



Selon CONREPNET (un réseau thématique dédié à la réhabilitation performantielle des structures en béton armé), les dégâts dus au gel constituent, après la corrosion de l'armature, la principale forme de dégradation du béton en Europe. Chez nous, où la température avoisine souvent zéro degré durant l'hiver, la résistance au gel du béton est une caractéristique importante.

Géivité des revêtements extérieurs en béton : rôle du type de ciment

1 Dégâts dus au gel à la surface du béton

En gelant, l'eau subit une augmentation de volume de l'ordre de 9 %. Si ce phénomène se produit au sein des pores capillaires (ordre de grandeur : 10 à 1000 nm) d'une surface en béton saturée d'eau, l'eau interstitielle s'infiltrera plus profondément dans le matériau (voir figure 1, A1 → B1), sans nécessairement provoquer de dégâts en surface.

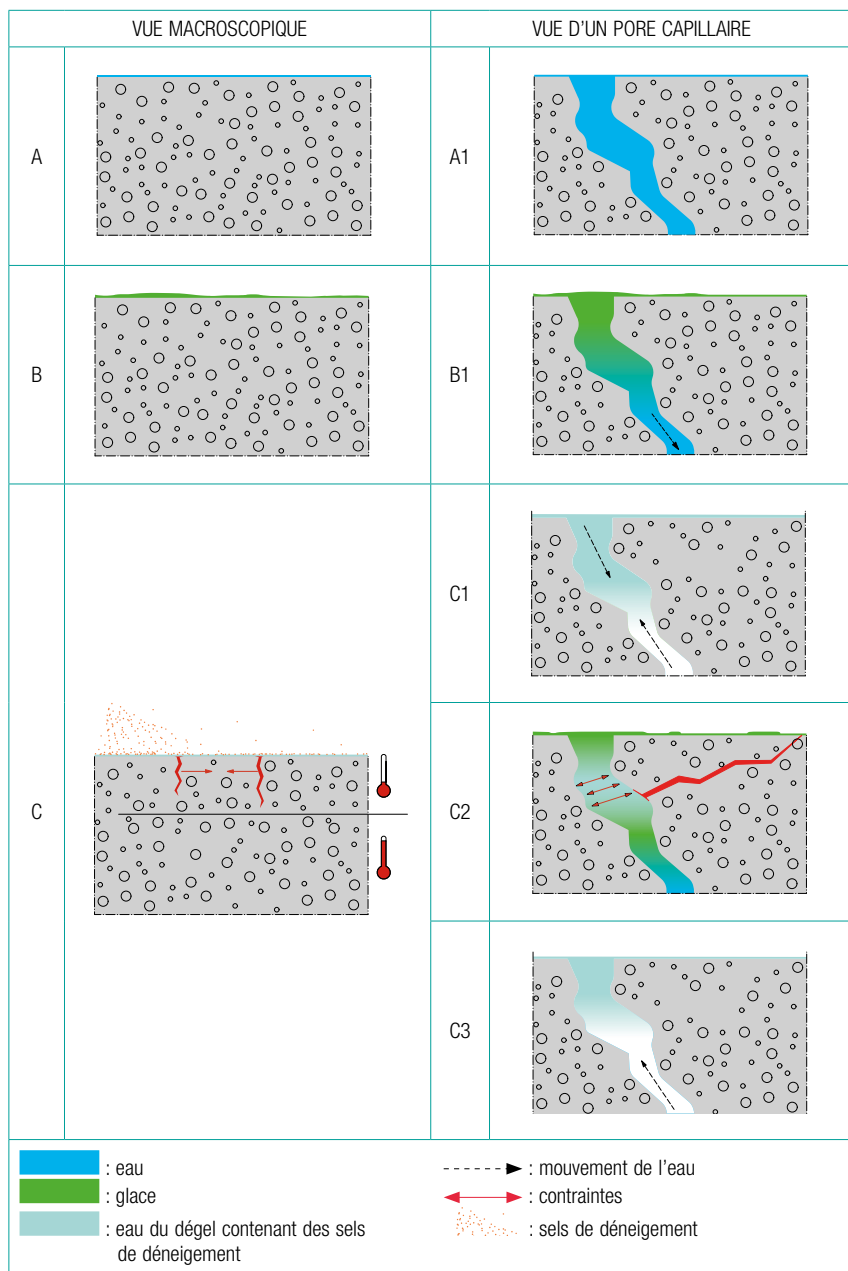
L'épandage de sels de déneigement abaisse localement le point de fusion de la glace. Dès que son point de fusion devient inférieur à sa température, la glace commence à fondre puisqu'elle absorbe la chaleur de son environnement, et notamment celle de la surface du béton. Ce phénomène a pour effet d'accentuer le gradient de température dans les zones superficielles du béton (choc thermique) et de générer des contraintes de traction, voire une légère fissuration ou un écaillage (voir figure 1, C).

