propriétés Spécifiées (BPS) satisfaisant aux exigences de la combinaison des classes d'exposition auxquelles elle est soumise pendant sa durée d'utilisation.

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

> Exemple de parties d'ouvrage

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

> Localisation des différentes parties d'ouvrage

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

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

3.5 - Prise en compte de la durabilité dans le fascicule 65

Le fascicule 65 précise (Chapitre 8, article 81.22) :
 "Sauf dispositions différentes du marché, les spécifications destinées à assurer la durabilité du béton sont celles données dans la norme de référence, complétées par les spécifications suivantes".

Tableau n°17 : extrait des spécifications complémentaires du Fascicule 65

Classes d'exposition		XC1	XC4	XF3	XF3	XF4
		XC2	XS1-XS2		XS3	
		XC3	XD1-XD2	XA2		
		XF1-XF2		XA1		
E_{EFF} / Liant équivalent maximal		0.55	0.50	0.50	0.45	0.45
Classe de résistance minimale	BA	C25/30	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45
	BP	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C35/45
Teneur minimale en liant équivalent (kg/m³)		280	330	385	350	385

Nota : BA = Béton Armé, BP = Béton Précontraint

Pour les bétons relevant de la classe d'exposition XF3 ou XF4, il est autorisé de réduire les dosages en liant équivalent en dessous de 385 kg/m³, dans la limite de 350 kg/m³ pour la classe XF3 et de 370 kg/m³ pour la classe XF4, sous réserve de justifier de la résistance au gel interne.

Sauf disposition différente du marché, pour les bétons soumis aux classes d'exposition XF2 et XF4, le ciment utilisé doit avoir le caractère PM ou ES. Il en est de même en classe d'exposition XD, si l'agression par les chlorures provient de sels de déverglaçage ou d'agents agressifs contenant des sulfates.

Pour les bétons ne relevant pas des classes XF3, XF4 ou XA, il est autorisé de modifier les spécifications relatives au dosage en liant équivalent sous réserve de justifier, par une approche performantielle validée, la durabilité du béton.

Pour la classe d'exposition XA3, le prescripteur réalise une étude spécifique prenant en compte l'agressivité du milieu, sur la base des données fournies par le maître d'ouvrage.

Prise en compte des actions dues à l'environnement

- 4.1 - Définition des classes d'exposition**
- 4.2 - Détermination des classes d'exposition**
- 4.3 - Attaques gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage**
- 4.4 - Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer**
- 4.5 - Corrosion induite par carbonatation**
- 4.6 - Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine**
- 4.7 - Attaques chimiques**
- 4.8 - Combinaisons des classes d'exposition**
- 4.9 - Incidence des classes d'exposition sur les seuils d'ouverture des fissures**

4 - Prise en compte des actions dues à l'environnement

4.1 - Définition des classes d'exposition

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

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

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

Le choix des classes d'exposition de chaque partie d'ouvrage est de la responsabilité du prescripteur.

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

La norme décrit, pour chaque classe d'exposition, le type de béton concerné (tableau n°19), l'environnement (tableau n°20) et donne à titre informatif des exemples d'ouvrages ou de parties d'ouvrages (tableau n°21).

Tableau n°18 : définition des classes d'exposition en fonction des risques de corrosion et d'attaque

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

Nota : Actions dues à l'environnement = 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.

A chaque classe d'exposition correspondent des spécifications sur la composition des bétons et la classe de résistance sous forme d'exigences minimales à respecter. Les spécifications concernent en particulier la nature et le dosage minimal en ciment, la valeur maximale du rapport Eau/Liant^{équivalent}, la classe de résistance du béton, la teneur maximale en chlorures ainsi que la valeur de l'enrobage des armatures.

La précision des données permettant la détermination des classes d'exposition est fondamentale pour chaque ouvrage. Le marché doit donc préciser toutes les données caractérisant l'environnement dans lequel sont situées les parties de l'ouvrage ainsi que les classes d'exposition.

Nota : Les classes d'exposition prennent notamment en compte l'humidité relative du milieu et les éventuels cycles d'humidification séchage.

Nota : la classe XO ne concerne que les bétons non armés ou faiblement armés avec un enrobage d'au moins 5 cm, à condition qu'ils ne soient soumis ni au gel, ni à l'abrasion, ni à des attaques chimiques.

Tableau n°19 : exemples de type de béton concerné pour chaque classe d'exposition

Classe d'exposition	Béton concerné
XO	Béton non armé ou béton armé en environnement très sec.
XC	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées exposé à l'air et à l'humidité.
XD	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.
XS	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.
XF	Béton soumis à une attaque significative due à des cycles gel/dégel alors qu'il est mouillé.
XA	Béton exposé aux attaques chimiques se produisant dans les sols naturels, les eaux de surface et/ou les eaux souterraines.

Tableau n°20 : description de l'environnement correspondant à chaque classe d'exposition

Classe d'exposition	Description de l'environnement
XC1	Sec ou humide en permanence
XC2	Humide, rarement sec
XC3	Humidité modérée
XC4	Alternance d'humidité et de séchage
XD1	Humidité modérée
XD2	Humide, rarement sec
XD3	Alternance d'humidité et de séchage
XS1	Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer
XS2	Immergé en permanence
XS3	Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns
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
XA1	Environnement à faible agressivité chimique
XA2	Environnement d'agressivité chimique modérée
XA3	Environnement à forte agressivité chimique

**Tableau n°21 : exemples informatifs d'ouvrages
ou de parties d'ouvrages correspondant à chaque classe d'exposition**

Classe d'exposition	Exemples informatifs
X0	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est très faible.
XC1	Béton de structures couvertes, closes ou non, à l'abri de la pluie sans condensation. Béton submergé en permanence dans l'eau.
XC2	Surfaces de béton soumises au contact à long terme de l'eau. Un grand nombre de fondation.
XC3	Béton de structures couvertes, closes ou non, à l'abri de la pluie avec condensation. Béton extérieur abrité de la pluie.
XC4	Béton extérieur exposé à la pluie (y compris les retours de ces parties sur plusieurs dizaines de centimètres). Ponts.
XD1	Surfaces de béton exposées à des chlorures transportés par voie aérienne.
XD2	Piscines. Éléments en béton exposés à des eaux industrielles contenant des chlorures.
XD3	Éléments de ponts exposés à des projections contenant des chlorures. Chaussées. Parties (par exemple, les parties supérieures des dalles et rampes) de parcs de stationnement de véhicules exposées directement aux sels et ne comportant pas de revêtement.
XS1	Éléments de structures exposés aux sels marins et situés de 500 m à 5 km de la côte, sauf topologie particulière.
XS2	Éléments de structures marines immergés.
XS3	Éléments de structures situés de 0 à 500 m de la côte.
XF1	Surfaces verticales de béton exposées à la pluie et au gel.
XF2	Surfaces verticales de béton des ouvrages routiers exposés au gel et à l'air véhiculant des agents de déverglaçage.
XF3	Surfaces horizontales de béton exposées à la pluie et au gel.
XF4	Routes et tabliers de pont exposés aux agents de déverglaçage. Surfaces de béton verticales directement exposées aux projections d'agents de déverglaçage et au gel. Zones des structures marines soumises aux projections et exposées au gel.
XA1	Éléments de structures en contact avec le sol ou un liquide agressif. Ouvrages de génie civil soumis à attaque chimique.
XA2	
XA3	

Nota :

- L'EUROCODE 2 définit pour les ouvrages structuraux des dispositions constructives et des spécifications pour le dimensionnement (valeur minimale et nominale des enrobages, valeur limite d'ouverture des fissures, etc.) en fonction de chaque classe d'exposition.
- Les quatre classes d'exposition aux attaques gel / dégel sont définies dans une carte des zones de gel en France (Figure NA.2 de l'Annexe Nationale Française de la norme NF EN 206-1) avec :

XF1 : gel faible ou modéré sans agent de déverglaçage

XF2 : gel faible ou modéré avec agent de déverglaçage

XF3 : gel sévère sans agent de déverglaçage

XF4 : gel sévère avec agent de déverglaçage

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

- Les parties de bâtiment à l'abri de la pluie, clos ou non, sont XC1 à l'exception des parties exposées à des condensations importantes à la fois par leur fréquence et leur durée qui sont alors à classer en XC3. C'est le cas notamment de certaines parties d'ouvrages industriels, de locaux de piscine...
- Les parties aériennes des ouvrages d'art et les parties extérieures des bâtiments non protégées de la pluie (façades, pignons, parties saillantes à l'extérieur) sont à classer en XC4, y compris les retours de ces parties concernées par les cheminements et/ou les rejaillissements de l'eau.
- Ne sont à classer en XD3 que les parties d'ouvrages soumises à des projections fréquentes et très fréquentes et contenant des chlorures et sous réserve d'absence de revêtement d'étanchéité assurant la protection du béton par exemple les parties supérieures des dalles et les rampes des parcs de stationnement, sans protection du béton.
- En France les classes d'exposition XF1 à XF4 sont indiquées dans la carte donnant les zones de gel, sauf spécification particulière notamment fondée sur l'état de saturation du béton.
- Les risques de lixiviation et d'attaque par condensation de l'eau pure sont à traiter dans les classes d'exposition XA1, XA2 et XA3 suivant leur sévérité.

Nota : la norme NF EN 1992-2 : Ponts en béton, précise :

- que pour une surface en béton protégée par une étanchéité, la classe d'exposition recommandée est XC3,
- qu'en cas d'utilisation de sels de déverglaçage, il faut considérer que toutes les surfaces de béton situées à 6 mètres de la chaussée dans le sens horizontal et à 6 mètres dans le sens vertical sont exposées à l'action des sels.

