

DURABILITÉ DES BÉTONS DURCIS SOUMIS AU GEL

Jacques PROST

Consultant

1. GÉNÉRALITÉS

Beaucoup de gestionnaires d'ouvrages sont confrontés aux conséquences, quelquefois très pénalisantes, des cycles gel-dégel sur la durabilité du béton. Murs de soutènement, ouvrages d'art, structures de génie civil des remontées mécaniques, et même certains bâtiments, construits avec des bétons inadaptés, sont ainsi fortement agressés. La nécessité de maintenir une bonne viabilité hivernale des itinéraires routiers et autoroutiers, les automobilistes ne souhaitant plus circuler autrement que sur des routes dégagées de toute trace de neige ou de glace, oblige à répandre sur les chaussées, à titres préventif et curatif, d'importantes quantités de sels de déverglaçage, appelés aussi fondants routiers. La combinaison des cycles gel-dégel et des sels de déverglaçage aggrave notablement les dégradations du béton. Les ponts et les têtes de tunnels n'échappent malheureusement pas à ce salage généralisé.

Il ne faut pas imaginer que seules les structures construites en altitude subissent les dégradations dues au gel. Certaines régions, classées en gel modéré, sont également concernées notamment du fait d'une fréquence plus élevée des cycles gel-dégel. On constate assez fréquemment dans ces régions une dégradation de surface des bétons par écaillage.

Les cycles gel-dégel répétés peuvent provoquer deux types de dégradations :

- Une microfissuration dans la masse du béton, voire une fissuration, et un gonflement, c'est le gel interne (cf. photo 1).



*Photo 1
Gel interne d'un élément de corniche*

- Une dégradation de surface, sous l'effet conjugué des cycles gel-dégel et des sels de déverglaçage, c'est l'écaillage. Cette dégradation se traduit par une perte de matériaux sous forme d'écaillés de la matrice cimentaire et/ou de granulats plus ou moins importantes (cf. photos 2 et 3).

Ces deux formes de dégradations sont indépendantes l'une de l'autre, mais elles peuvent se produire de façon simultanée.



Photo 2

Ecaillage d'une longrine de scellement de garde-corps



Photo 3

Zoom sur une zone écaillée

Il n'est donc plus possible de construire les infrastructures routières sans essayer d'améliorer la qualité et la durabilité du béton.

2. ÉVOLUTION DES RECOMMANDATIONS

Le LCPC a publié en décembre 2003 un guide technique de niveau national concernant les "Recommandations sur la durabilité des bétons durcis soumis au gel". Ce document est le fruit des échanges fructueux et d'une franche coopération entre plusieurs experts représentant les principaux acteurs de la construction dans le domaine du génie civil et du bâtiment. Ces experts ont travaillé pendant plus d'une année à partir d'un projet rédigé par un groupe de travail régional connu sous le nom de Groupe Rhône-Alpes (GRA). Le document tient compte des retours d'expériences acquises au cours des dix dernières années et des résultats des recherches récentes. Aujourd'hui en effet, on constate que les parties d'ouvrages construites avec des bétons formulés suivant les recommandations du GRA, notamment celles relatives aux agents entraîneurs d'air, qu'il s'agisse des corniches, des longrines d'ancrage des dispositifs de sécurité, des piles, des culées et des murs de soutènement, pour ne citer qu'eux, présentent un très bon comportement aux cycles gel-dégel en présence de sels de déverglaçage, dix ou douze ans après leur réalisation.

Les "Recommandations sur la durabilité des bétons durcis soumis au gel" sont désormais généralisées au plan national, après que les spécifications existantes aient été adaptées à l'environnement des différentes régions françaises. Elles remplacent désormais les *Recommandations spécifiques à l'élaboration des bétons pour les parties d'ouvrages non protégées des intempéries et soumises à l'action du gel* publiées par le GRA en mars 1992, qui n'avaient qu'une portée régionale, même si elles étaient utilisées dans d'autres régions concernées par les effets du gel.

Tous les bétons sont concernés par ces nouvelles recommandations, qu'il s'agisse des bétons fabriqués sur le chantier, en centrales BPE ou dans les usines de préfabrication.

Elles visent toutefois principalement les bétons des ouvrages d'art, dont la durée de vie souhaitée est de 100 ans. Le niveau des exigences est adapté aux ouvrages relevant du fascicule 65-A, ayant une importance stratégique tant du point de vue de la gestion de la route que vis-à-vis de la sécurité des usagers.

