

Durabilité des ouvrages en béton

1.1 Notions de durabilité des béton

1.2 Phénomènes influents sur la durabilité

1.3 Recommandations pour la durabilité des bétons

1.1 Notions de durabilité des bétons

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...) c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétisme. Il doit satisfaire, avec un niveau constant, les besoins des utilisateurs au cours de sa durée de service.

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 de service de l'ouvrage (ou durée d'utilisation de projet). La prise en compte de cette durabilité permet de valider et de justifier la rentabilité de l'investissement.

La durabilité directement liée à l'environnement immédiat ou futur des ouvrages et partie d'ouvrage est aujourd'hui le paramètre important à considérer pour optimiser la résistance des bétons aux influences externes : intempéries, agressivité des sols, atmosphères chimiquement agressives.

La seule durabilité intrinsèque du béton ne suffit plus à garantir la durée de service de l'ouvrage. Prescrire un béton durable nécessite donc d'apprécier, dès sa conception, l'ensemble des contraintes environnementales, des agressions et des attaques potentielles, qu'il aura à subir pendant toute sa durée de service, et de respecter et mettre en œuvre les recommandations en vigueur.

Il convient de ne pas assimiler la durabilité d'un produit de construction à celle de l'ouvrage. En effet, il est inutile de formuler un béton intrinsèquement durable, si sa mise en œuvre au sein de la structure n'est pas conforme aux règles de l'art et si les diverses sollicitations auxquelles il est soumis n'ont pas été correctement appréciées, ce qui conduirait à ce que l'ouvrage ne remplisse pas durablement sa fonction pendant sa durée de service requise.



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

Aujourd'hui, la durabilité est appréhendée en considérant un ensemble de propriétés dont, bien sûr, la résistance mécanique à 28 jours. Les autres caractéristiques prises en compte visent à assurer l'adéquation entre les propriétés physico-chimiques

du béton et les contraintes qui s'appliquent à l'ouvrage. Les caractéristiques à prescrire pour garantir la pérennité des ouvrages sont désormais plus complètes et plus précises.

La notion de durabilité d'un ouvrage se traduit par un ensemble de spécifications techniques basées sur des méthodes d'essais directes ou indirectes, sur l'expérience et sur des préconisations de mise en œuvre, de fabrication et d'entretien.



Il est possible désormais de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée de service souhaitée. Les spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal des armatures et la teneur maximale en chlorures dans le béton.

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.



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

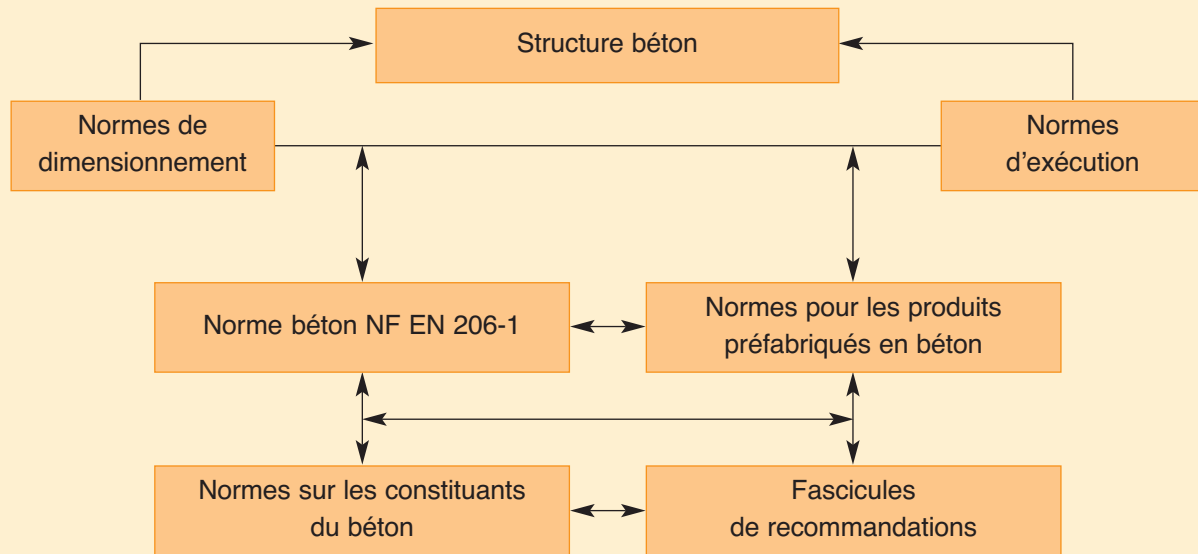
Un nouveau contexte normatif et réglementaire encadre désormais l'utilisation du matériau béton. Les normes et les recommandations constituent un ensemble cohérent, homogène, logique et complet qui permet de prendre en compte, dès la conception, tous les critères de durabilité.