4.2 - Détermination des classes d'exposition

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

Etape 1 : prise en compte des conditions climatiques,

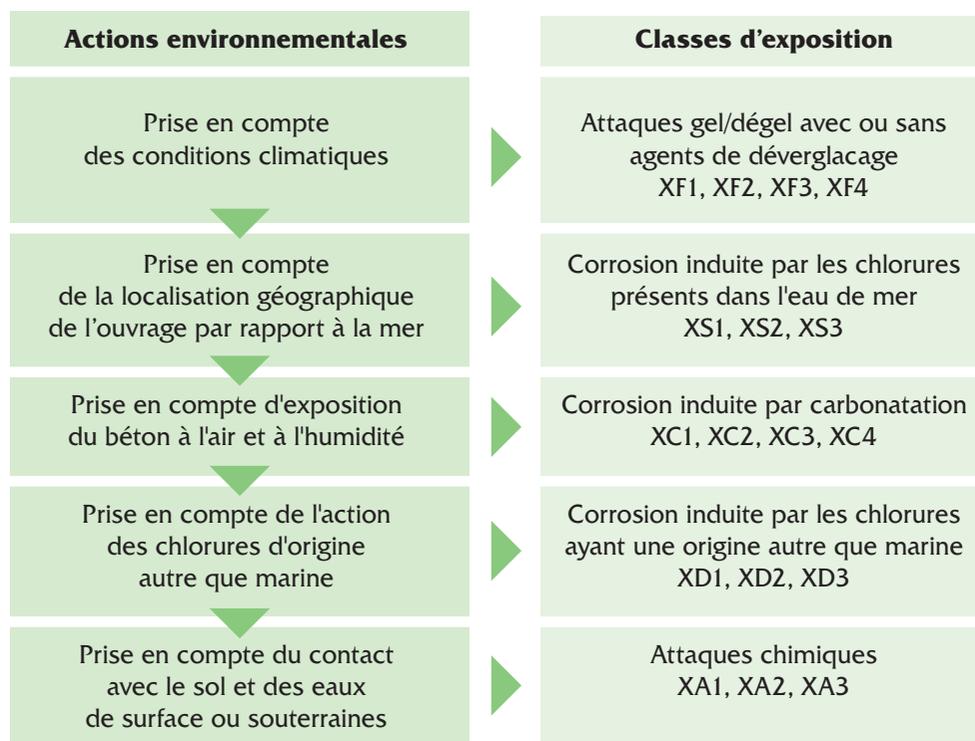
Etape 2 : prise en compte de la localisation géographique de l'ouvrage par rapport à la mer

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

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

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

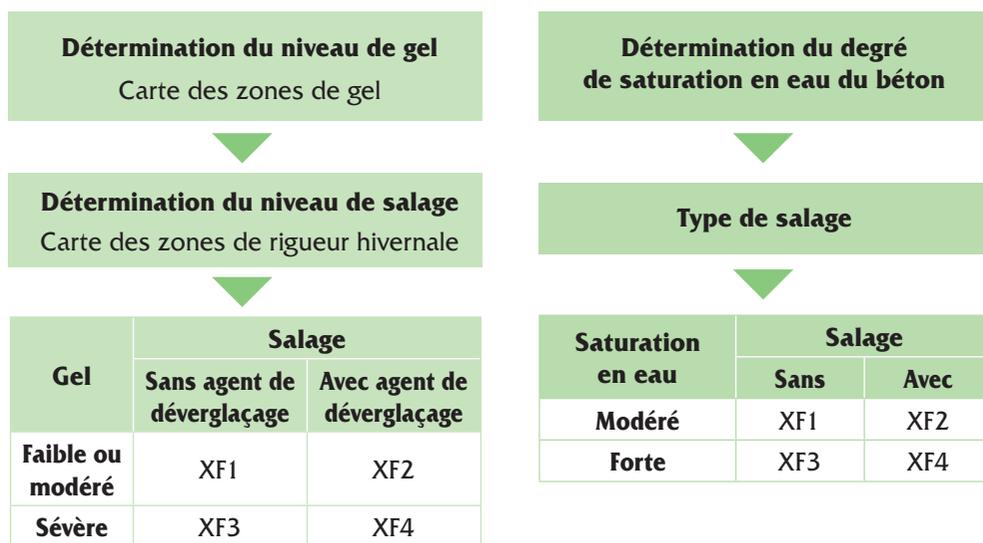
Synoptique pour la détermination des classes d'exposition



4.3 - Attaques gel / dégel avec ou sans agent de déverglaçage

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

Synoptique de prise en compte des attaques gel/dégel - Classes XF



Deux méthodes permettent d'affecter aux parties d'ouvrage les classes d'exposition relatives aux attaques gel/dégel :

> Détermination de la classe d'exposition XF1 à XF4 à partir des niveaux de gel et de salage :

- Niveaux de gel

La norme NF EN 206-1 présente la carte des zones de gel en France (figure NA.2), en distinguant trois catégories de gel : faible, sévère et modéré.

Cette carte est complétée par le fascicule de documentation FD P 18-326 "Bétons - Zones de gel en France" qui donne les niveaux de gel par canton.

Carte des zones de gel

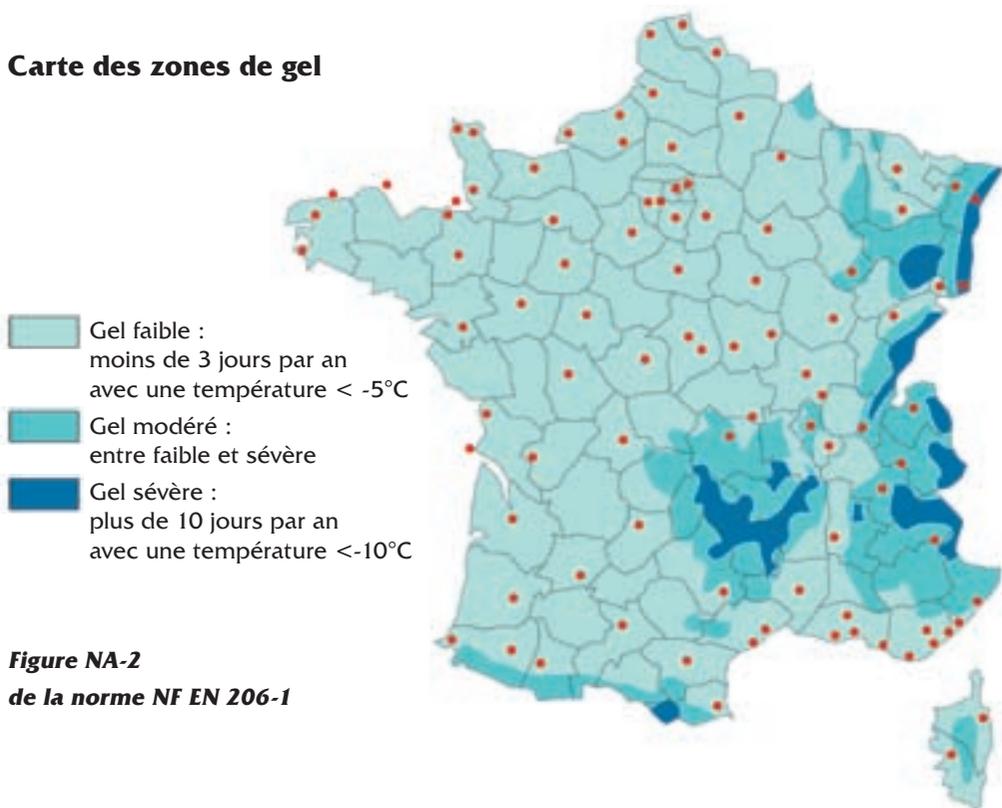


Figure NA-2
de la norme NF EN 206-1

Nota : cette carte de gel synthétise des données statistiques de stations météorologiques couvrant le territoire Français.

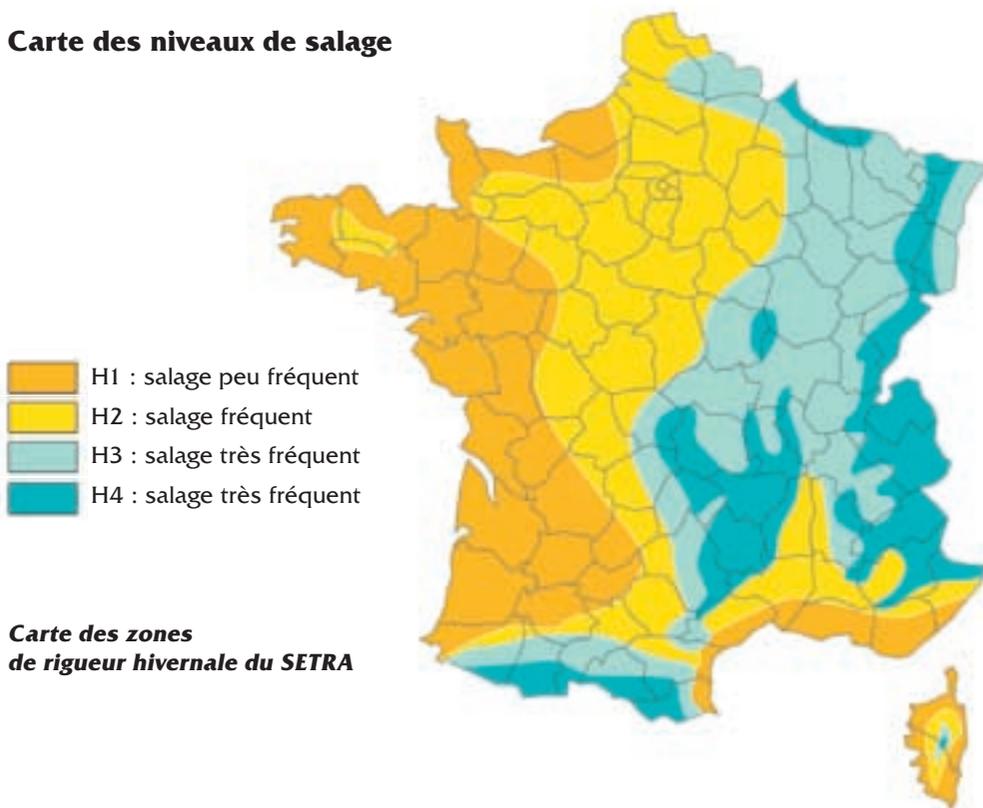
Nota : des conditions particulières d'environnement locales et des phénomènes microclimatiques peuvent imposer au prescripteur de choisir pour un ouvrage par exemple, une exposition au gel modéré alors que le canton est classé en gel sévère, ou inversement.

• Niveaux de salage

Les niveaux de salage sont définis dans le Guide Technique du LCPC "Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel" en référence à la carte des zones de rigueur hivernale Hi (cf. guide pratique SETRA de novembre 1994 "aide à l'élaboration du Dossier d'Organisation de la Viabilité Hivernale") en prenant en compte l'objectif de qualité du service hivernal fixé pour l'itinéraire.