Elles sont imposées dans la version en cours de révision du fascicule 65-A pour les marchés publics et peuvent s'appliquer aux marchés privés, à condition qu'elles soient spécifiées dans le marché.

Elles ne s'appliquent pas, par contre, aux éléments préfabriqués en usine satisfaisant aux exigences des textes normatifs en vigueur prévoyant les conditions d'environnement définies dans les Recommandations et bénéficiant d'une certification. A titre d'exemple citons les éléments architecturaux en béton fabriqués en usine, certifiés Qualif-IB, qui doivent être conformes au cahier des charges "Éléments architecturaux en béton fabriqués en usine" de septembre 1996 et à son additif de septembre 2002 qui introduit les exigences

de durabilité vis-à-vis du gel-dégel. Cet additif permet d'étendre à cette caractéristique le champ des performances certifiées par le Qualif-IB Eléments architecturaux en béton fabriqués en usine.

Lorsque l'application des Recommandations est prévue dans le marché, celui-ci doit préciser les données caractérisant l'environnement dans lequel sont situées les différentes parties d'ouvrage à savoir le niveau de gel, le degré de saturation du béton en eau et le niveau de salage ainsi que les classes d'exposition, en particulier les classes XF, de la norme NF EN 206-1.

3. CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES ET CHOIX DU BÉTON ADAPTÉ

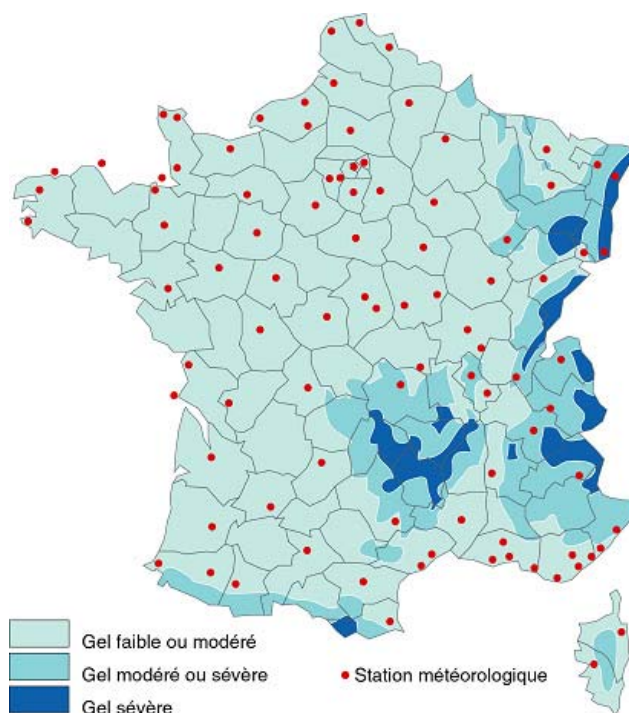
Les Recommandations précisent ces trois conditions environnementales et donnent :

1) La carte des risques de gel pour la France métropolitaine, issue de la norme XP P 18-305 qui figure également dans la norme NF EN 206-1.

Les Recommandations font aussi référence à la liste des cantons, pour chacun desquels est attribuée une classe d'exposition, issue également de la norme XP P 18-305. Cette liste est publiée dans le fascicule de documentation FD P 18-326.

environnement des ouvrages - niveaux de gel

- sévère : plus de 10 jours par an avec une température < -10°C
- faible : moins de 3 jours par an avec une température < -5°C : (non concerné par les recommandations)
- modéré : entre faible et sévère