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

Cette évolution s'inscrit dans une logique de progrès visant à optimiser la qualité des bétons et à maîtriser la durabilité des ouvrages.

Un béton durable est un béton compact (présentant une faible porosité) dont les constituants de qualité ont été bien choisis conformément aux normes. Cependant, quelles que soient les précautions prises pour adapter et optimiser sa formulation, il 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.). Pour obtenir la durabilité spécifiée, il convient de respecter les recommandations ou les normes d'exécution des ouvrages tels que le fascicule 65, le DTU 21, ou les normes des produits préfabriqués ainsi que la norme NF EN 13369 pour les produits structuraux.

Le dispositif normatif du béton



Nota

De nombreuses recherches sont en cours pour affiner les méthodes d'évaluation de l'évolution des performances des bétons afin de prévoir avec précision les durées de service des ouvrages. Des travaux réalisés dans le cadre de l'Association Française de Génie Civil (AFGC) ont permis de définir une démarche basée sur l'utilisation d'indicateurs de durabilité. Parallèlement de nombreux modes opératoires ont été mis au point permettant de caractériser tant la perméabilité du béton que sa résistance à la migration d'éléments chimiques tels que le dioxyde de carbone et les chlorures.

Nota

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

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

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

1.2 Phénomènes influents sur la durabilité

1.2.1 - Mécanismes de corrosion des armatures en acier dans le béton

Dans des conditions normales, les armatures enrobées d'un béton compact et non fissuré sont protégées naturellement des risques de corrosion par un phénomène de passivation qui résulte de la création, à la surface de l'acier, d'une pellicule protectrice $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{CaO}$ (dite de passivation).

Cette pellicule est formée par l'action de la chaux libérée par les silicates de calcium sur l'oxyde de fer. La présence de chaux maintient la basicité du milieu entourant les armatures (l'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique de pH élevé de l'ordre de 12 à 13). Les armatures sont protégées tant qu'elles se trouvent dans un milieu présentant un pH compris entre 9 et 13,5.

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

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

La plus ou moins grande rapidité d'action de ces divers phénomènes est fonction de l'humidité ambiante, de la porosité du béton et de la présence de fissures qui favorisent la diffusion des gaz ou des liquides agressifs. Le diagnostic des ouvrages affectés par une détérioration du béton d'enrobage recouvrant les armatures révèle que les dommages sont dus, dans la grande majorité des cas, à une épaisseur d'enrobage trop mince et/ou à un béton d'enrobage trop poreux et pas assez résistant.

■ Carbonatation

La carbonatation du béton par le gaz carbonique de l'air (CO_2) est un phénomène naturel qui n'est pas nocif pour le béton. Au cours de la prise et du durcissement, les ciments se combinent avec l'eau pour former des produits hydratés de caractère basique. Certains de ces produits [KOH , NaOH et Ca(OH)_2] restent dissous dans la solution aqueuse interstitielle du béton (dont le pH est compris entre 12 et 13). Le gaz carbonique contenu dans l'air a tendance à se combiner avec les produits hydratés, en commençant par les bases alcalines dissoutes dans la solution aqueuse interstitielle, en particulier le Ca(OH)_2 , selon une réaction produisant du carbonate de calcium CaCO_3 :



Le milieu basique (pH 12 à 13) se trouve progressivement modifié par la neutralisation de l'alcalinité du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 9, n'assurant plus la protection des armatures et entraînant une dépassement de l'acier (destruction de la couche de passivation), ce qui développe une réaction d'oxydation à la surface des armatures.