• Salage peu fréquent ($n < 10$)	Correspond à la zone de rigueur hivernale H1 : hiver clément
• Salage fréquent ($10 < n < 30$)	Correspond à la zone de rigueur hivernale H2 : hiver peu rigoureux
• Salage très fréquent ($30 < n < 50$)	Correspond à la zone de rigueur hivernale H3 : hiver assez rigoureux
• Salage très fréquent ($50 < n < 90$)	Correspond à la zone de rigueur hivernale H4 : hiver rigoureux

Avec n : nombre de jours de salage.

Carte des niveaux de salage

**Carte des zones
de rigueur hivernale du SETRA**

> Détermination de la classe d'exposition XF1 à XF4 à partir du degré de saturation en eau du béton et du salage.

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

- forte saturation en eau,
 - saturation en eau modérée.
- et l'utilisation ou non d'agent de déverglaçage :
- sans agent de déverglaçage,
 - avec agent de déverglaçage.

La prise en compte de ce niveau de saturation et de l'utilisation ou non d'agent de déverglaçage permet de déterminer la classe d'exposition.

Exemples illustratifs :

Les parties d'ouvrages concernées sont celles qui sont non protégées des intempéries, ou au contact avec l'eau et qui sont soumises à l'action du gel en présence ou non de sels de déverglaçage ou aux projections d'eau chargées de saumure.

Nota : la norme NF EN 206-1 précise article NA.4.1 que :

"Dans le cas d'attaque gel / dégel et sauf spécifications particulières notamment fondées sur l'état de saturation en eau du béton, on se référera aux classes XF1 à XF4 indiquées dans la figure NA.2".

Nota : en complément de la carte des zones de gel définie par la figure NA.2 de la norme NF EN 206-1, le fascicule 65 précise les classes d'exposition à prendre en compte en fonction du niveau de salage de l'itinéraire sur lequel est situé l'ouvrage.

Tableau n°22 : classes d'exposition à retenir selon le Fascicule 65

	Zone de gel modéré	Zone de gel sévère
Salage peu fréquent	XF1	XF3
Salage fréquent	XD3 + XF2 *	XF4
Salage très fréquent	XF4	XF4

*pour les parties d'ouvrage exposées aux projections directes de sels de déverglaçage

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

Les classes XS1, XS2, XS3 sont relatives à la corrosion des armatures induite par les chlorures présents dans l'eau de mer. Elle concerne donc les bétons armés soumis au contact des chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin.

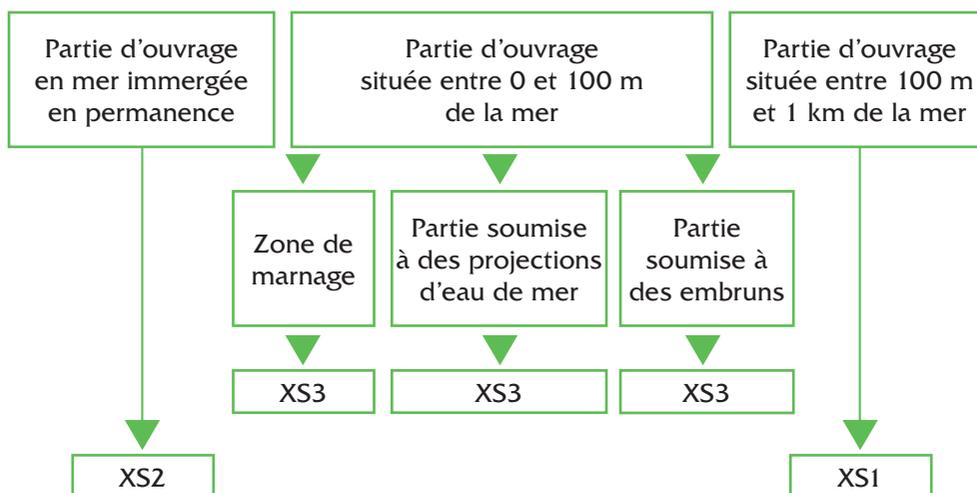
Nota : Tous les ouvrages situés à proximité des côtes (moins de 5 km) ou les structures marines sont donc concernées par ce type d'actions environnementales.

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

- sont à classer en XS3 les éléments de structures en zone de marnage et/ou exposés aux embruns lorsqu'ils sont situés à moins de 100 m de la côte, parfois jusqu'à 500 m, suivant la topographie particulière des lieux.

- sont à classer en XS1 les éléments de structures situés au-delà de la zone de classement XS3 et situés à moins de 1 km de la côte, parfois plus, jusqu'à 5 km, lorsqu'ils sont exposés à un air véhiculant du sel marin, suivant la topographie particulière.

Synoptique de prise en compte des chlorures présents dans l'eau de mer - Classes XS



4.5 - Corrosion induite par carbonatation

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

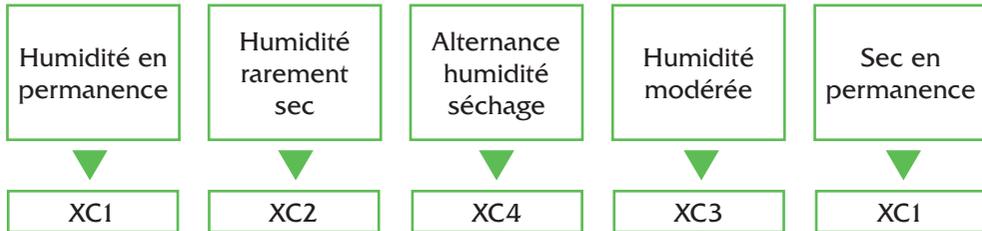
La vitesse de carbonatation est :

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

Ces classes s'appliquent au béton contenant des armatures et exposé à l'air et à l'humidité. Les conditions d'humidité peuvent être considérées comme le reflet de l'humidité ambiante, sauf s'il existe une barrière entre le béton et son environnement.

Nota : Pour les ouvrages d'art, les bétons exposés à l'air, situés en atmosphère extérieure relèvent de la classe d'exposition XC4.

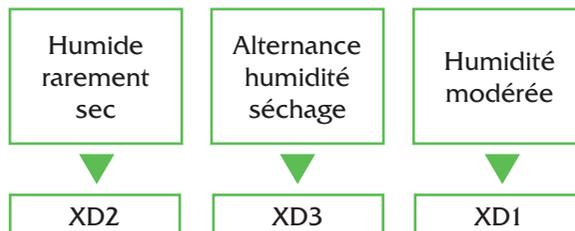
Synoptique de prise en compte de l'exposition à l'air et à l'humidité Classes XC



4.6 - Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine

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

Synoptique de prise en compte de l'action des chlorures d'origine autre que marine - Classes XD

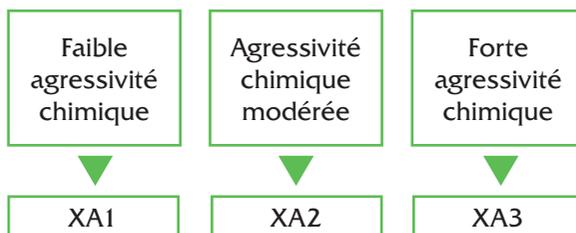


4.7 - Attaques chimiques

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

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

Synoptique de prise en compte des attaques chimiques - Classes XA



4.8 - Combinaison des classes d'exposition

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

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

Le béton devant respecter toutes les valeurs limites applicables pour la composition et les propriétés du béton pour chaque classe d'exposition, **les exigences et spécifications les plus sévères doivent être sélectionnées.**

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



Chapitre

5

Principales agressions et attaques du béton

- 5.1 - Mécanismes de corrosion
des armatures dans le béton**
- 5.2 - Actions de l'eau de mer**
- 5.3 - Mécanismes développés par le gel
et les sels de déverglaçage**
- 5.4 - Actions des eaux agressives**

5 - Principales agressions et attaques du béton

5.1 - Mécanismes de corrosion des armatures dans le béton

Les armatures enrobées d'un béton compact et non fissuré sont protégées naturellement des risques de corrosion par un phénomène de passivation qui résulte de la création, à la surface de l'acier, d'une pellicule protectrice dite de passivation.

Cette pellicule est formée par l'action de la chaux libérée par les silicates de calcium sur l'oxyde de fer ($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{CaO}$). La présence de chaux maintient la basicité du milieu entourant les armatures (l'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique de pH élevé de l'ordre de 12 à 13). Les armatures sont protégées tant qu'elles se trouvent dans un milieu présentant un pH compris entre 9 et 13.

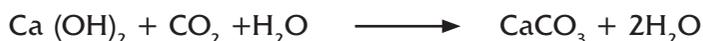
Deux principaux phénomènes peuvent dans certaines conditions détruire cette protection et initier la corrosion des armatures en acier :

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

La plus ou moins grande rapidité d'action de ces phénomènes est fonction en particulier de l'humidité ambiante.

5.1.1. Carbonatation

Le gaz carbonique contenu dans l'air se combine avec les composés hydratés, en commençant par les bases alcalines dissoutes dans la solution aqueuse interstitielle, en particulier le $\text{Ca}(\text{OH})_2$, selon une réaction produisant du carbonate de calcium CaCO_3 :



La progression de ce phénomène de carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur. La vitesse de propagation est progressivement ralentie par la formation des carbonates qui colmatent partiellement la porosité. Elle diminue donc avec la profondeur atteinte. Elle a pour conséquence une neutralisation (chute du pH de la solution interstitielle) du milieu de protection des armatures, qui peuvent alors s'oxyder.

La cinétique du processus est fonction de paramètres liés à la formulation du béton (nature et dosage en ciment, dosage en eau), au milieu environnant (teneur en dioxyde de carbone, humidité relative dans laquelle est situé l'ouvrage) et à sa structure poreuse. Plus le béton est compact, le dosage en ciment élevé, le rapport eau/ciment faible et la résistance du béton élevée, plus la progression du front de carbonatation est lente. Pour un béton courant, l'épaisseur de la couche carbonatée augmente proportionnellement à la racine carrée du temps. Tout ce qui conduit à diminuer la porosité du béton retarde donc l'échéance de dépassivation des armatures.

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

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 sur la diffusion du dioxyde de carbone.

L'augmentation de la compacité est obtenue en particulier en réduisant le rapport E/C. Ce rapport conditionne la perméabilité du béton ainsi que l'interconnexion du réseau poreux et par conséquent, la vitesse et 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.