À plus grande profondeur, la concentration de sels est insuffisante pour que la glace fonde, si bien que des 'lentilles de glace' peuvent s'y former. En raison de leur potentiel chimique, ces dernières attirent l'eau, ce qui augmente encore davantage la saturation de la surface du béton et entraîne des dépressions en profondeur dans l'élément (voir figure 1, C1).

Lorsque l'eau du dégel contenue dans les pores gèle à nouveau au niveau de la surface du béton (en raison d'une moins grande concentration des sels de déneigement, par exemple), de l'eau peut se retrouver piégée en dessous et exercer une pression contre les parois des pores, occasionnant un écaillage à la surface du béton (voir figure 1, C2).

Les pressions osmotiques, qui résultent des différences de concentrations de sels au sein des pores, peuvent en outre favoriser l'apparition de contraintes et de fissures (voir figure 1, C3).

1 | Dégâts à la surface du béton dus au gel (écaillage) et à la présence de sels de déneigement.



Les contraintes, la fissuration et l'écaillage peuvent provoquer la mise à nu des

granulats à la surface du béton (voir figure 2, p. 2).

2 Paramètres d'influence et directives applicables

Compte tenu des mécanismes de dégradation décrits ci-avant, la résistance au gel de la surface du béton peut être améliorée en :

- limitant le nombre et la taille des pores capillaires
- assurant une résistance (à la traction) élevée
- prévoyant un réseau de microbulles d'air dans lequel l'eau gelée peut se dilater.

Ces paramètres sont repris indirectement dans les exigences de durabilité de la norme NBN B 15-001 [1] (complément national belge à la norme NBN EN 206 [2]) pour le béton exposé au gel (classes d'exposition XF ou classes d'environnement EE2, EE3, EE4 et ES2). Ces exigences portent sur la composition du béton (utilisation de granulats résistant au gel, rapport eau-ciment maximal, teneur minimale en ciment et teneur maximale en cendres volantes). Si l'on souhaite obtenir une résistance aux sels de déneigement plus importante, il convient également de respecter une teneur minimale en air, qui peut être atteinte en ajoutant des entraîneurs d'air.

La norme prNBN B 15-400 [3] formule, quant à elle, une série de directives relatives à la cure du béton (voir aussi [Les Dossiers du CSTC 2011/2.4](#) [8]). Les dalles de béton pourvues d'une finition de surface lissée (polissage mécanique) sont généralement plus sensibles au gel (voir le 'Code de bonne pratique pour les revêtements industriels extérieurs en béton' du CRR [4]). Étant donné le risque accru de glissade qui y est associé, ce type de finition est d'ailleurs fortement déconseillé pour les surfaces extérieures.

Outre les paramètres précités, le type de ciment utilisé a également un impact considérable sur la résistance finale du béton vis-à-vis du gel. Contrairement à certains autres pays européens, la Belgique n'a encore adopté aucune directive officielle en la matière à ce jour.