La progression de la carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur. Dans un premier temps, la vitesse de propagation est ralentie par la formation des carbonates qui colmatent partiellement la porosité. Elle diminue donc avec la profondeur atteinte. Dans un second temps, la carbonatation a pour conséquence une neutralisation (chute du pH de la solution interstitielle) du milieu de protection des armatures, qui peuvent alors s'oxyder. La cinétique du processus dépend de la teneur en dioxyde de carbone et de la facilité avec laquelle le gaz carbonique pénètre dans les pores du béton.

Cette progression est fonction de paramètres liés aux caractéristiques du béton (nature et dosage du ciment, dosage en eau, porosité et perméabilité) et au milieu environnant. Plus le béton est compact, le dosage en ciment élevé, le rapport eau/ciment faible et la résistance du béton élevée, plus la progression du front de carbonatation est lente. Tout ce qui conduit à diminuer la porosité du béton retarde l'échéance de dépassement des armatures.

L'humidité relative de l'air joue, en particulier, un rôle important : la vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité relative de l'ordre de 60 %, pratiquement nulle en atmosphère sèche ou pour des bétons complètement saturés en eau.

La cinétique et la profondeur de carbonatation d'un béton sont donc fonction de sa composition, de sa structure poreuse, de la classe d'exposition et de l'humidité relative dans laquelle est situé l'ouvrage. Elle dépend aussi de la concentration en dioxyde de carbone et de la température de l'atmosphère environnant.

Pour un béton courant, l'épaisseur de la couche carbonatée augmente proportionnellement à la racine carrée du temps.

De nombreuses études ont démontré que la migration du dioxyde de carbone à travers la texture poreuse du béton est significativement réduite lorsque la compacité du béton d'enrobage est aug-



mentée. La porosité totale du béton et la distribution de la taille des pores sont les paramètres déterminants pour la diffusivité du dioxyde de carbone.

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

■ Action des chlorures

L'action des chlorures est spécifique à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton comme les ouvrages soumis aux sels de déverglaçage ou situés en site maritime (zone de marnage, surfaces soumises aux embruns). Les ions chlorures peuvent pénétrer par diffusion ou migrer par capillarité à l'intérieur du béton, franchir la zone d'enrobage, atteindre les armatures, et provoquer des corrosions (par mécanisme de dissolution du métal suivant une réaction d'oxydoréduction :





d'abord ponctuelle (corrosion par piqûres) puis généralisée à toute la surface de l'acier. La vitesse de pénétration des chlorures dépend aussi de la porosité du béton. Elle décroît lorsque le rapport eau/ciment diminue.

La corrosion s'amorce dès que la teneur en chlorures 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.

■ Effets de la corrosion

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

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

Toutefois, des défauts d'enrobage, des bétons mal vibrés et de ce fait trop poreux, ou des milieux très agressifs, risquent de conduire à une dégradation prématurée de l'armature en acier.

1.2.2 - Action des eaux agressives

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

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

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

■ **Attaques acides**

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

■ **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 alors 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).

Malgré la complexité des réactions chimiques générées par les eaux agressives, l'application de quelques principes de prévention élémentaires respectés au niveau de la formulation du béton (formulation adaptée, dosage en ciment adéquat, faible E/C, béton compact et peu perméable), de la conception de l'ouvrage et lors de sa réalisation (vibration, cure) permettent d'obtenir des bétons résistants durablement dans les milieux agressifs.

Un béton compact et peu perméable

Les qualités intrinsèques du béton, sa compacité et sa perméabilité conditionnent sa durabilité. Le béton

résiste d'autant mieux à l'action des eaux agressives que sa porosité et sa perméabilité sont faibles. Les principaux facteurs prépondérants au niveau de la formulation d'un béton pour obtenir une compacité élevée (donc une faible porosité) sont :

- un dosage en ciment adéquat ;
- une faible teneur en eau ;
- une granulométrie comportant des éléments fins, en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats ;
- l'optimisation de la vibration, du traitement thermique éventuel et de la cure.