5.1.2 - Actions des chlorures

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

Les ions chlorures peuvent pénétrer par diffusion ou migrer par capillarité à l'intérieur du béton, traverser la zone d'enrobage, atteindre les armatures et initier le phénomène de corrosion (par mécanisme de dissolution du métal suivant une réaction d'oxydoréduction : métal \rightarrow ions métal $M^{n+} + n$ électrons), d'abord ponctuel (corrosion par piqûres) puis généralisé à toute la surface de l'acier. La vitesse de pénétration des chlorures dépend en particulier de la porosité du béton. Elle décroît lorsque le rapport eau/ciment diminue.

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

5.1.3 - Effets de la corrosion

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

En règle générale, dans des milieux peu agressifs les enrobages et les caractéristiques des bétons (compacité, résistance) préconisés dans les normes NF EN 206-1 et NF EN 1992-1-1 sont suffisants pour garantir la protection naturelle des armatures durant la durée d'utilisation de l'ouvrage. Toutefois, des défauts d'enrobage, des bétons mal vibrés et de ce fait trop poreux, ou des milieux très agressifs risquent de conduire à la dégradation prématurée des armatures en acier.

5.2 - Actions de l'eau de mer

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

- agressions mécaniques dues à l'action de la houle et des marées, abrasion due aux chocs des corps flottants et érosion due aux effets des vagues ;
- agressions chimiques dues à l'action en particulier des chlorures présents dans l'eau de mer et des sulfates, mais aussi des nombreux sels dissous dans l'eau de mer et dans certains cas à la pollution des eaux ;
- agressions climatiques dues aux variations de température ;
- agressions biologiques de micro-organismes.

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

- continuellement immergés (béton situé sous le niveau de la mer, même à marée basse), les bétons situés dans cette zone sont rarement l'objet de dégradations importantes ;
- alternativement émergées ou immergées en fonction du niveau de la mer (zones de marnage déterminées par les niveaux de marées haute et basse). Les bétons situés dans les zones de marnage sont soumis 2 fois par jour à des imprégnations d'eau de mer alternant avec un essorage et donc à des cycles humidification-dessiccation. Ces bétons sont donc les plus agressés ;
- soumises aux éclaboussures provoquées par les vagues. Ces zones de hauteur variable sont situées au-dessus du niveau de l'eau à marée haute. Elles font aussi l'objet d'attaques importantes.
- continuellement émergées, donc sans contact direct avec le milieu marin, mais soumises aux embruns et brouillards marins contenant des chlorures. Les bétons situés dans cette zone peuvent subir de légères agressions (pour les bétons de structure, la norme NF EN 206-1 étend cette zone jusqu'à 1 km de la côte)

L'agressivité de l'eau de mer vis-à-vis du béton est liée aux attaques combinées de divers ions (chlorures, sulfates, nitrates ...) qui pénètrent dans le béton par capillarité ou par diffusion. La résistance des bétons est donc fonction du type d'exposition au milieu marin et du degré d'immersion.

Les divers chlorures dissous dans l'eau de mer, en particulier les chlorures de magnésium ($MgCl_2$) et les chlorures de calcium ($CaCl_2$) génèrent des réactions chimiques agressives pour les bétons qui se traduisent par une dissolution de la chaux et une précipitation d'ettringite (cristallisation de sels expansifs, décalcification, précipitation de composés insolubles, attaques ioniques, dissolution de la portlandite, etc.).

La portlandite présente dans les hydrates est attaquée par le sulfate de magnésium pour former dans le béton du gypse secondaire $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et de la brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Ce gypse secondaire se dissout en partie, ce qui augmente la porosité du béton. Les ions Mg^{2+} réagissent aussi avec les CSH.

Le chlorure de magnésium MgCl_2 est le chlorure le plus agressif. Il réagit avec la portlandite pour donner du chlorure de calcium CaCl_2 en partie soluble, qui augmente la porosité du béton. L'autre partie réagit avec l'aluminate de chaux hydraté pour former des chloroaluminates $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (sel de Friedel). Ce sel, également expansif, entraîne la fissuration du béton.

Les ions CO_2 , en présence de silice active, transforment l'ettringite en thaumasite ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaSiO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$) ce qui entraîne des risques d'expansion et de fissuration. Dans certains cas particuliers, la teneur en CO_2 peut être élevée et l'eau de mer devient alors très agressive. Ceci se produit dans les eaux d'estuaires ou de baies fermées, où l'accumulation de matières organiques entraîne une concentration plus forte en CO_2 .

5.3 - 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 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, 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.

5.3.1 - Actions des cycles de 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 restant 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 donc 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).

5.3.2 - Actions 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.

Nota : *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.*

5.3.3 - Rôle du réseau de bulles d'air

Pour empêcher l'apparition de pressions excessives dans le béton, il est possible de créer, grâce à un agent entraîneur d'air introduit lors de la fabrication du béton, 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, 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 occlus de l'ordre de 3 à 6 % 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).

Il 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.

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 seuils.

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.

5.4 - Actions 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, eaux présentes dans les sols, 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. En effet, les agents dissous dans l'eau constituent une solution chimiquement agressive pour le béton qui peut provoquer plusieurs types de dégradations lorsque la formulation du béton n'est pas optimisée et adaptée au risque d'agression.

5.4.1 - Attaques acides

Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de ciment. 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 les eaux industrielles contenant des acides organiques, les eaux chargées en acides minéraux, mais aussi les eaux pures.

5.4.2 - 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 (la portlandite notamment).

Recommandations pour la maîtrise de la durabilité des bétons

- 6.1 - Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel**
- 6.2 - Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction**
- 6.3 - Recommandations pour la prévention des désordres liés aux réactions sulfatiques internes**
- 6.4 - Fascicule de documentation
FD P 18-011**

6 - Recommandations pour la maîtrise de la durabilité des bétons

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

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". Les recommandations 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 du génie civil, et conçus pour une durée d'utilisation de projet de 100 ans.

Ce document précise les dispositions relatives 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), bétons moulés sur site avec une machine à coffrage glissant et bétons projetés.

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

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 le rapport E/C est faible
 - 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.

Ces recommandations 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.

Les principes de prévention concernent tous les paramètres de formulation (le béton doit être compact, présenter lorsque nécessaire un réseau de bulles d'air approprié, et être formulé en utilisant des granulats non gélifs), les conditions environnementales et les conditions de fabrication et de mise en œuvre du béton (temps de transport, vibration, talochage, cure, etc.).

Les recommandations s'appuient pour les granulats sur les normes NF EN 12620 et XP P 18-545 ainsi que sur la norme NF EN 1367-1 pour la sensibilité au gel. Elles définissent les essais à mettre en œuvre ainsi que les caractéristiques à exiger sur le béton durci (facteur d'espacement des bulles d'air). Les essais de types performantiels sont basés sur des cycles de gel-dégel en présence ou non de sels de déverglaçage.

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 fort degré de saturation en eau du béton 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 modérée en eau du béton. La durée des essais est de l'ordre de 3,5 mois.

La résistance à l'écaillage caractérise 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 3 mois.

La méthode de prévention consiste à définir le type de béton à mettre en œuvre pour chaque ouvrage en fonction des niveaux de gel (gel sévère et gel modéré) - niveaux précisés dans la carte des zones de gel en France (cf. norme NF EN 206-1 et fascicule de documentation P 18-326) - et des

niveaux de salage (salage peu fréquent, salage fréquent, salage très fréquent) - niveaux précisés dans le document SETRA (aide à l'élaboration du dossier d'organisation, de la viabilité hivernale). Les zones de gel faible ne sont pas concernées par ces recommandations.

Selon le niveau de gel auquel est soumis l'ouvrage et le niveau de salage, on distingue quatre types de bétons : béton adapté/béton adapté avec teneur en air de 4% / Béton G/ Béton G+S.

Tableau n°23 : type de bétons

Niveau de salage	Niveau de gel	
	Modéré	Sévère
Peu fréquent	Béton adapté*	Béton G
Fréquent	Béton adapté* avec : teneur en air minimale = 4% ou essais de performance	Béton G + S
Très fréquent	Béton G + S	Béton G + S

*Béton adapté : béton conforme à la norme NF EN 206-1 et possédant une bonne compacité.

Seuls les bétons G et G + S font l'objet de prescriptions particulières.

Les recommandations concernent la formulation, les spécifications sur les constituants (ciments, granulats, additions), les spécifications exigées sur le béton durci ainsi que la fabrication, la mise en œuvre et les dispositions constructives.

Pour les bétons traditionnels, elles s'appliquent aux bétons de résistances caractéristiques à 28 jours inférieures à 50 MPa, formulés avec un entraîneur d'air. Pour les BHP, elles concernent les bétons de résistances caractéristiques à 28 jours supérieures ou égales à 50 MPa. Elles distinguent deux classes de BHP en fonction du rapport E/C : classe 1 ($E/C \geq 0,32$) ; classe 2 ($E/C < 0,32$) et deux types de formulations : béton formulé sans entraîneur d'air ; béton formulé avec entraîneur d'air.

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

6.2 - Recommandations pour la prévention des désordres dus à l' alcali-réaction

6.2.1 - Phénomène d'alcali-réaction

Le phénomène d'alcali-réaction résulte d'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 réactive des granulats, d'alcalins du béton et d'eau en quantité suffisante.

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 armatures.

Trois conditions sont nécessaires pour amorcer et entretenir les réactions de ce phénomène exceptionnel : il faut que simultanément, l'environnement dans lequel se trouve le béton 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). Si l'une des conditions n'est pas remplie, il n'y a pas de risque d'alcali-réaction.

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 s'avèrent efficaces. La mise en place d'un ensemble cohérent de recommandations de prévention a enrayé depuis plus de 15 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 donc d'éviter tout désordre.

6.2.2 - Recommandations

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 dus à l'alcali-réaction".

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 %) / quantité d'alcalins dans le béton importante / silice réactive (présence de granulats réactifs).

La méthode de prévention se décline en deux étapes. Elle consiste en fonction de l'environnement (classe 1 à 4 - tableau 24) et du type d'ouvrage (type I à III - tableau 25) à déterminer le niveau de prévention à atteindre (A, B ou C - tableau 26), puis à vérifier que la formulation prévue pour le béton est satisfaisante.

Elle permet donc de mettre en œuvre des recommandations de prévention adaptées à l'importance de l'ouvrage et à son environnement.