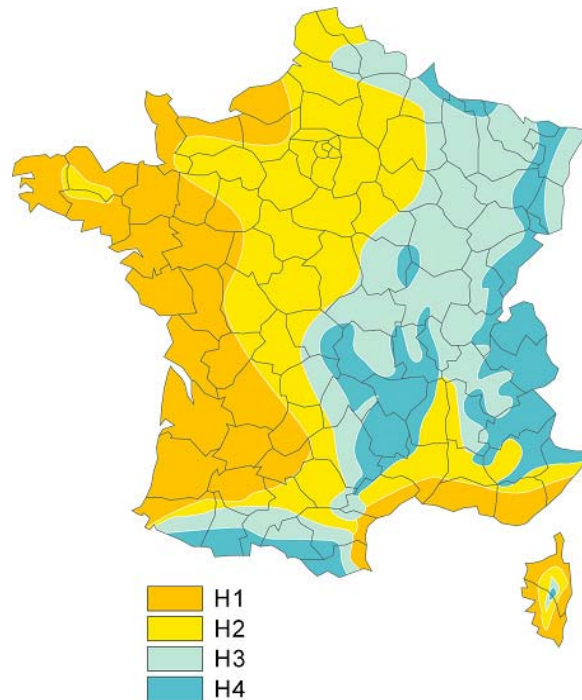


2) La carte de la France métropolitaine avec les zones de rigueur hivernale établie par le SETRA (cf. guide pratique "Aide à l'élaboration des Dossiers d'Organisation de la Viabilité Hivernale - DOVH -" de novembre 1994) et les niveaux de salage en nombre de jours de salage annuel.

environnement des ouvrages - niveaux de salage

- H1 : salage peu fréquent $n < 10$
- H2 : salage fréquent $n \leq 30$
- H3 et H4 : salage très fréquent $n > 30$

avec H1 zone à hiver clément
H2 zone à hiver peu rigoureux
H3 zone à hiver assez rigoureux
H4 zone à hiver rigoureux



Un tableau indique, à titre d'information, la correspondance entre les classes d'environnement de la norme XP P 18-305, celles du fascicule 65-A version d'août 2000 et les classes d'exposition XF de la norme NF EN 206-1 pour les bétons soumis aux cycles gel-dégel en présence ou non de sels de déverglaçage.

Classes d'environnement et classes d'exposition		Type de gel	
		modéré	sévère
type de salage	peu fréquent	EA 1 XF ₁ 2b ₁	EA 2 XF ₃ EB 2 2b ₂
	fréquent	EB 2 XF ₂ ou XF ₄ 3	ED 2 XF ₄ 3
	très fréquent	EC 2 ED 2 3 ou 4b	EC2 ED 2 3 ou 4b
EA, EB, etc. classes d'environnement du fascicule 65-A version août 2000 2b, 3, etc. classes d'environnement de la norme XP P 18-305 XF classes d'exposition de la norme NF EN 206-1.			

3) Le degré de saturation en eau du béton, qui est une notion nouvelle introduite par la norme NF EN 206-1. Deux niveaux sont prévus à savoir fort et modéré mais la norme ne fixe pas de seuil pour chacun d'eux.

Le classement est fait selon l'exposition des faces soumises aux intempéries et aux rejaillissements des sels de déverglaçage. Les Recommandations attribuent un niveau de saturation en eau aux parties d'ouvrages, comme l'indique la norme et également en fonction du niveau de gel auquel elles sont soumises (cf. alinéa du chapitre 5 traitant des normes d'essais).

Les Recommandations classent les bétons en deux catégories, les bétons **G** qui doivent être formulés pour résister au gel interne et les bétons **G+S** qui doivent l'être pour résister aux effets conjugués du gel interne et des sels de déverglaçage.

Autrement dit, un béton devant résister à l'écaillage doit en premier lieu résister au gel interne.

Un tableau, reproduit ci-dessous, permet de choisir le type de béton **G** et/ou **G+S** en fonction du type de gel et du niveau de salage.

choix du type de béton		type de gel	
		modéré	sévère
type de salage	peu fréquent	béton approprié	béton G
	fréquent	béton approprié teneur en air minimale = 4 % ou essais de durabilité au gel	béton G+S
	très fréquent	béton G+S	béton G+S

Ce tableau montre également que les bétons soumis à l'action du gel modéré en présence d'un niveau de salage peu fréquent et fréquent ne sont pas concernés par les Recommandations LCPC. Les bétons soumis au gel modéré et à un salage peu fréquent doivent avoir une composition appropriée et notamment un rapport E/C inférieur à 0,60 et bien maîtrisé. Les bétons soumis au gel modéré et à un salage fréquent doivent, quant à eux, répondre aux exigences de la norme NF EN 206-1 pour ce qui concerne la valeur minimale de la quantité d'air entraîné soit 4 %. A défaut d'utiliser un agent entraîneur d'air, le béton pourra être soumis aux essais de durabilité au gel par application des normes d'essais citées au chapitre 5.

4. RECOMMANDATIONS D'ORDRE GÉNÉRAL

Le document comprend quatre chapitres : Généralités - Domaine d'application - Recommandations spécifiques à l'élaboration des bétons - Epreuve d'étude, de convenance et de contrôles des bétons.