Une formulation adaptée

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

Une conception de l'ouvrage adaptée

L'ouvrage doit être conçu de manière à éviter, dans la mesure du possible, de créer des zones d'accumulations et de stagnations d'eau et de cheminements préférentiels dus aux ruissellements.

Une mise en œuvre soignée

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

1.2.3 - 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 de désordres est d'autant plus élevé que le degré de saturation en eau du béton est important. C'est le cas notamment des parties d'ouvrages non protégées des intempéries et en contact direct avec des eaux saturées en sel. Une formulation mal adaptée et une mise en œuvre incorrecte du béton peuvent amplifier les dégradations.

Ce phénomène est aggravé, en surface, par l'application des sels de déverglaçage (ou fondants routiers), qui engendrent un accroissement des

gradients de concentrations en sels, générant ainsi des pressions osmotiques plus élevées.

Les dégradations occasionnées par le gel peuvent être de deux types :

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

Un gradient thermique important au voisinage de la surface, générée 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.

■ Action des cycles gel-dégel

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

Dans la zone atteinte par le gel, des cristaux de glace se forment dans les plus gros capillaires, créant un déséquilibre thermodynamique qui va déclencher une migration de l'eau des capillaires les plus fins vers les capillaires dans lesquels l'eau est gelée (l'eau dans les capillaires les plus fins 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 est considéré aujourd'hui comme la cause principale des



dégradations. Ces pressions (hydrauliques et osmotiques) peuvent localement fissurer la pâte de ciment, si elles sont supérieures à la résistance à la traction de la pâte. Ce sont les modifications répétées et alternées de température (température positive à température négative) qui après un certain nombre de cycles peuvent dégrader le béton. Les dégradations sont le résultat d'un endommagement progressif. Elles dépendent de la vitesse de descente en température, du nombre de cycles et de la durée du gel.

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

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



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

L'agent entraîneur d'air a un double rôle :

- maintenir dans le béton un pourcentage d'air de l'ordre de 3 à 8 % du volume de béton ;
- fractionner les bulles en de nombreuses petites bulles de faibles dimensions (créer le plus grand nombre de bulles de petites dimensions).

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

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. Il condi-

tionne la tenue au gel des bétons formulés avec un agent entraîneur d'air, sa valeur doit être inférieure à des valeurs seuil.

■ Action des sels de déverglacement

La cause principale des dégradations de surface pouvant résulter de la diffusion des sels de déverglacement dans les capillaires du béton est un accroissement des pressions osmotiques.

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

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



1.2.4 - Phénomène d'alcali-réaction

Le phénomène d'alcali-réaction résulte de l'action des alcalins solubles (oxyde de sodium Na_2O et oxyde de potassium K_2O) du béton sur une certaine forme de silice réactive, en présence d'eau. Il correspond à un ensemble de réactions chimiques complexes qui peuvent se déclencher entre certaines phases minérales contenues dans les granulats et la solution interstitielle fortement basique du béton, lorsque plusieurs conditions sont réunies simultanément : présence d'une forme de silice des granulats dite « potentiellement réactive », des alcalins du béton et de l'eau en quantité suffisante.

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 matérialisent en surface par une fissuration orientée selon la direction des aciers.

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

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

Des travaux de recherche importants ont été engagés en France dès le début des années soixante-dix 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, suite aux analyses des données d'observation sur des ouvrages, et des expériences en laboratoires ont permis de mettre en œuvre des mesures préventives qui se sont avérées efficaces. La mise en place d'un ensemble cohérent de recommandations de prévention a enrayé depuis plus de dix ans toute manifestation du phénomène.

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

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

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

- agressions mécaniques dues à l'action des vagues et des marées, abrasion due aux chocs des matériaux flottants et érosion due aux effets des vagues ;



- agressions chimiques dues à l'action des chlorures présents dans l'eau de mer et des sulfates ;
- agressions climatiques dues aux variations de température et éventuellement à des phénomènes de gel-dégel.