Tableau n°24 : environnement

Classe d'exposition	Environnement
1	Sec ou peu humide (hygrométrie inférieure à 80 %)
2	Hygrométrie supérieure à 80 % ou en contact avec l'eau
3	Hygrométrie supérieure à 80 % et avec gel et sels de déverglaçage
4	Marin

Tableau n°25 : types d'ouvrages

Types d'ouvrages	Niveau de risque	Exemples d'ouvrages
I	Risques d'apparition des désordres faibles ou acceptables	Éléments non porteurs La plupart des produits préfabriqués en béton
II	Risques d'apparition de désordres peu tolérables	La plupart des ouvrages de génie civil
III	Risques d'apparition de désordres inacceptables	Tunnels, barrages, ponts, viaducs

Tableau n°26 : niveaux de prévention

Types d'ouvrages	Classe d'exposition			
	1	2	3	4
I	A	A	A	A
II	A	B	B	B
III	C	C	C	C

Les recommandations à appliquer sont fonction du niveau de prévention :

Niveau A : pas de spécifications particulières

Niveau B : six possibilités d'acceptation de la formule béton*

Niveau C : granulats non réactifs (granulats PRP sous conditions)**

*Pour valider une composition, il convient de répondre au moins une fois positivement à l'une des 6 questions :

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

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 révéifier ces six conditions d'acceptation.

**Utilisation recommandée de granulats non réactifs (NR), granulats potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP – granulats dont la proportion de silice réactive est située au-delà d'une plage de valeurs dites pessimales) éventuellement autorisés sous réserve que les conditions particulières à leur emploi soient satisfaites, sur la base d'un essai de performance.

6.3 - Recommandations pour la prévention des désordres liés aux réactions sulfatiques internes

6.3.1 - Phénomène de réaction sulfatique interne

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 de l'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 monosulfo-aluminate 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.

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 sulfates (apportés par le sol, les eaux souterraines, les sels de déverglaçage), notamment vis-à-vis des caractéristiques du ciment.

Cependant, dans certains cas rares, lorsque le béton subit un échauffement important au jeune âge (plusieurs heures ou quelques jours après sa mise en œuvre), la formation différée d'ettringite peut avoir lieu sans apport externe d'ions sulfates. Ces réactions sont susceptibles de provoquer un gonflement du béton. Les dégradations sont caractérisées par des fissures en surface qui apparaissent après plusieurs années d'exposition à des conditions sévères caractérisées par une forte humidité. Ce phénomène rare peut se rencontrer, seulement dans des environnements humides, dans des parties d'ouvrages massives en béton, en contact avec l'eau, qui ont été coulées en place en période estivale ou sur des pièces de béton ayant subi un traitement thermique. Il est souvent dénommé DEF (Delayed Ettringite Formation), traduction anglaise de Formation Différée d'Ettringite. L'origine du gonflement et la nature des paramètres impliqués ont fait l'objet de nombreuses études et des travaux de recherche sont encore en cours.

On a constaté l'incidence importante sur la réaction :

- de la température maximale du béton lors de la prise et des traitements thermiques appliqués au béton, ainsi que la durée du maintien de cette température ;
- de la teneur en alcalins du béton sur la solubilité de l'ettringite ;
- de la teneur en sulfates et en aluminates du ciment ;
- de l'humidité et de l'eau (l'eau est l'un des facteurs fondamentaux de la réaction, les parties d'ouvrage atteintes de RSI sont en contact avec l'eau, ou exposées à un taux d'humidité élevé).

Les cas de structures concernées par cette pathologie sont peu nombreux et il n'y a pas de symptômes spécifiques à la formation différée d'ettringite.

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

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

- En priorité, en limitant l'échauffement du béton au cœur de la structure au cours des premiers jours après le bétonnage.

Il existe plusieurs moyens pour limiter cet échauffement en intervenant soit au niveau de la formulation du béton (en privilégiant par exemple un ciment à faible chaleur d'hydratation), soit au niveau de sa fabrication, soit lors de la réalisation de l'ouvrage (choix de la période de bétonnage, refroidissement du béton).

- En utilisant des constituants adaptés du béton pour limiter l'apport en sulfates.

6.3.2 Recommandations

De nombreuses recherches, menées en particulier au sein du réseau des laboratoires de l'équipement, des centres de recherches de l'industrie cimentière et de l'industrie du béton préfabriqué, ont permis de mettre au point et de valider des principes de prévention à mettre en œuvre.

Un groupe de travail piloté par le LCPC a rédigé des recommandations pour se prémunir contre le développement de réactions sulfatiques internes et limiter le risque d'apparition des désordres induits par ces réactions. Elles font l'objet d'un guide technique publié en août 2007 intitulé : "Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne".

Ces recommandations précisent des dispositions constructives à mettre en œuvre pour la conception et la réalisation de l'ouvrage et des précautions à appliquer pour la mise en œuvre et la formulation du béton. Elles sont complémentaires des spécifications de la norme NF EN 206-1.

Elles prennent en compte :

- la catégorie d'ouvrage ;
- les actions environnementales auxquelles seront soumises les parties d'ouvrages concernées pendant la durée d'utilisation de la structure ;
- les conditions thermiques du béton lors de sa mise en œuvre et au cours de son durcissement.

Les précautions à mettre en œuvre sont fonction d'un niveau de prévention défini pour chaque partie d'ouvrage potentiellement "critique" selon la classe d'exposition retenue.

Sont concernées par ces recommandations uniquement les parties d'ouvrages en béton de dimensions importantes en contact avec l'eau ou soumises à une ambiance humide. Il s'agit de pièces massives ou "critiques" pour lesquelles la chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment (la prise et le durcissement du béton génèrent un dégagement de chaleur dû à l'exothermie des réactions d'hydratation) est peu évacuée vers l'extérieur, ce qui conduit à une élévation importante de la température au cœur du béton.

Le principe de la démarche préventive consiste à identifier les parties d'ouvrages susceptibles d'être soumises au phénomène de RSI, puis à définir un niveau de prévention nécessaire en fonction de la catégorie de l'ouvrage (catégories I à III du tableau 27, traduisant le niveau de risque que le maître d'ouvrage est prêt à accepter) ou de la partie d'ouvrage et des classes d'exposition spécifiques à la RSI (tableau 28) intégrant l'importance

des paramètres eau et humidité) traduisant l'environnement dans lequel se trouve le béton. A chaque niveau de prévention (As, Bs, Cs, Ds : tableau 29 obtenu par croisement des classes d'exposition et des catégories d'ouvrages) correspondent des précautions à appliquer.

Il convient alors de mettre en œuvre pour chaque partie d'ouvrage concernée les précautions adaptées à chaque niveau de prévention.

Tableau n°27 : catégorie d'ouvrage

Catégorie d'ouvrages	Niveau de conséquences d'apparition des désordres	Exemples d'ouvrage ou de partie d'ouvrage
I	Faibles ou acceptables	<ul style="list-style-type: none"> Ouvrage en béton de classe de résistance inférieure à C 16/20 Eléments non porteurs de bâtiment
II	Peu tolérables	<ul style="list-style-type: none"> Eléments porteurs de la plupart des bâtiments et les ouvrages de Génie civil
III	Inacceptables ou quasi inacceptables	<ul style="list-style-type: none"> Bâtiments réacteurs de centrales nucléaires Barrages, tunnels Ponts et viaducs exceptionnels

Nota : La catégorie d'ouvrage dépend de son utilisation et du niveau de conséquences en terme de sécurité que le maître d'ouvrage est prêt à accepter.

Tableau n°28 : classes d'exposition de la partie d'ouvrage vis-à-vis de la RSI

Classe d'exposition	Description de l'environnement	Exemples informatifs
XH1	Sec ou humidité modérée	<ul style="list-style-type: none"> Partie d'ouvrage en béton située à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible ou moyen Partie d'ouvrage en béton située à l'extérieur et abritée de la pluie
XH2	<ul style="list-style-type: none"> Alternance d'humidité et de séchage, humidité élevée 	<ul style="list-style-type: none"> Partie d'ouvrage en béton située à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est élevé Partie d'ouvrage en béton non protégée par un revêtement et soumis aux intempéries sans stagnation à la surface
XH3	<ul style="list-style-type: none"> En contact durable avec l'eau : immersion permanente, stagnation d'eau à la surface, zone de marnage 	<ul style="list-style-type: none"> Partie d'ouvrage en béton submergée en permanence dans l'eau Partie d'ouvrage en béton régulièrement exposée à des projections d'eau

Nota : Ces classes d'exposition spécifiques à la RSI doivent être spécifiées dans le CCP pour chaque partie d'ouvrage susceptible d'être soumise au phénomène de RSI.

Tableau n°29 : choix du niveau de prévention

Catégorie d'ouvrage	Classe d'exposition		
	XH1	XH2	XH3
I	As	As	As
II	As	Bs	Cs
III	As	Cs	Ds

Nota : Le choix du niveau de prévention pour chaque partie d'ouvrage est de la responsabilité du maître d'ouvrage. Le niveau de prévention doit être spécifié dans le CCTP. Au sein d'un même ouvrage les parties susceptibles d'être soumises au phénomène de RSI peuvent être l'objet de niveaux de préventions différents.

Les précautions sont modulées en fonction du niveau de prévention. Elles portent en priorité sur la température maximale du béton à respecter. Des précautions sur la formulation sont aussi possibles si nécessaire.

Les précautions à appliquer sont fonction de chaque niveau de prévention par ordre croissant d'exigences de As à Ds. Elles visent essentiellement à limiter la température maximale susceptible d'être atteinte au cœur de chaque pièce critique.

A titre d'exemple :

- les précautions à appliquer pour le cas le plus courant, soit le niveau de prévention As, sont les suivantes :
 - la température Tmax susceptible d'être atteinte au sein de l'ouvrage doit rester inférieure à 85°C.
- Pour le niveau de prévention Bs, l'une des deux précautions suivantes doit être mise en œuvre :
 - la température Tmax doit rester inférieure à 75°C
 - si Tmax ne peut rester inférieure à 75°C, elle doit rester inférieure à 85°C et une des conditions suivantes doit être respectée :
 - . maîtrise du traitement thermique (durée du maintien de la température au-delà de 75°C limitée)
 - . utilisation d'un ciment adapté ou d'un ciment combiné avec des additions
 - . vérification de la durabilité du béton vis-à-vis de la RSI à l'aide de l'essai de performance (méthode d'essai du LPC n°66).