"Les généralités" donnent quelques éléments sur les mécanismes engendrant les dégradations du béton et sur leur nature.

"Le domaine d'application" sensibilise le lecteur sur les conditions environnementales des ouvrages, précise les parties des ouvrages concernées et permet le choix du béton en fonction du type de gel et du type de salage. En cas de gel sévère, il est recommandé de concevoir les tabliers d'ouvrages en béton **G+S**. En effet, il n'est pas rare de constater des dégradations importantes sur l'extrados des tabliers, en cas de déficience de la chape d'étanchéité. De même, il n'est pas rare de constater des dégradations sur les encorbellements des ouvrages lorsque l'étanchéité ne concerne pas toute la largeur du tablier.

"Le chapitre recommandations spécifiques à l'élaboration des bétons" traite les bétons traditionnels dont la fck 28 est < 50 MPa, les bétons hautes performances dont la fck 28 est ≥ à 50 MPa et les bétons de technologies spécifiques à savoir les bétons à démoulage immédiat, essentiellement utilisés en usines de préfabrication, ainsi que les bétons moulés sur site par machine à coffrage glissant. Quelques informations sont également données sur les bétons projetés.

L'originalité de ce chapitre réside dans le fait que chaque type de béton fait l'objet d'un sous-chapitre entièrement autonome. Ceci présente l'avantage de ne pas être contraint d'aller chercher des informations générales dans d'autres chapitres.

Chaque sous-chapitre donne la définition du béton et quelques informations sur la manière de formuler le béton, le niveau des exigences à demander sur les caractéristiques des différents constituants du béton, les méthodes d'évaluation de la durabilité au gel des bétons, les caractéristiques exigées sur les bétons. Enfin, quelques recommandations concernent les moyens de fabrication du béton, la méthodologie de mise en œuvre et les dispositions constructives, notamment les règles à appliquer en matière d'enrobage des armatures.

"Le chapitre Epreuve d'étude, de convenance et de contrôle des bétons" permet d'une part, d'élaborer le programme d'étude de la formulation du béton et le programme de l'épreuve de convenance qui va permettre de juger de la capacité de la centrale à béton à fabriquer les bétons conformes au marché et d'autre part d'aider l'entreprise à concevoir le programme du contrôle extérieur.

Un point très important concerne l'étude de formulation du béton. En effet, les retours d'expériences montrent qu'il est fortement conseillé de compléter l'épreuve d'étude faite en laboratoire par la fabrication de gâchées en vraie grandeur sur la centrale à béton afin d'ajuster les quantités d'adjuvants, notamment celle de l'entraîneur d'air, afin de respecter la fourchette de la quantité d'air entraîné nécessaire, pour garantir la résistance au gel du béton durci.

En effet, les quantités des adjuvants nécessaires, toutes choses égales par ailleurs, varient notablement entre le laboratoire et le chantier en raison de la différence d'efficacité du malaxage, de la masse du béton malaxée et des conditions de températures.

Un autre point est très important, il concerne la vérification, au cours de l'épreuve de convenance, de la stabilité du réseau des vides d'air pendant le transport et la mise en œuvre du béton. La stabilité sera vérifiée au cours d'une simulation, à la centrale à béton, du temps de transport et de la mise en œuvre du béton.

5. RECOMMANDATIONS SPÉCIFIQUES

Afin d'obtenir des bétons caractérisés par une bonne durabilité vis-à-vis des cycles gel-dégel en présence ou non de sels de déverglaçage, les valeurs limites applicables aux spécifications sont données pour les caractéristiques importantes concernant les constituants des bétons et les bétons à l'état frais et durcis. De même des dispositions constructives précisent les valeurs minimales des enrobages des aciers passifs, en fonction du type de béton et de sa destination : structures de Génie Civil et de bâtiments ou éléments préfabriqués en usine.

Enfin, le guide donne les valeurs des critères d'acceptation des caractéristiques permettant de juger de la durabilité des bétons durcis vis-à-vis du gel.