Les structures situées en site maritime sont exposées à trois types de configurations. Selon les variations du niveau de la mer, elles peuvent être :

- continuellement immergées (béton situé sous le niveau de la mer à marée basse), les bétons situés dans cette zone sont rarement l'objet de dégradations importantes ;
- continuellement émergées et soumises aux embruns et brouillards marins contenant des chlorures, les bétons situés dans cette zone peuvent subir de légères agressions ;
- alternativement émergées ou immergées en fonction du niveau de la mer (zones de marnage déterminées par les niveaux de marée haute et basse) ou soumises aux éclaboussures provoquées par les vagues, les bétons situés dans cette zone sont les plus agressés.



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

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

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

Les parties d'ouvrages plus particulièrement exposées aux actions de l'eau de mer sont :

- les piles et culées des ponts situées en zone de marnage ;
- les blocs de défense maritime ;
- les murs de quais.

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

Un béton compact et peu perméable

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

Une formulation à base d'un ciment adapté suffisamment dosé

La formulation du béton doit comprendre un ciment de caractéristiques complémentaires PM (Prise Mer), conforme à la norme NF P 15-317 (ciments pour travaux à la mer) ou des ciments à base de laitier.

Le respect des valeurs d'enrobage des armatures

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

Une mise en œuvre et une cure soignées

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

1.2.6 - Phénomène de gonflement interne sulfatique

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, notamment vis-à-vis des caractéristiques du ciment.

Cependant, dans certains cas rares, lorsque le béton subi un échauffement au jeune âge, la formation différée d'ettringite peut avoir lieu sans apport d'ions sulfate externes. Ces réactions sont

susceptibles de provoquer un gonflement 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 pièces massives en béton 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.

On a constaté l'incidence importante :

- de la température du béton lors de sa prise et de ses traitements thermiques ;
- de la teneur en alcalin sur la solubilité de l'ettringite ;
- de l'humidité (l'eau étant un des facteurs fondamentaux de la réaction).

Les cas de structures concernées par cette pathologie sont peu nombreux.

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

• **En utilisant des constituants du béton conformes aux normes afin de limiter l'apport en sulfates.**

1.3 Recommandations pour la durabilité des bétons

En France, des documents spécifiques, recommandations et fascicules de documentation, synthétisent des principes de prévention pour des problématiques de durabilité en complétant les normes européennes.

1.3.1 - Recommandations pour la prévention contre les phénomènes d'alcali-réaction

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 1) et du type d'ouvrage (type I à III – tableau 2) à déterminer le niveau de prévention à atteindre (A, B ou C – tableau 3), puis 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 1 : environnement

Classes	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 fondants
4	Marin

Tableau 2 : 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 3 : niveau de prévention

Types d'ouvrages	Classes 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)**

La mise en place d'un ensemble cohérent de recommandations de prévention a enrayé depuis plus de dix ans toute manifestation du phénomène.

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

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

Les recommandations de niveau national 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 cent ans. Les produits préfabriqués disposant d'une certification intégrant les

* Pour valider une composition, il convient de répondre au moins une fois positivement à l'une des six 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 proportion suffisante ?
- 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) éventuellement autorisés sous réserve que les conditions particulières à leur emploi soient satisfaites, sur la base d'un essai de performance.

risques liés au gel-dégel ne sont pas concernés par ces recommandations.

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 en 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 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.

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

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

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 performanciels sont basés sur des cycles de gel-dégel en présence ou non de sels de déverglaçage.

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

Résistance au gel interne

La résistance au gel du béton dans la masse est évaluée de deux manières suivant le type de béton.

- Béton formulé avec un agent entraîneur d'air. Le facteur d'espacement L (barre) est déterminé dès le stade de la formulation du béton. Il est mesuré sur béton durci selon la norme ASTM C 457 à une échéance de 4 à 5 jours et permet de valider l'efficacité du réseau de bulles d'air entraîné. Les paramètres du réseau de vides d'air dans le béton durci sont déterminés au microscope.
- Béton formulé sans ou avec peu d'agent entraîneur d'air. La résistance au gel interne de ces bétons est évaluée avec l'essai de performance défini dans la norme P 18-424 pour le gel sévère avec un 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 trois mois et demi.