Tableau n°30 : récapitulatif des précautions à appliquer vis-à-vis de la RSI

Niveau de prévention	Température maximale du béton T _{MAX}	Température limite du béton T _{LIMITE}	Conditions à respecter si température comprise entre T _{MAX} et T _{LIMITE}
As	85°C	90°C	<ul style="list-style-type: none"> • Maîtrise du traitement thermique
Bs	75°C	85°C	<ul style="list-style-type: none"> • Maîtrise du traitement thermique ou • Ciment adapté ou ciment combiné avec des additions ou • Essai de performance
Cs	70°C	80°C	<ul style="list-style-type: none"> • Maîtrise du traitement thermique ou • Ciment adapté ou ciment combiné avec des additions ou • Essai de performance
Ds	65°C	75°C	<ul style="list-style-type: none"> • Ciment adapté et • Validation de la formulation par un laboratoire indépendant expert en RSI

T_{MAX} : température maximale du béton susceptible d'être atteinte au sein de l'ouvrage

T_{LIMITE} : : température limite du béton ne pouvant être dépassée

Niveau de prévention	Ciment adapté
Bs	<ul style="list-style-type: none"> • Ciment conforme à la norme NF P 15-319 (ES) (Nota 1) <ul style="list-style-type: none"> • CEM II / B-V ; CEM II / B-S ; CEM II / B-Q ; CEM II /B- M(S-V) ; CEM III / A ; CEM V (Nota 2) • CEM I en combinaison avec cendres volantes, laitiers de haut-fourneau, pouzzolanes naturelles calcinées - (Nota 3) • Proportion d'additions supérieure à 20% (Nota 4)
Cs	<ul style="list-style-type: none"> • Ciment conforme à la norme NF P 15-319(ES) (Nota 1) <ul style="list-style-type: none"> • CEM II / B-V ; CEM II / B-S ; CEM II / IB-C ; CEM II / B- M(S-V) ; CEM III / A ; CEM V (Nota 2) • CEM I en combinaison avec cendres volantes ou laitiers de haut-fourneau, pouzzolanes naturelles calcinées (Nota 3) et proportion d'additions supérieure à 20% (Nota 4)
Ds	<ul style="list-style-type: none"> • Ciment conforme à la norme NF P 15-319 (ES) (Nota 1)

Nota 1 : Dans le cas CEM I et CEM II / A

Teneur en alcalins équivalents actifs du béton limitée à 3kg/m^3

Nota 2 : Ciment avec teneur en SO_3 inférieure à 3 % et dont le C_3A du clinker est inférieur à 8 %

Nota 3 : Le CEM I doit respecter C_3A (rapporté au ciment) inférieure à 8 % et SO_3 inférieure à 3 %

Nota 4 : La proportion d'addition doit respecter les spécifications de la norme NF EN 206-1

Le guide propose des dispositions pour limiter les risques potentiels de réaction sulfatique interne :

- au niveau de la conception et du dimensionnement des ouvrages, en évitant les zones de stagnation d'eau, en protégeant le béton par une étanchéité, en privilégiant les pièces creuses.
- au niveau de la formulation, il est préférable de choisir des ciments à faible chaleur d'hydratation notés LH (cf : amendement A1 à la norme NF EN 197-1)

A priori les 5 types de ciments courants (CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV et CEM V) sont utilisables. Une partie du CEM I peut aussi être substituée par des additions minérales (la proportion d'addition doit être au moins de 20 % et elle doit respecter les limites permises par la norme NF EN 206-1) afin de diminuer l'exothermie du béton.

Un compromis peut s'avérer nécessaire sur le choix du ciment adapté par exemple dans le cas de pièces critiques soumises à un gel sévère associé à des sels de déverglaçage et qui seraient susceptibles d'être aussi soumises à un risque de réaction sulfatique interne. En effet les recommandations relatives au gel imposent des dosages élevés en ciment de type CEM I, solution non favorable à la limitation de la température du béton au jeune âge.

- lors de la fabrication (refroidissement des granulats, eau de gâchage froide) et du transport du béton (réduction du temps de transport et d'attente des toupies).
- au cours de la mise en œuvre, il convient en particulier d'éviter le coulage des ouvrages en période de fortes chaleurs ou de mettre en œuvre tous les moyens nécessaires pour réduire la température du béton (par exemple en incorporant des serpentins dans le béton dans lequel on fait circuler de l'eau fraîche) et de privilégier des coffrages non isolants.

Ces dispositions doivent permettre :

- de limiter la température atteinte au sein du béton
- d'éviter les contacts prolongés du béton avec l'eau

Le LCPC, a développé un essai de performance accéléré sur béton (méthode d'essai des LPC n° 66 : réactivité d'une formule de béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne) 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, adapté 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, de taille critique, coulée en place sur chantier. Cet essai d'une durée de 12 à 15 mois, consiste à caractériser le risque de gonflement d'un béton vis-à-vis de la RSI. Il permet de valider une formulation de béton en déterminant sa réactivité potentielle à la formation différée d'ettringite.

Le guide LCPC rappelle (annexe III) les principes de l'exothermie des réactions d'hydratation et l'incidence du dosage en liant et de sa nature. Il propose (annexe IV) une méthode de calcul simplifiée permettant d'estimer la température atteinte au cœur du béton.

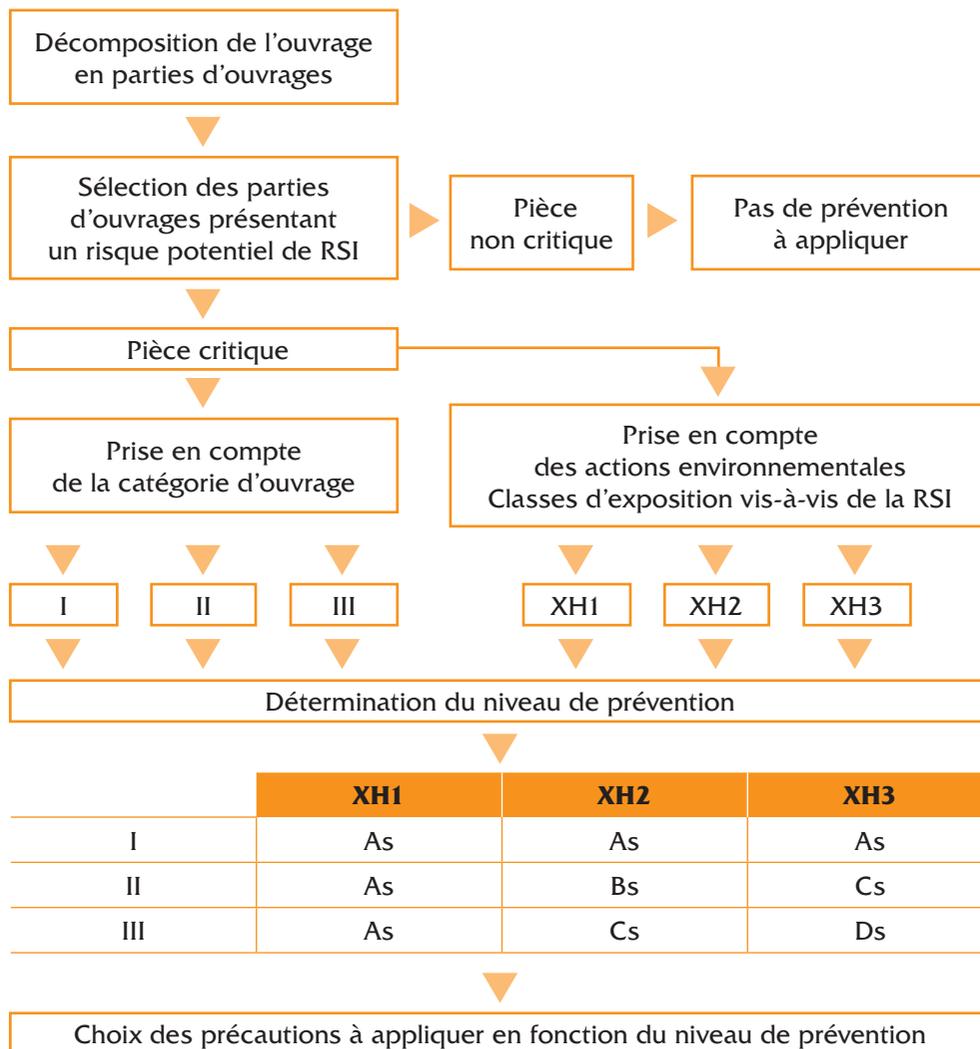
L'élévation de température au sein d'une partie d'ouvrage en béton est fonction :

- de l'exothermie du béton ;
- de la géométrie de la partie d'ouvrage ;
- de la température initiale du béton lors de la mise en œuvre dans le coffrage ;
- des déperditions thermiques liées en particulier au type de coffrage.

Ce calcul permet d'évaluer si la partie d'ouvrage doit être considérée comme une pièce critique vis-à-vis des risques de RSI.

La détermination du ciment adapté doit donc faire l'objet très souvent d'une analyse multicritère privilégiant en priorité la durabilité de l'ensemble de l'ouvrage, en respectant les spécifications liées aux classes d'exposition, tout en prenant en compte de manière pertinente les exigences de mise en œuvre.

Synoptique pour la détermination du niveau de prévention vis-à-vis du risque de RSI



6.4 - Fascicule de documentation FD P 18-011

Le fascicule de documentation FD P 18-011 "Définition et classification des environnements chimiquement agressifs, recommandations pour la formulation des bétons" définit des environnements agressifs, pour les bétons armés et les bétons précontraints. Il permet de spécifier des dispositions préventives adaptées pour la formulation des bétons résistants à ces environnements agressifs.

Ce fascicule est complémentaire de la norme NF EN 206-1. En effet la norme NF EN 206-1 spécifie, dans les tableaux NA.F.1 et NA.F.2, des exigences relatives aux bétons en fonction des classes d'exposition. Elle précise, pour les classes d'exposition XA1, XA2 et XA3 qui correspondent respectivement à des environnements de faible, modérée et forte agressivité chimique qu'il convient de se référer au fascicule FD P 18-011 pour le choix du ciment.

Le fascicule définit et distingue trois types d'environnements chimiquement agressifs :

- les milieux gazeux : gaz, vapeurs ;
- les milieux liquides : eaux de mer, eaux résiduaires, solutions acides, solutions basiques, eaux pures ;
- les milieux solides : sols contenant des sulfates par exemple.