Ainsi, l'annexe nationale luxembourgeoise à la norme EN 206 [7] définit non seulement des exigences concernant la composition du béton, mais elle mentionne aussi les types de ciments (conformes à la norme EN 197-1 [6]) autorisés pour chaque classe d'exposition. En ce qui concerne les dégradations dues aux cycles de gel-dégel et aux sels de déneigement (classes d'exposition XF2 et 4),



2 | Écaillage de la surface dû à l'action combinée du gel et des sels de déneigement.

seuls les ciments de type CEM I, CEM II/A S et CEM II/B-S sont autorisés. En l'absence de sels de déneigement (classes d'exposition XF1 et 3), d'autres types de ciments sont également admis : certains ciments de classe CEM II (avec un faible taux de substitution du clinker) ainsi que ceux des classes CEM III/A et B.

L'annexe nationale allemande autorise, elle aussi, davantage de types de ciments dans des conditions de gel (notamment les ciments des classes CEM III/A et B avec des exigences complémentaires en matière de composition des bétons et certains ciments de classe CEM II présentant un taux de substitution du clinker plus élevé dans les environnements de classes XF2 et 4).

3 Résultats du projet de recherche

Dans le cadre d'un projet de recherche prénormatif en cours lancé en 2010 en collaboration avec le CRR et le CRIC-OCCN, l'influence du type de ciment sur la résistance au gel des surfaces de béton est étudiée suivant la spécification technique européenne CEN/TS 12390-9 [5] (*Slab-test*). Cet essai consiste à exposer une surface sciée, recouverte d'une solution à 3 % de NaCl, à 56 cycles de gel-dégel, puis à recueillir la masse écaillée à intervalles réguliers et à la mesurer à sec.

Pour ce faire, 16 types de ciments ont été sélectionnés afin de réaliser des mélanges de béton conformément aux exigences de durabilité minimales de la classe d'environ-

nement EE4 (exposition au gel et aux sels de déneigement) formulées dans la norme NBN B 15 001 [1] :

- rapport eau-ciment maximal de 0,45
- teneur minimale en ciment de 340 kg/m³
- utilisation de granulats calcaires résistant au gel (D_{\max} de 20 mm).

Des adjuvants ont été ajoutés à ces mélanges, en vue d'atteindre une classe de consistance S3.

Remarque : les compositions testées dans le cadre de cette recherche ne sont pas représentatives de toutes les applications envisageables dans un environnement de classe EE4. En construction routière par exemple, des exigences plus sévères doivent être respectées afin d'obtenir la durabilité requise, stipulée dans les cahiers des charges types :