Résistance à l'écaillage

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

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

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

La méthode consiste à définir le type de béton à mettre en œuvre en fonction des niveaux de gel (gel sévère et gel modéré) – niveau précisé dans la carte des zones de gel en France – voir la norme

NF EN 206-1 et le fascicule de documentation P 18-326 et des niveaux de salage (salage peu fréquent, salage fréquent, salage très fréquent) – niveau précisé 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 soumis au gel modéré sans eau avec peu de sels de déverglaçage (salage peu fréquent) ;
- béton soumis au gel modéré en présence de sels de déverglaçage (salage fréquent) ;
- béton soumis au gel sévère sans sels de déverglaçage. Ces bétons sont dénommés béton G (béton formulé pour résister au gel interne seul) ;
- béton soumis au gel modéré et sévère en présence de sels de déverglaçage. Ces bétons sont dénommés béton G + S (béton formulé pour résister au gel interne et à l'action des sels de déverglaçage).

Tableau 4 : types de bétons

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

* Béton adapté : béton conforme aux normes en vigueur, (norme NF EN 206-1 et normes de produit) 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, les recommandations concernent les bétons de résistances caractéristiques à 28 jours inférieures à 50 MPa, formulés avec un entraîneur d'air.

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

Les recommandations distinguent deux classes de BHP en fonction du rapport E/C :

- classe 1 $E/C \geq 0,32$
- 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 réalisations 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.

1.3.3 - 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 résistant 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 à 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 de documentation FD P 18-011 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 définit les modes d'action d'environnements chimiquement agressifs (eaux pures, solutions acides, solutions basiques, solutions salines milieux

gazeux, sols...) et précise, pour ces environnements, les compositions et les caractéristiques des ciments à privilégier.

Pour chaque environnement agressif, correspondant aux classes d'expositions XA1, XA2 et XA3 (définies dans la norme NF EN 206-1), 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 5: recommandations pour le choix du ciment en milieux acides

Classe d'exposition	Choix du ciment
XA1	• 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	• 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	• 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 6: recommandations pour le choix du ciment en milieux contenant des sulfates (solution)

Classe d'exposition	Choix du ciment
XA1	Pas de recommandations particulières
XA2	• (Au-dessous de 1 500 mg/l) ciments conformes à la norme NF P 15-317 (PM) ou NF P 15-319 (ES) • (Au-dessus de 1 500 mg/l) ciments conformes à la norme NF P 15-319 (ES)
XA3	Ciments conformes à la norme NF P 15-319 (ES)

Tableau 7: recommandations pour le choix du ciment en 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 8: recommandations pour le choix du ciment en eaux pures

Classe d'exposition	Choix du ciment
XA1	• CEM III/A, B et C, CEM V/A et B conformes à la norme NF P 15-319,
XA2	• Ciments d'aluminates de calcium conformes à la norme NF EN 14647
XA3	• CEM IV/B conforme à la norme NF EN 197-1

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

De nombreuses recherches, aussi bien au sein du réseau des laboratoires de l'équipement que dans les centres de recherches de l'industrie cimentière et 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 (RSI) 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'ouvrages ;
- 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 ». 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 9, 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 10), (intégrant l'importance



Tableau 9: catégorie d'ouvrages

Catégorie d'ouvrages	Niveau de conséquences d'apparition des désordres	Exemples d'ouvrage ou de partie d'ouvrage
I	Faibles ou acceptables	* Ouvrage en béton de classe de résistance inférieure à C 16/20 * Éléments non porteurs de bâtiment
II	Peu tolérables	* Éléments porteurs de la plupart des bâtiments et les ouvrages de Génie Civil
III	Inacceptables ou quasi inacceptables	* Bâtiments réacteurs de centrales nucléaires * Barrages, tunnels * Ponts et viaducs exceptionnels