Caractéristiques et spécifications sur les constituants

Bétons traditionnels	BHP	Bétons à démoulage immédiat	Bétons moulés sur site
Granulats non gélifs			
Ciments : choix limités			
Bétons G : CEM I ou CEM II/A et B sauf CV			+ CEM III/A PM ES
Bétons G+S : CEM I PM ES ou CEM II/A (S,D) PM ES			ou CEM III/B* PM ES
Classes : 42,5 et 52,5	52,5	42,5 et 52,5	32,5 et supérieures
Dosage mini : 385 kg/m ³	385 kg/m ³	340 à 385 kg/m ³ suivant Dmax	330 à 385 kg/m ³ suivant Dmax
Additions : choix limité à S, D et L y compris en %, les CV sont interdites substitution partielle au ciment :			
Oui Bétons G avec CEM I	Non	Oui Bétons G avec CEM I	Non

Commentaires

Les granulats utilisés ne doivent pas être gélifs au sens de la norme NF EN 12-620. Le critère de non gélivité retenu est l'absorption d'eau dont la valeur Ab doit être inférieure ou égale à 1,2 %. Lorsque dans une région la valeur Ab ne peut être obtenue, les granulats doivent satisfaire aux critères de gélivité définis dans la norme, après application de la norme d'essais NF EN 1367-1 - essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altération des granulats - Partie 1 : Détermination de la résistance au gel-dégel.

Le choix des ciments est limité. Pour les bétons G+S, il est nécessaire d'utiliser des ciments PM ou ES pour se prémunir des réactions chimiques vis-à-vis des sulfates contenus dans certains sels de déverglaçage. L'utilisation des ciments contenant des cendres volantes est interdite. Les cendres volantes contiennent des imbrûlés en quantité pouvant atteindre 7 % en masse (cf. norme NF EN 450). Le carbone imbrûlé modifie, en règle générale, l'efficacité des adjuvants. En particulier, il peut "piéger" une fraction importante de la quantité d'air que l'on souhaite incorporer aux bétons.

Les ciments CEM III PM ou ES sont admis pour la fabrication des bétons moulés sur site par machine à coffrage glissant, à condition toutefois que la quantité de laitier soit limitée à 70 %. Cette restriction, excluant bien entendu les CEM III/C, est justifiée car des études ont montré que les ciments contenant des laitiers n'avaient pas un bon comportement à l'écaillage.

Pour ce qui concerne les additions, seuls les laitiers moulés (S), les fumées de silice (D) et les calcaires (L) sont admis. Leur dosage par rapport au poids du ciment est toutefois limité afin d'offrir les meilleures garanties de résistance à l'écaillage.

Caractéristiques et spécifications sur les bétons

Bétons traditionnels	BHP	Bétons à démoulage immédiat	Bétons moulés sur site
Résistance caractéristique fck 28 en MPa :			
Bétons G ≥ 30 Bétons G+S ≥ 35	≥ 50	≥ 30 ≥ 35	≥ 30 ≥ 35
E/C : Bétons G $\geq 0,50$ Bétons G+S $\geq 0,45$	2 classes $\geq 0,32^*$ ou $< 0,32$	2 classes $0,32 \leq E/C \leq 0,45^*$ ou $< 0,32$	$\leq 0,50$ $\leq 0,45$
Agent entraîneur d'air : Obligatoire	*possible	*possible	Obligatoire
Durabilité au gel : Gel interne Lbarre	*possible sinon essai de performance	*possible sinon essai de performance	Lbarre
L'astérisque concerne les valeurs du rapport E/C pour lesquelles il est possible d'utiliser un agent entraîneur d'air.			
Ecaillage (Bétons G+S)			

Commentaires

Le niveau plus élevé de la résistance caractéristique fck 28 pour les bétons G+S s'explique par le souci de réduire le rapport E/C, toutes choses égales par ailleurs, afin d'améliorer la microstructure de la peau du béton pour une meilleure résistance à l'écaillage.

L'utilisation d'un agent entraîneur d'air est obligatoire pour les bétons traditionnels et pour les bétons moulés sur site par machine à coffrage glissant. Elle est préconisée chaque fois que cela est possible pour les BHP et les bétons à démoulage immédiat. Toutefois, cette utilisation est limitée pour ces bétons lorsque l'on souhaite obtenir un niveau de résistance mécanique élevé. Elle est notamment exclue pour les bétons dont le rapport E/C est $< 0,32$.

