



Chapitre

4

Durabilité des bétons soumis au gel et aux sels de déverglaçage

- 4.1 - Mécanismes développés par le gel
et les sels de déverglaçage**
- 4.2 - Document de référence**
- 4.3 - Principes de prévention**

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

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

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

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

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

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

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

Nota

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



L'action des cycles gel-dégel

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

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

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

L'action des sels de déverglaçage

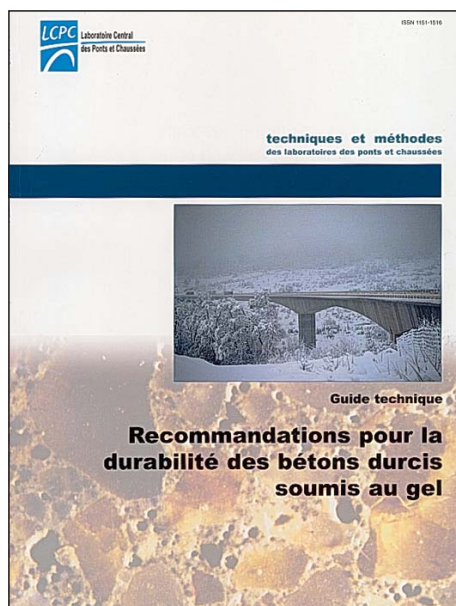
Il est admis que la cause principale des dégradations de surface pouvant résulter de la diffusion des sels de déverglaçage dans les capillaires du béton est un accroissement des pressions osmotiques.

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

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

4.2 - Document de référence

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





Ces recommandations de niveau national traitent de la durabilité du béton pour l'ensemble de la France. Elles sont issues de recherches et de nombreux retours d'expériences acquises sur un grand nombre d'ouvrages ainsi que de l'évolution des connaissances et des composants des bétons. Elles ont été mises au point par des experts du réseau scientifique et technique du ministère de l'équipement, des

professions cimentières, du béton prêt à l'emploi, de l'industrie du béton préfabriqué et des Fédérations Nationales des Travaux Publics et du Bâtiment, à partir d'un document proposé par le groupe Rhône Alpes.

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

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

Elles permettent :

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

Elles concernent les ouvrages soumis :

- au gel pur ;
- au gel pur en présence de sels de déverglaçage.

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

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

4.3 - Principes de prévention

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

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

- Le béton résiste d'autant mieux,
 - que sa compacité et sa résistance mécanique, en particulier en traction, sont élevées ;
 - que son degré de saturation en eau est faible ;
 - qu'il est imperméable et ne se laisse pas saturer par les sels de déverglaçage ;
 - que le réseau de bulles d'air est adapté à la quantité d'eau gelable.
- Le béton doit être compact (rapport E/C faible et dosage en ciment élevé), présenter lorsque nécessaire un réseau de bulles d'air approprié, et être formulé en utilisant des granulats non gélifs.

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

Nota

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

4.3.1 - Notion de facteur d'espacement des bulles

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

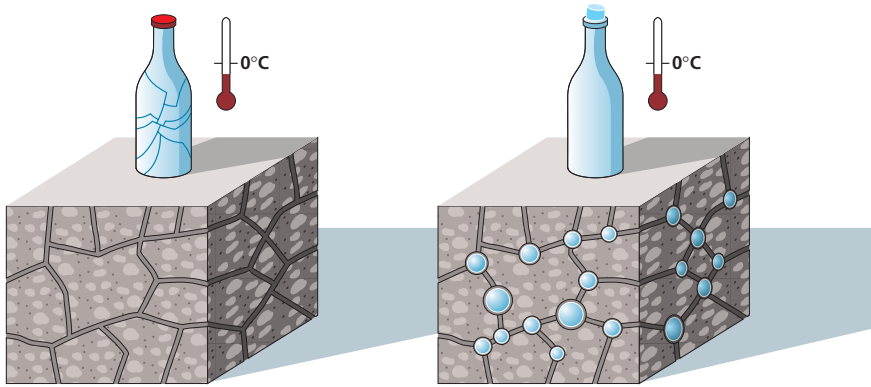


Fig.1 : La création d'un réseau bien réparti de micro-bulles d'air, accroît la résistance au gel de certains types de bétons en diminuant les tensions internes dans les capillaires.