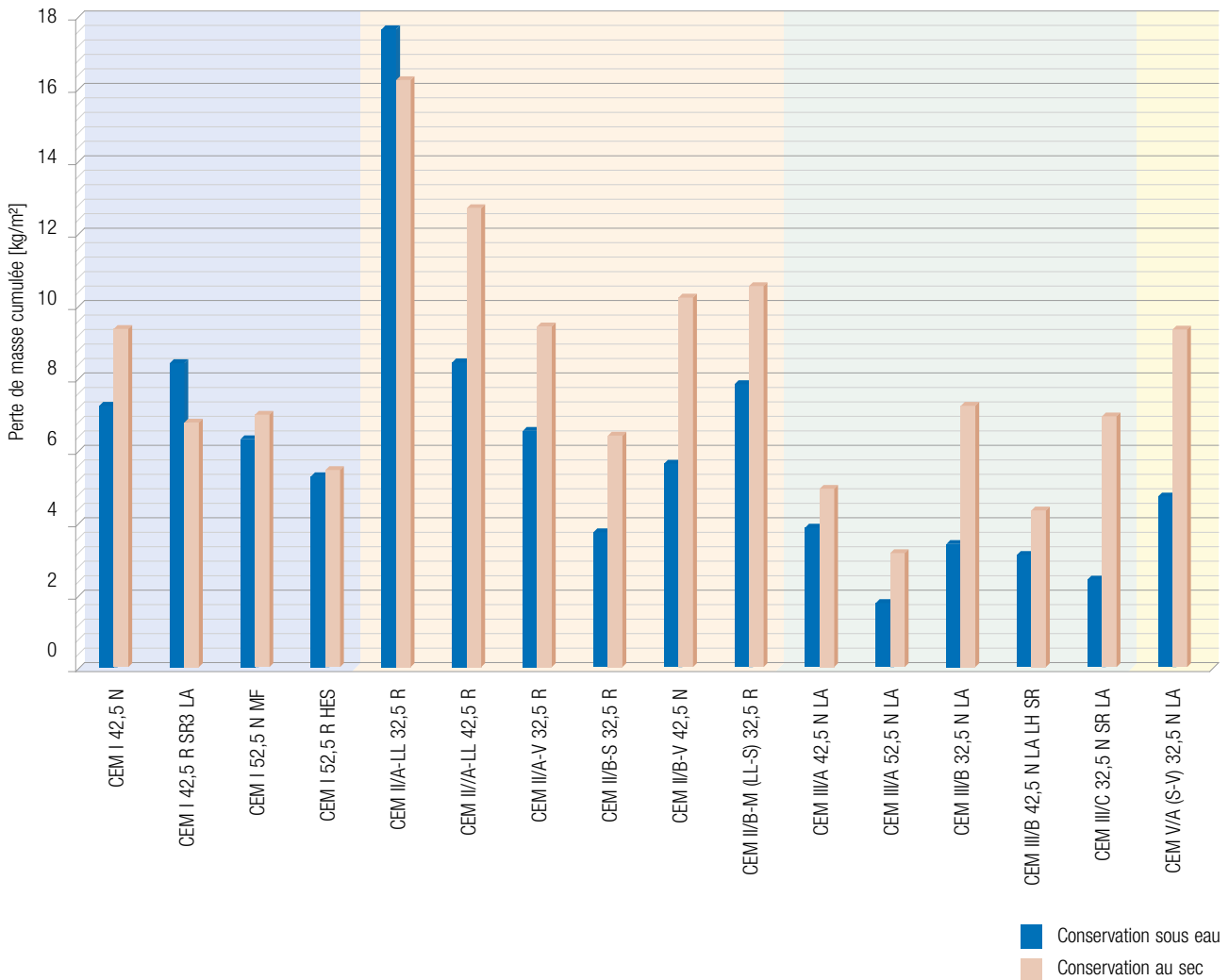
- utilisation obligatoire d'entraîneurs d'air lorsque les granulats présentent une valeur $D_{\max} \leq 20$ mm
- teneur minimale en ciment de 375 à 400 kg/m³.

Les mélanges ainsi formulés ont été utilisés pour réaliser des dalles de béton, qui ont été décoffrées après deux jours et immergées dans une eau à 20 ± 2 °C jusqu'à 7 jours d'âge. Des échantillons ont ensuite été forés (113 mm de diamètre), sciés à dimension (hauteur : 50 mm) et conservés jusqu'à 56 jours d'âge selon deux conditionnements différents :

- sous eau, à une température de 20 ± 2 °C
- au sec, à une température de 20 ± 2 °C et à 60 ± 5 % d'humidité relative.



3 | Pertes de masse cumulées après 56 cycles de gel-dégel (avec sels) selon la CEN/TS 12390-9 dans le cas d'une conservation sous eau et au sec.



En ce qui concerne la résistance à l'écaillage des surfaces de béton répondant aux exigences minimales de durabilité de la norme NBN B 15-001 [1], les premiers résultats de la recherche (voir figure 3) nous ont permis d'effectuer les constatations suivantes :

- l'utilisation d'un même type de ciment présentant une classe de résistance plus élevée permet généralement d'obtenir une meilleure résistance au gel
- la cure joue un rôle important quant à la résistance au gel. Son impact est toutefois moins évident dans le cas de bétons à base de ciment Portland (CEM I), étant donné que ceux-ci durcissent plus rapidement
- dans le cas d'une conservation sous eau, les ciments contenant du laitier de haut fourneau (CEM III, CEM II/B-S et CEM V) obtiennent les meilleurs résultats. Plus la teneur en laitier est élevée, meilleure

sera la performance (bien que la classe de résistance reste déterminante). Les ciments à base de calcaire ('LL') livrent les résultats les moins bons, tandis que le ciment Portland (CEM I) et le ciment à base de cendres volantes ('V') affichent des résultats moyens