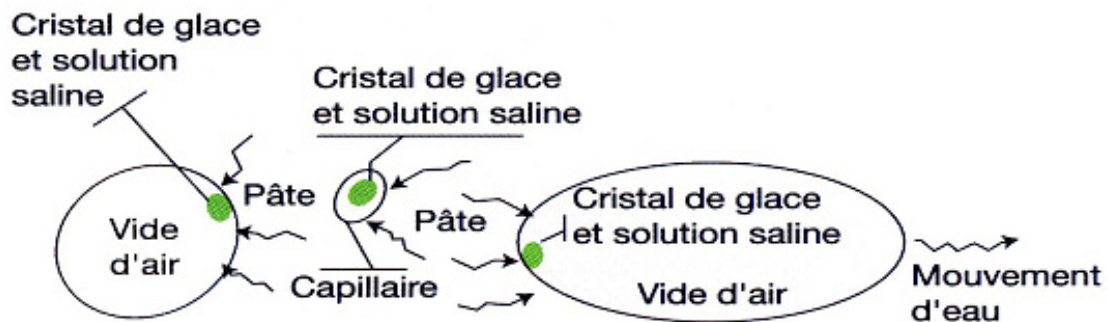
L'agent entraîneur d'air est incorporé au béton durant le malaxage. Cet adjuvant a pour effet de transformer la quantité d'air, induite dans le béton frais par le malaxage, sous forme d'un réseau de petits vides d'air bien structuré. Ces vides d'air, ou bulles d'air, servent de vases d'expansion à une fraction de la solution interstitielle contenue dans les capillaires, lorsque la température du béton descend de quelques degrés au-dessous de 0°C . Rappelons que dans cette hypothèse, une fraction seulement de l'eau interstitielle se transforme en glace, l'autre fraction restant à l'état liquide.

Les méthodes d'évaluation de la durabilité des bétons durcis soumis au gel interne sont différentes suivant que les bétons sont formulés ou non avec un agent entraîneur d'air.

- Béton formulé avec un agent entraîneur d'air

La méthode d'évaluation consiste à déterminer les caractéristiques du réseau de vides d'air, notamment la demi-distance moyenne entre les vides d'air, qui correspond au chemin que doit parcourir la fraction de la solution interstitielle qui n'a pas gelé, sous la poussée de la glace.

Cette demi-distance moyenne entre les vides d'air est appelée facteur d'espacement des vides d'air et plus communément L_{barre} , comme l'indique la figure ci-dessous.



Le facteur d'espacement est déterminé suivant la norme américaine **ASTM C 457-98** - Détermination au microscope des vides d'air et des paramètres du réseau de vides d'air dans le béton durci, Partie 2 - méthode modifiée de comptage par point.

- Béton formulé avec peu ou sans agent entraîneur d'air

Comme cela est dit précédemment les bétons à haute résistance mécanique ne peuvent être formulés avec ce type d'adjuvant. Pour des Bétons dont les performances mécaniques sont moindres, il est quelques fois opportun d'ajouter une faible quantité d'agent entraîneur d'air pour que ces bétons aient un meilleur comportement au gel interne.

Les méthodes d'évaluation consistent à soumettre les bétons durcis à 300 cycles gel-dégel suivant l'une ou l'autre des deux normes suivantes :

Norme P 18-424 - Bétons - Essais de gel sur béton durci. Gel dans l'eau - Dégel dans l'eau.
Cette norme est appliquée dans le cas de gel sévère avec une forte saturation en eau du béton.

Norme P 18-425 - Bétons - Essais de gel sur béton durci. Gel dans l'air - Dégel dans l'eau.
Cette norme est appliquée dans les deux 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.

Ces essais sont appelés essais de performance.

L'évaluation de la durabilité des bétons soumis au gel en présence de sels de déverglaçage est déterminée suivant la norme citée ci-dessous et par application de 56 cycles gel-dégel.

Norme XP P 18-420 - Bétons - Essais d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline.
Cette norme permet d'évaluer le comportement de la peau du béton soumise aux cycles gel-dégel en présence de sels de déverglaçage.

Il est important d'attirer l'attention des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'œuvre et des entreprises sur les délais nécessaires à la réalisation des essais d'écaillage environ trois mois et des essais de performance concernant le gel interne environ 3,5 mois. Par contre, Le facteur d'espacement L_{barre} , permettant l'évaluation de la durabilité au gel des bétons contenant de l'air entraîné, peut être obtenu dans un délai de 5 à 10 jours.