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

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

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

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

Nota

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

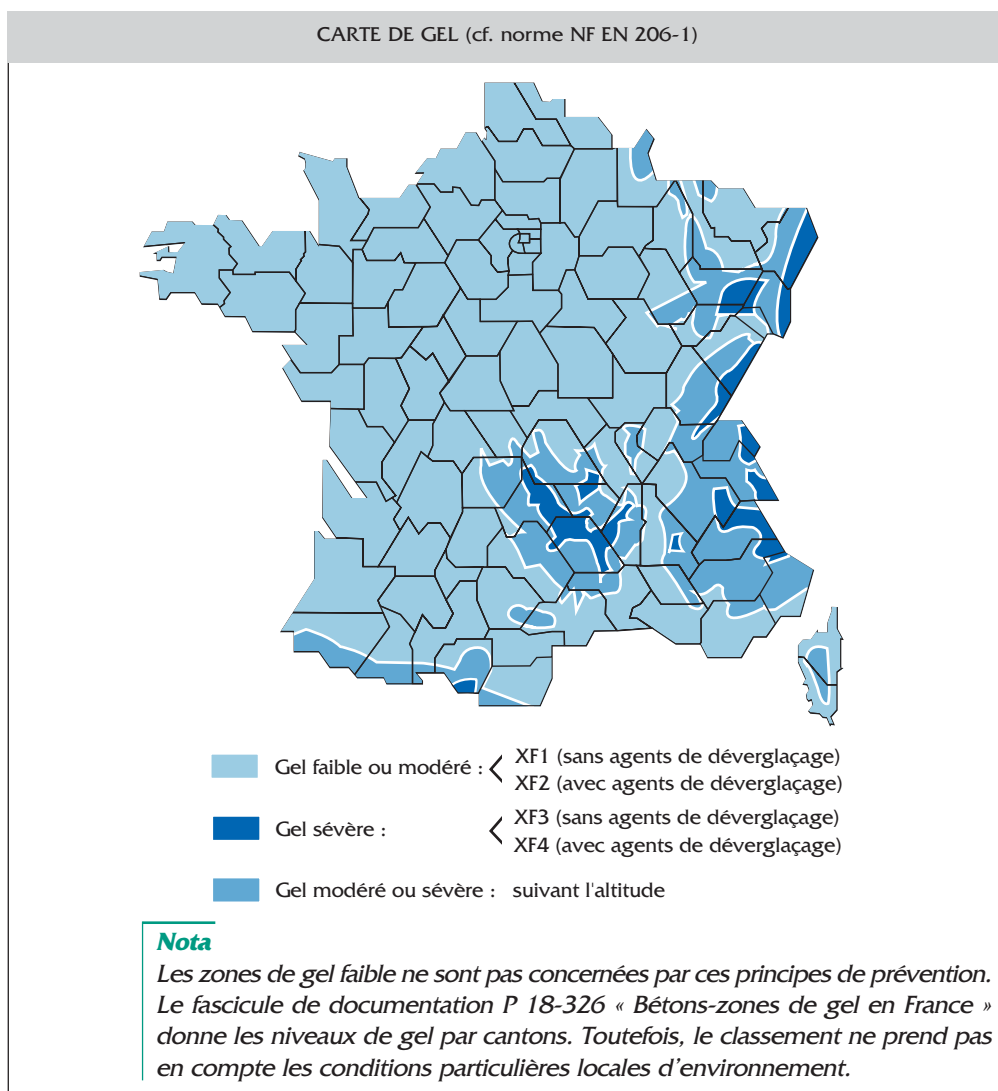
Un réseau efficace de bulles d'air est caractérisé par deux paramètres :