- dans le cas d'une conservation au sec, les ciments composés (CEM II, CEM V) contenant du calcaire ('LL') ou des cendres volantes ('V') sont en général les moins performants, tandis que les ciments à base de laitier de haut fourneau (CEM III) – en particulier s'ils présentent une classe de résistance élevée (42,5 et 52,5) – affichent les meilleurs résultats.

4 Conclusions

Alors que le ciment à base de laitier de haut fourneau a obtenu les meilleurs résultats au

cours de l'étude, dans la pratique, le béton réalisé à partir de ce type de ciment subit régulièrement des dégradations dues au gel. Cette anomalie s'explique par une différence de cure. Le béton utilisé durant l'étude a en effet bénéficié, durant les sept premiers jours qui ont suivi le coulage, d'une cure humide 'idéale', tandis qu'en pratique, ces conditions sont rarement réunies pour les revêtements extérieurs en béton.

Remarque : les résultats présentés ici sont valables uniquement pour les compositions de béton considérées dans le cadre de la recherche (c'est-à-dire préparées conformément aux exigences minimales de durabilité de la classe d'environnement EE4). Les cahiers des charges types peuvent toutefois fixer des exigences plus sévères en matière de composition pour certaines applications dans cette classe d'environnement (routes



en béton ou applications industrielles, par exemple), de sorte que les résultats obtenus pourront être différents.

Bien que le type de ciment ait un impact considérable sur la résistance au gel du béton, la cure revêt une importance plus grande encore. La cure est particulièrement déterminante pour les mélanges de béton dont la résistance se développe plus lentement (ciments à base de laitier de haut fourneau ou de cendres volantes, par exemple). Si l'on souhaite classer les types de ciments en fonction de leur influence sur la résistance au gel, il convient de tenir compte de la cure subie par le béton. ■

*B. Dooms, ir., chef adjoint du laboratoire
Technologie du béton, CSTC*

G. Mosselmans, dr. ir., chef de projet, CRIC-OCCN

A. Beeldens, dr. ir., chercheuse senior, CRR

*Cet article a été rédigé dans le cadre de
l'Antenne Normes 'Bétons, mortier et granulats',
subsidée par le SPF Economie.*

BIBLIOGRAPHIE

1. Bureau de normalisation
NBN B 15-001 Béton. Spécification, performances, production et conformité. Complément national à la NBN EN 206-1:2001. Bruxelles, NBN, 2012.
2. Bureau de normalisation
NBN EN 206 Béton. Spécification, performances, production et conformité. Bruxelles, NBN, 2014.
3. Bureau de normalisation
prNBN B 15-400 Exécution des structures en béton. Complément national à la NBN EN 13670:2010. Bruxelles, NBN, 2012.
4. Centre de recherches routières
Code de bonne pratique pour les revêtements industriels extérieurs en béton. Bruxelles, CRR, Codes de bonne pratique du CRR, A 82/11, 2011.
5. Comité européen de normalisation
CEN/TS 12390-9 Testing hardened concrete. Part 9: freeze-thaw resistance. Scaling. Bruxelles, CEN, 2006.
6. Comité européen de normalisation
EN 197-1 Cement. Part 1: composition, specifications and conformity criteria for common cements. Bruxelles, CEN, 2011.
7. Comité européen de normalisation
EN 206 Concrete. Specification, performance, production and conformity. Bruxelles, CEN, 2013.
8. Dieryck V., Pollet V., Parmentier B. et Denoël J.-F.
Classes d'exécution, décoffrage et cure du béton : nouvelles règles. Bruxelles, CSTC, Les Dossiers du CSTC, n° 2, Cahier 4, 2011.