Nota

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

Tableau 10: classes d'exposition de la partie d'ouvrage vis-a-vis de la RSI

Classe d'exposition	Description de l'environnement	Exemples informatifs
XH1	Sec ou humidité modérée	* 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	• Alternance d'humidité et de séchage • Humidité élevée	• 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	• En contact durable avec l'eau • Immersion permanente • Stagnation d'eau à la surface • Zone de marnage	• 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 sont complémentaires des 18 classes d'exposition définies dans la norme NF EN 206-1. Elles doivent être spécifiées dans le CCTP pour chaque partie d'ouvrage susceptible d'être soumise au phénomène de RSI.

des paramètres eau et humidité) traduisant l'environnement dans lequel se trouve le béton. À chaque niveau de prévention (As, Bs, Cs, Ds) correspond un niveau de précaution à appliquer.

Il convient alors de mettre en œuvre pour chaque partie d'ouvrage concernée les précautions adaptées à chaque niveau de prévention (tableau 11, obtenu par croisement des classes d'exposition et des catégories d'ouvrages).

Tableau 11 : 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 prévention différents.

Les précautions sont modulées en fonction du niveau de prévention. Elles portent en priorité sur la fabrication, le transport et la mise en œuvre du béton. 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.

À titre d'exemples :

- les précautions à appliquer pour le cas le plus courant, soit le niveau de prévention As, est la suivante : la température $T_{\max}$ 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 $T_{\max}$ doit rester inférieure à 75 °C ;
 - si $T_{\max}$ 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 ;
 - vérification de la durabilité du béton vis-à-vis de la RSI à l'aide de l'essai de performance (LPC n° 59).

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.

Tableau 12 : 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	/	/
Bs	75 °C	85 °C	ou ou – Maîtrise du traitement thermique – ciment adapté – essai de performance
Cs	70 °C	80 °C	ou ou – Maîtrise du traitement thermique – ciment adapté – essai de performance
Ds	65 °C	75 °C	– Ciment adapté – Validation de la formulation par un laboratoire indépendant expert en RSI



- 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 (dans la limite permise par la norme NF EN 206-1) afin de diminuer l'exothermie de 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 pas favorable pour limiter la température du béton au jeune âge.

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.

- 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 serpents dans le béton dans lesquels on fait circuler de l'eau fraîche) et/ou 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, qui

soit représentatif des phénomènes observés dans des cas réels et adaptés aux conditions d'exécution, tels que le cycle de traitement thermique appliqué au béton lors de l'étuvage en usine de préfabrication et l'échauffement d'une pièce massive, 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 aussi (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. Il comprend une succession d'étapes :

- le dégagement de chaleur induit par le ciment à partir de données propres en particulier à son dosage et sa chaleur d'hydratation ;
- la présence éventuelle d'additions minérales ;
- les déperditions thermiques.

Tableau 13 : recommandation sur le choix des ciments vis-à-vis de la RSI, selon le niveau de prévention

Niveau de prévention	Ciment adapté
Bs	• Ciment conforme à la norme NF P 15-319 (ES) ⁽¹⁾ • CEM II/B-V, CEM II/B-S, CEM II/B-C, CEM II/B-M (S-V), CEM III/A, CEM V ⁽²⁾ • CEM I en combinaison avec cendres volantes, laitiers de haut-fourneau ⁽³⁾ Proportion d'additions supérieure à 20 % ⁽⁴⁾
Cs	• Ciment conforme à la norme NF P 15-319 (ES) ⁽¹⁾ • CEM II/B-V, CEM II/B-S, CEM II/B-C, CEM II/B-M (S-V), CEM III/A, CEM V ⁽²⁾ • CEM I en combinaison avec cendres volantes ou laitiers de haut-fourneau ⁽³⁾ Proportion d'additions supérieure à 20 % ⁽⁴⁾
Ds	Ciment conforme à la norme NF P 15-319 (ES) ⁽¹⁾

1. Dans le cas CEM I et CEM III/A. Teneur en alcalins équivalents actifs du béton limitée à 3 kg/m³.

2. Ciment avec teneur en SO₃ inférieure à 3 % et dont le C₃A du clinker est inférieur à 8 %.

3. Le CEM I doit respecter C₃A (rapporté au ciment) inférieure à 8 % et SO₃ inférieure à 3 %.

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