Il décrit les modes d'action d'environnement chimiquement agressifs (eaux pures, solutions acides, solutions basiques, solutions salines, milieux gazeux, sols...).

Pour chaque environnement agressif, correspondant aux classes d'expositions XA1, XA2 et XA3, le fascicule donne des recommandations sur le choix du type de ciment pour les milieux contenant des sulfates, les milieux acides et l'eau pure.

Il recommande en particulier des mesures préventives pour la formulation des bétons afin d'assurer leur durabilité.

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

Tableau n°31 : recommandations pour le choix du ciment : milieux acides

Milieux acides	
Classe d'exposition	Choix du ciment
XA1	<ul style="list-style-type: none"> • CEM II / B-S, CEM II / B-V, CEM II / B-P, CEM II / B-Q, CEM II / B-M (S-V), CEM III / A conformes à la norme NF EN 197-1, • CEM III / A conformes à la norme NF EN 197-4, • Ciments conformes à la norme NF P 15-317(PM) ou NF P 15-319(ES), • CEM IV / A et B conformes à la norme NF EN 197-1
XA2	<ul style="list-style-type: none"> • CEM II / B-S, CEM II / B-V, CEM II / B-P, CEM II / B-Q, CEM II / B-M(S-V), CEM III / A conformes à la norme NF EN 197-1, • CEM III / A conformes à la norme NF EN 197-4 • Ciments conformes à la norme NF P 15-319(ES) • CEM IV/A et B conformes à la norme NF EN 197-1
XA3	<ul style="list-style-type: none"> • CEM III / A, B et C, CEM V / A et B conformes à la norme NF P 15-319 ; • Ciments d'aluminates de calcium conformes à la norme NF EN 14647, • CEM IV / B conforme à la norme NF EN 197-1

Tableau n°32 : recommandations pour le choix du ciment : milieux contenant des sulfates (solution)

Milieux contenant des sulfates (solution)	
Classe d'exposition	Choix du ciment
XA1	Pas de recommandations particulières
XA2	<ul style="list-style-type: none"> • (au-dessous de 1500mg/l) ciments conformes à la norme NF P 15-317 (PM) ou NF P 15-319 (ES) • (au-dessus de 1500mg/l) ciments conformes à la norme NF P 15-319 (ES)
XA3	Ciments conformes à la norme NF P 15-319 (ES)

Tableau n°33 : recommandations pour le choix du ciment : milieux contenant des sulfates (sol)

Milieux contenant des sulfates (sol)	
Classe d'exposition	Choix du ciment
XA1	Pas de recommandations particulières
XA2	Ciments conformes à la norme NF P 15-317 (PM) ou NF P 15-319 (ES)
XA3	Ciments conformes à la norme NF P 15-319 (ES)

Tableau n°34 : recommandations pour le choix du ciment : eaux pures

Eaus pures	
Classe d'exposition	Choix du ciment
XA1	<ul style="list-style-type: none"> • CEM III/A, B et C, CEM V/A et B conformes à la norme NF P 15-319, • Ciments d'aluminates de calcium conforme à la norme NF EN 14647 • CEM IV/B conforme à la norme NF EN 197-1
XA2	
XA3	

Nouvelles exigences pour les maîtres d'ouvrage

7.1 - Exigences vis-à-vis du développement durable

7.2 - Exigences vis-à-vis de la durabilité de l'ouvrage

7 - Nouvelles exigences pour les maîtres d'ouvrage

La mise en application du nouveau contexte normatif sur les bétons, en particulier la norme "béton" NF EN 206-1 et les normes "Eurocode" induit une forte évolution des responsabilités des maîtres d'ouvrage.

Le maître d'ouvrage doit désormais faire, en amont du projet, des choix relatifs en particulier à la conception des ouvrages et aux hypothèses de prévention de risques.

Ces choix couvrent les différentes phases de l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage. Ils traduisent le concept lié au respect des six exigences essentielles définies par la Directive sur les Produits de Construction (DPC).

- Résistance mécanique et stabilité des ouvrages
- Sécurité en cas d'incendie
- Hygiène, santé et environnement
- Sécurité d'utilisation
- Protection contre le bruit
- Economie d'énergie

Le maître d'ouvrage doit désormais s'impliquer précisément dans la définition détaillée des exigences à respecter tout au long des étapes du cycle de conception, d'exécution, d'utilisation et de maintenance de l'ouvrage. Il a la responsabilité de choix fondamentaux, en particulier en matière de qualité, fiabilité, sécurité et durabilité des structures.

Ces choix fondamentaux se déclinent pour les structures en béton principalement selon deux types d'exigences :

- exigences vis-à-vis du Développement Durable ;
- exigences vis-à-vis de la Durabilité de la structure.

7.1 - Exigences vis-à-vis du développement durable

La genèse et la conception d'un ouvrage intègrent maintenant toutes les étapes du cycle de vie de l'ouvrage depuis l'extraction des matières premières destinées à la fabrication des matériaux constituant l'ouvrage, jusqu'à la valorisation et la réutilisation de ces matériaux en fin de vie, en passant par la

fabrication, la mise en œuvre des matériaux et la vie de l'ouvrage. L'ouvrage doit bien sûr s'intégrer parfaitement dans son site d'accueil et offrir grâce au choix de matériaux de construction adaptés une pérennité architecturale.

Les industriels de la filière ciment et béton se sont engagés dans une démarche d'analyse de cycle de vie de leurs matériaux afin :

- d'améliorer les performances environnementales et sanitaires de leurs produits ;
- de donner aux utilisateurs des indications chiffrées des impacts environnementaux du matériau béton dans ses utilisations ;
- de permettre une évaluation environnementale et sanitaire des solutions constructives.

Cette démarche se concrétise par la mise au point de Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires (FDES).

Ces fiches permettent aux concepteurs de choisir les meilleures solutions constructives dans le cadre de projets soucieux de préserver l'environnement et les ressources naturelles.

Le choix du type de ciment adapté au projet et à chaque partie d'ouvrage doit être en phase avec cette démarche.

7.2 - Exigences vis-à-vis de la durabilité de l'ouvrage

7.2.1 - Durée d'utilisation de projet

Le maître d'ouvrage a la responsabilité de définir la durée d'utilisation du projet.

L'Eurocode 0 définit la durée d'utilisation de projet comme "la période au cours de laquelle la structure est censée rester normalement utilisable en étant normalement entretenue, mais sans qu'il soit nécessaire de procéder à de grosses réparations."

Cette durée d'utilisation du projet a une incidence fondamentale en particulier sur les dispositions constructives pour les armatures passives ou de précontrainte (la valeur de l'enrobage des armatures est fonction en particulier de la durée d'utilisation et de la classe de résistance du béton).

Tableau n°35 : durée d'utilisation de projet selon l'Eurocode 0

Catégorie d'ouvrage	Durée d'utilisation de projet en années	Exemple
1	10	Structures provisoires
2	25	Éléments structuraux remplaçables
3	25	Structures agricoles et similaires
4	20	Bâtiments et autres structures courantes
5	100	Bâtiments monumentaux ponts et autres ouvrages de génie civil

7.2.2 - Choix de matériaux spécifiques

Le maître d'ouvrage peut favoriser l'utilisation de matériaux présentant des performances spécifiques permettant d'augmenter et d'optimiser la durée d'utilisation de l'ouvrage (exemple armatures inox en substitution partielle ou totale des armatures au carbone).

7.2.3 - Détermination des agressions et attaques extérieures auxquelles sera soumis le béton

Le maître d'ouvrage doit, pour chaque partie d'ouvrage déterminer les diverses agressions ou attaques extérieures auxquelles seront soumis les bétons, au cours de la durée d'utilisation de l'ouvrage.

La norme NF EN 206-1 et l'Eurocode Béton (EC2) distinguent 18 classes d'exposition qui permettent de spécifier les diverses agressions et attaques physico-chimiques extérieures. Ces classes d'exposition permettent au maître d'ouvrage de décliner au niveau de chaque partie de l'ouvrage l'agressivité du site.

7.2.4 - Prévention vis-à-vis des risques de gonflement du béton

Le maître d'ouvrage doit indiquer ses exigences traduisant sa stratégie de prévention vis-à-vis des risques potentiels de gonflement du béton.

7.2.4.1 - Prévention vis-à-vis des risques d'alcali-réaction

La réaction d'alcali-réaction peut se développer dans des parties d'ouvrage en contact avec l'eau ou situées dans une ambiance dont l'hygrométrie relative est supérieure à 80 %.

Les principes de prévention de cette réaction sont définis dans les "Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction"(LCPC-1994).

Le maître d'ouvrage doit préciser le type d'ouvrage (type I / type II / type III) et pour chaque partie d'ouvrage la classe d'exposition (classe 1 / classe 2 / classe 3 / classe 4).

7.2.4.2 - Prévention vis-à-vis des risques de réaction sulfatique interne

Le phénomène de réaction sulfatique interne (ou de formation d'ettringite différée) peut apparaître dans des "pièces critiques" dont le béton a subi un échauffement important dans les heures ou les jours qui suivent sa mise en place et qui sont ensuite en contact prolongé avec l'eau ou soumises à un taux d'humidité élevé.

Les principes de prévention de cette réaction sont définis dans les "Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne" (LCPC 2007).

Le maître d'ouvrage doit sélectionner les "pièces critiques" susceptibles d'être soumises à la réaction, choisir la catégorie d'ouvrage (catégorie I/ catégorie II/ catégorie III) et pour chaque "pièce critique" sélectionnée, préciser la classe d'exposition, spécifique à la réaction sulfatique interne, à considérer (XH1 / XH2 / XH3).

7.2.5 Données climatiques spécifiques au site

Parmi les diverses données climatiques spécifiques au site dans lequel est implanté l'ouvrage, certaines telles que celles relatives à la neige, à la température et au vent sont nécessaires pour le dimensionnement de l'ouvrage. Elles peuvent aussi permettre de sélectionner les matériaux et les dispositions constructives les mieux adaptés pour assurer la pérennité de la structure.

Nota 1 : L'Annexe Nationale de la norme NF EN 1991-5 récapitule (tableau 6.0.2) les valeurs des températures extrêmes (T_{max} , T_{min}) de l'air sous abri en France métropolitaine pour chaque département.