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

4.3.2 - Niveaux de gel

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

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



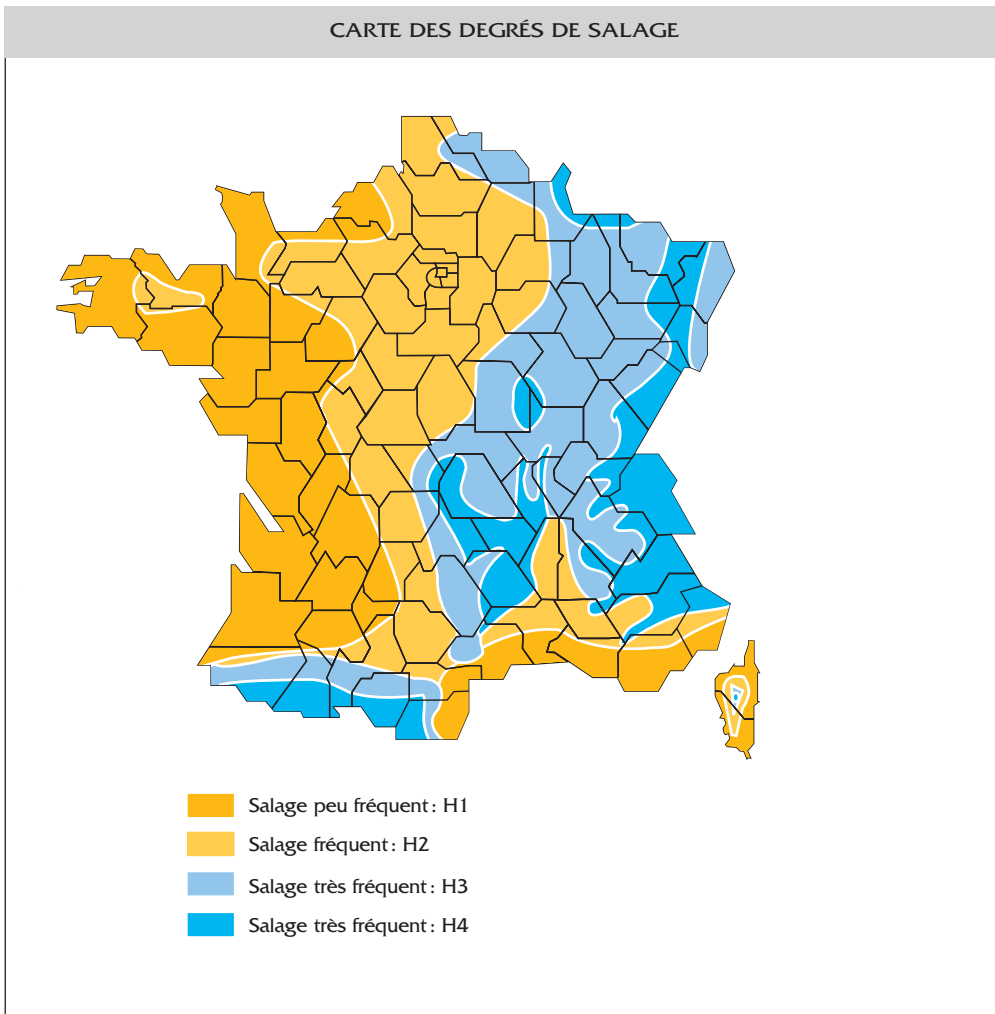
4.3.3 - Niveaux de salage

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

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

n = nombre de jours de salage :

- salage peu fréquent n < 10;
- salage fréquent 10 ≤ n < 30;
- salage très fréquent n ≥ 30.



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

4.3.4 - Degrés de saturation en eau du béton

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

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

• **forte saturation en eau :**

- surfaces horizontales exposées à la pluie et au gel avec ou sans sel de déverglaçage ;
- surfaces verticales exposées au gel et directement soumises aux projections des sels de déverglaçage ;

• **saturation en eau modérée :**

surfaces verticales de béton exposées à la pluie, au gel ainsi qu'au gel et à l'air véhiculant des sels de déverglaçage ou des brouillards salins.

4.3.5 - Classes d'exposition concernées

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

XF1 : saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage.

XF2 : saturation modérée en eau avec agents de déverglaçage.

XF3 : forte saturation en eau, sans agent de déverglaçage.

XF4 : forte saturation en eau, avec agents de déverglaçage ou de mer.

4.3.6 - Types d'ouvrages concernés

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

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

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

Nota

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

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

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

4.3.7 - Quatre types de béton soumis au gel

Selon le niveau de gel auquel est soumis l'ouvrage, le degré de saturation du béton et le niveau de salage, on distingue quatre types de bétons :

- béton soumis au gel modéré sans eau avec peu de sels de déverglaçage (salage peu fréquent) ;
- béton soumis au gel modéré en présence de sels de déverglaçage (salage fréquent) ;

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

Tableau n° 14 : classification des différents types de bétons

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

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

4.3.8 - Indicateurs de durabilité

Résistance au gel interne

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

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

Résistance à l'écaillage

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

4.3.9 - Recommandations spécifiques pour l'élaboration des bétons

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

4.3.9.1 Bétons traditionnels

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

Spécifications sur les granulats et sur les ciments

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

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

Le type et la classe des ciments sont strictement limités. Les ciments contenant des cendres volantes sont notamment interdits. La préconisation de ciments PM ou ES est justifiée par la présence de sulfates dans les sels de déverglaçage, en quantité supérieure ou égale à 3 %. Le dosage minimal en ciment est fixé à 385 kg/m³ par les bétons G et G+S.

Spécifications sur les additions

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

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

Caractéristiques exigées sur les bétons traditionnels

Tableau n° 15: caractéristiques exigées sur les bétons		
Caractéristiques	Béton G	Béton G + S
Rapport Eau Efficace/ciment	≤ 0,50	≤ 0,45
Résistance caractéristique en compression	≥ 30 MPa	≥ 35 MPa
Facteur d'espacement		
L (barre)		
- étude et convenance	≤ 250 µm	≤ 200 µm
- contrôle	≤ 300 µm	≤ 250 µm
Écaillage		
- étude et convenance	Sans objet	≤ 600 g/m ²
- contrôle	Sans objet	≤ 750 g/m ²

Nota

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

4.3.9.2 - Bétons à Hautes Performances

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

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

- classe 1 E/C ≥ 0,32
- classe 2 E/C < 0,32

et 2 types de formulations :

- béton formulé sans entraîneur d'air ;
- béton formulé avec entraîneur d'air.

Spécifications sur les granulats et les ciments

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

Spécifications sur les additions

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

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

Caractéristiques exigées sur les bétons

Tableau n° 16: caractéristiques exigées sur les bétons

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

Nota

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

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

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

- gel modéré, quel que soit le degré de saturation en eau du béton;
- gel sévère avec une saturation modérée en eau du béton.

Informations complémentaires concernant les bétons traditionnels et les BHP

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



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

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

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