Spécifications exigées sur les bétons durcis pour obtenir une garantie de durabilité au gel

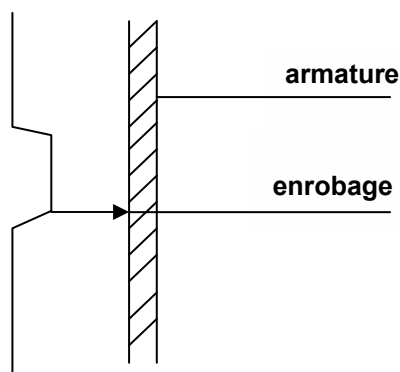
Caractéristiques	Spécifications	
	Béton G	Béton G + S
Bétons formulés avec un agent entraîneur d'air		
Facteur d'espacement Lbarre norme ASTM C 457-98		
- étude et convenance	$\leq 250 \mu\text{m}$	$\leq 200 \mu\text{m}$
- contrôle	$\leq 300 \mu\text{m}$	$\leq 250 \mu\text{m}$
Ecaillage norme XP P 18-420		
- étude et convenance	sans objet	$\leq 600 \text{ g/m}^2$
- contrôle	sans objet	$\leq 750 \text{ g/m}^2$
Bétons formulés sans ou avec peu d'agent entraîneur d'air		
Gel interne norme P 18-424 ou P 18-425		
- étude et convenance		
allongement $\Delta l/l$,	$\leq 400 \mu\text{m/m}$	$\leq 400 \mu\text{m/m}$
rapport du carré des fréquences de résonance		
$f^2_1/f^2_0 \times 100$	≥ 75	≥ 75
- contrôle		
$\Delta l/l$,	$\leq 500 \mu\text{m/m}$	$\leq 500 \mu\text{m/m}$
$f^2_1/f^2_0 \times 100$	≥ 60	≥ 60
Ecaillage norme XP P 18-420		
- étude et convenance	sans objet	$\leq 600 \text{ g/m}^2$
- contrôle	sans objet	$\leq 750 \text{ g/m}^2$

6. DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Les valeurs de l'enrobage minimal des aciers en mm sont données dans le tableau suivant :

	Bétons traditionnels	BHP	Béton à démoulage immédiat
Bétons G	BAEL 91 - article A-7-1		
Bétons G + S			
- cas général	40 (maxi 60)	B50 à B60 35 > B60 30	Sans objet
- éléments préfabriqués en usine	35	B50 à B60 30 > B60 25	Classe 1* < B50 35 B50 à B60 30 Classe 2* > B60 25 *suivant E/C

Les valeurs d'enrobage des armatures doivent être prises en compte dès la conception des ouvrages et/ou des éléments préfabriqués, en particulier pour déterminer les épaisseurs des voiles et la forme des rainures éventuelles. En présence de ces dernières, la valeur minimale de l'enrobage est prise à partir du fond des rainures, comme le montre le croquis ci-dessous.



7. CONCLUSIONS

L'obtention de bétons résistants aux cycles de gel-dégel requiert l'implication de tous les acteurs intervenant dans la construction des structures : prescripteur, producteur de béton et entrepreneur. Quelques actions s'avèrent particulièrement importantes dans ce contexte.

Le prescripteur doit définir dans le marché les conditions environnementales et la ou les classes d'exposition des différentes parties de la structure à réaliser, comme cela a déjà été souligné. Il doit également préciser les valeurs d'enrobage minimales des aciers, en particulier lorsque les parements présentent des empreintes en creux.

Le producteur de béton devra définir, au cours d'essais antérieurs au démarrage du chantier, les conditions de fabrication du béton pour satisfaire les clauses du marché, notamment la quantité d'agent entraîneur d'air permettant de garantir la fourchette de la quantité d'air entraîné requise ou la valeur du rapport $E_{eff}/Ciment$ maximale pour les bétons ne comportant pas d'agent entraîneur d'air.

Pour sa part, l'entrepreneur devra apporter une attention particulière aux conditions de cure des bétons (surfaces "verticales" et/ou horizontales), afin d'éviter la microfissuration, voire la fissuration, engendrée par le retrait de dessiccation et bien sûr, il devra respecter scrupuleusement l'enrobage des aciers.

Les nombreuses inspections détaillées, faites sur les ouvrages d'art depuis plusieurs années, dans le cadre de la maintenance et de l'entretien du patrimoine, montrent que l'application des Recommandations et le respect des règles de l'art conduisent à obtenir une très bonne tenue des structures en béton en environnement froid.