Vis-à-vis de la durabilité du béton, le maître d'ouvrage doit préciser tous les paramètres liés à l'humidité et l'hygrométrie et les conditions d'exposition à l'eau de chaque partie d'ouvrage. Ces paramètres permettent de déterminer les classes d'exposition à spécifier.



Chapitre

8

Exigences à prendre en compte pour le choix du ciment

- 8.1 - Exigences à prendre en compte
au niveau de la conception**
- 8.2 - Exigences à prendre en compte
au niveau de la réalisation**

8 - Exigences à prendre en compte pour le choix du ciment

Principales exigences à prendre en compte pour le choix du ciment

Au niveau de la conception	Durée d'utilisation de l'ouvrage
	Catégorie ou type d'ouvrage : Alcali-réaction / RSI
	Géométrie et forme des parties d'ouvrage
	Exigences esthétiques
	Exigences liées à l'environnement de l'ouvrage : classes d'exposition XC/XS/XF/XD/XA
Au niveau de la réalisation	Exigences liées aux performances du béton durci : 28 jours, ...
	Exigences liées aux caractéristiques du béton frais : affaissement...
	Exigences liées aux conditions de fabrication et de transport du béton
	Exigences liées aux techniques de construction et aux méthodes de coulage : pompage, béton autoplaçant, ...
	Exigences liées aux contraintes climatiques : bétonnage par temps chaud, par temps froid...

Les objectifs à atteindre pour les bétons sont devenus plus diversifiés et plus précis, allant de la rapidité d'exécution de l'ouvrage à sa durabilité à très long terme. La formulation des bétons et le choix du ciment résultent donc d'un compromis satisfaisant entre de nombreuses exigences.

8.1 - Exigences à prendre en compte au niveau de la conception

- > Exigences liées à la durée d'utilisation de l'ouvrage : 50 ans, 100 ans...
- > Exigences liées à l'environnement de l'ouvrage en phase d'utilisation. Les diverses agressions ou attaques auxquelles va être soumis l'ouvrage au cours de sa durée d'utilisation sont regroupées dans le cadre de la norme NF EN 206-1 en classes d'exposition. Le béton doit, entre autre, résister aux effets des cycles gel/dégel, à l'alcali-réaction, aux agressions chimiques, à la carbonatation, à l'attaque des chlorures...
- > Exigences liées aux préventions vis-à-vis des risques de désordres dus à la réaction sulfatique interne.
- > Exigences de limitation de la fissuration, du retrait ou du fluage. Les paramètres liés aux variations dimensionnelles du béton (retrait plastique, retrait endogène, retrait thermique) ont une incidence sur la formulation.
- > Exigences relatives à la compacité, à la perméabilité à l'air, à l'eau ou au gaz, sont à considérer pour certains ouvrages.
- > Exigences liées à la qualité des parements, à l'esthétisme de l'ouvrage et à son intégration dans l'environnement et exigences visant à assurer la régularité d'aspect des parements en béton.
Les multiples techniques de traitement de surface permettent d'offrir pour les parements une gamme de teintes et de textures. Il convient de choisir le ciment en fonction de sa teinte.
- > Exigences liées à la géométrie et à la forme de l'ouvrage. La géométrie de l'ouvrage à réaliser impose souvent la valeur D_{\max} des granulats. Le D_{\max} peut être limité par la valeur de l'enrobage des armatures et par l'entraxe des armatures.

8.2 - Exigences à prendre en compte au niveau de la réalisation

- > Exigences liées aux caractéristiques du béton frais. L'ouvrabilité du béton (mesurée par l'essai au cône d'Abrams) permet de caractériser la mise en œuvre du béton. Une ouvrabilité adaptée assure un parfait remplissage des coffrages sans risque de ségrégation.
- > Exigences liées aux propriétés du béton durci. Le paramètre fondamental est la résistance en compression. C'est la résistance caractéristique à 28 jours mesurée sur éprouvette cylindrique qui est prise en compte pour le dimensionnement. Pour de nombreux chantiers, il est nécessaire d'avoir des résistances importantes à des échéances plus courtes (1 jour, 2 jours par exemple).

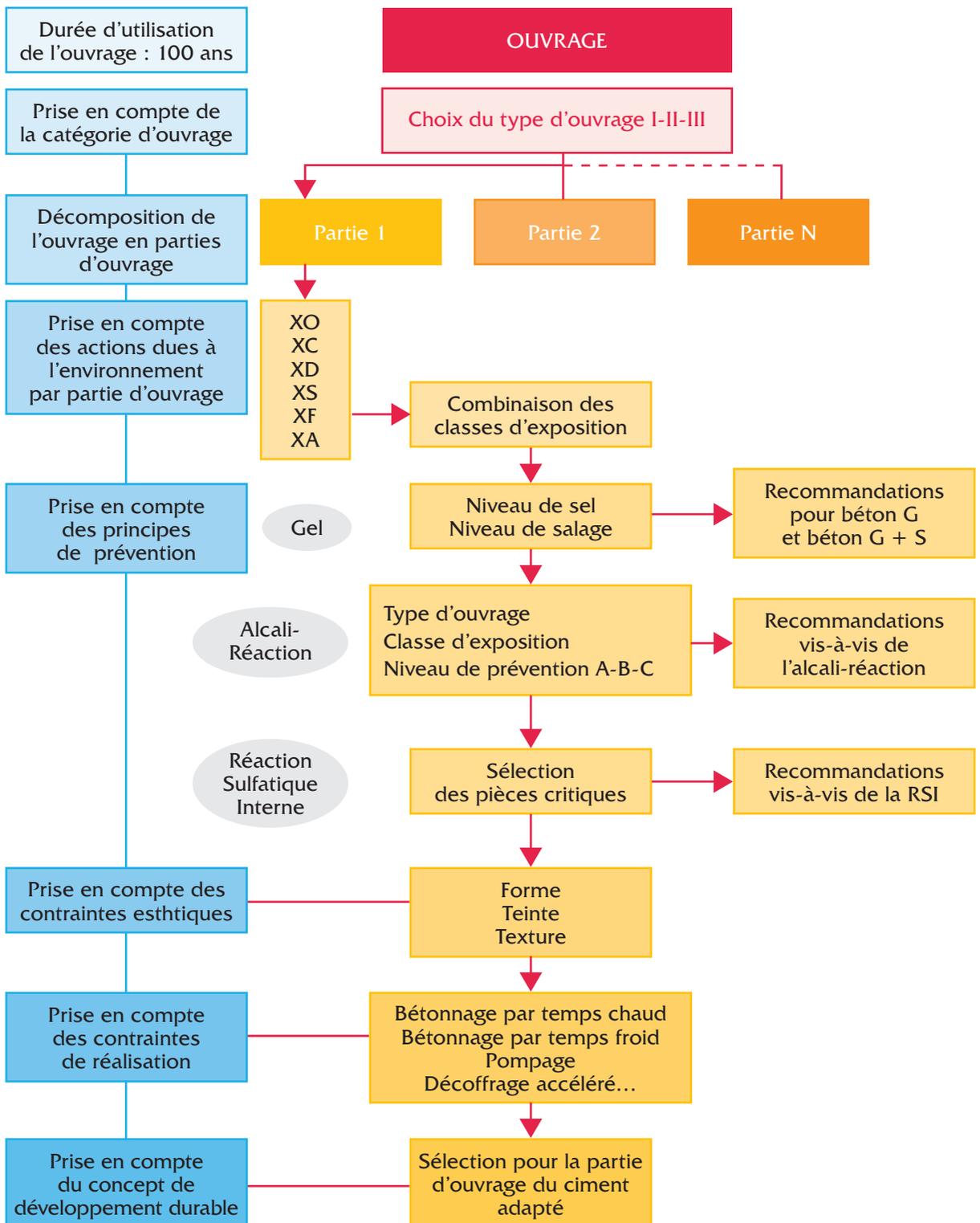
- > Exigences liées aux méthodes et techniques de construction : coffrage grim pant, coffrage glissant, coffrage fixe...
- > Exigences liées aux conditions de fabrication, de transport et de mise en œuvre du béton. Les conditions et les délais de transport du béton sont des paramètres à connaître pour sa formulation. Il est nécessaire de tenir compte aussi des caractéristiques des moyens de vibration utilisés sur le chantier.
- > Exigences liées aux méthodes de bétonnage : pompage, mise en place à la benne, au tube plongeur...
- > Exigences liées aux types de coffrages : coffrage bois, métallique, moule à base de produit de synthèse... et aux agents de démoulage : huile, cire...
- > Exigences liées aux méthodes d'exécution et aux cadences du chantier.
- > Exigences liées aux contraintes climatiques : la formulation du béton doit prendre en compte les conditions climatiques (temps chaud, temps froid) lors de la réalisation de l'ouvrage. La réaction d'hydratation du ciment provoque un dégagement de chaleur, la formulation du béton doit donc tenir compte, en particulier pour le bétonnage de pièces de grandes dimensions, des dégagements de chaleur et des échanges thermiques avec l'extérieur.
- > L'ouvrage doit être conçu de manière à éviter de créer des zones d'accumulations et de stagnations d'eau et des cheminements préférentiels des ruissellements.
- > Le respect des valeurs d'enrobage des armatures permet de maîtriser le phénomène de corrosion des armatures.
- > Les dispositions constructives des ouvrages influent sur la facilité de mise en œuvre du béton.
- > 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 ses performances.

Un béton dont la formulation est conforme aux valeurs limites spécifiées (type, classe et dosage en ciment, dosage en eau...) est capable de satisfaire les exigences de durabilité si, en particulier :

- Les classes d'exposition ont été correctement sélectionnées ;
- L'épaisseur de béton recouvrant l'armature est adaptée aux conditions environnementales et à la durée d'utilisation de l'ouvrage ;
- Il est correctement mis en place, vibré et soumis à une cure adaptée ;
- La maintenance préventive de la structure est réalisée.

Une conception, une réalisation et une maintenance adaptées sont indispensables pour que le béton conserve ses propriétés et ses performances dans le temps.

Synoptique de la démarche à suivre pour la prescription des ciments pour des constructions durables



CIM *béton*

CENTRE D'INFORMATION SUR
LE CIMENT ET SES APPLICATIONS



7, place de la Défense • 92974 Paris-la-Défense Cedex • Tél. 01 55 23 01 00 • Fax 01 55 23 01 10

e-mail : centrinfo@cimbeton.net • internet : www.infociments.fr