

CONCEVOIR DES OUVRAGES EN BÉTON RESISTANT AU GEL-DÉGEL ET AUX SELS DE DÉVERGLAÇAGE

TECHNOLOGIE | NOVEMBRE 2012

		Ef2	(L3)
--	--	-----	------

BB/SfB

- GEL DU BÉTON DURCI
- SELS DE DÉVERGLAÇAGE
- GEL DU BÉTON FRAIS





Parmi les actions susceptibles de provoquer des dégradations aux ouvrages ou aux revêtements en béton, le gel peut constituer un facteur particulièrement actif, surtout lorsque les cycles de gel et de dégel s'alternent rapidement.

Le béton durci, dans la majorité des cas, résiste aux effets du gel. Il arrive cependant que des conditions climatiques sévères puissent entraîner la dégradation de bétons mal formulés, mis en œuvre de façon incorrecte et de surcroît, dans un état voisin de saturation en eau.

Deux types de détérioration du béton due au gel sont à distinguer : la fissuration interne et l'écaillage des surfaces en présence de sels de déverglaçage. Ces deux types de détérioration ont pour origine des processus différents et ne surviennent pas nécessairement en même temps.

Les résultats de très nombreuses expérimentations en laboratoire et d'études du comportement du béton in situ ont permis de comprendre l'influence des paramètres de composition du béton sur sa durabilité au gel, dont notamment le rôle clé de l'air entraîné. Toutes ces connaissances sont à la base du développement de méthodes d'essais, de recommandations et d'exigences normatives permettant de construire des structures durables en béton.

En hiver, les revêtements routiers en béton sont généralement voisins d'un état proche de la saturation en eau. Les cycles de gel-dégel combinés aux sels de déverglaçage sont donc particulièrement agressifs. Néanmoins, avec un béton de formulation adéquate et bien mis en œuvre, la route en béton résiste particulièrement bien aux sollicitations hivernales.

photo couverture: Cool(r) (stockfreeimages.com)

1. LE GEL DU BÉTON DURCI ET LA FISSURATION INTERNE

Même après de nombreuses années de recherche, le comportement au gel du béton ne peut pas encore être expliqué complètement. Il est généralement admis que l'accroissement de volume accompagnant la transformation de l'eau en glace (de l'ordre de 9 %) n'est pas la cause principale de la dégradation du béton soumis au gel. Les modèles partiellement développés montrent que ce sont les pressions engendrées par les mouvements de l'eau interne qui sont la cause principale des dégradations.

- Lorsqu'il y a un gradient thermique (comme la formation de glace), il se crée un écoulement d'humidité des zones chaudes vers les zones froides. Comme la glace se trouve dans la zone la plus froide, l'humidité se déplace vers les cristaux de glace, elle se condense et se transforme en glace. Les forces en jeu sont tellement importantes qu'elles provoquent des déformations locales et peuvent entraîner la fissuration du béton.

- Lors du gel, seule l'eau pure est transformée en glace. L'eau est en réalité une solution saline et au cours du gel, il se produit donc une séparation en glace et en solution encore liquide qui devient de plus en plus concentrée en sel. De plus, dans un pore de pâte de ciment, l'eau gèle à une température qui dépend, notamment, de la dimension du pore. Par exemple, l'eau des pores des silicates de calcium hydratés (C-S-H) cristallise sous forme de glace à une température de $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$: l'eau des pores des C-S-H est donc, en pratique, non gélive – voir *figure 1*. L'eau des pores voisins, lorsqu'ils sont plus petits, n'a donc pas encore gelé. De ce fait, sa concentration saline, ayant gardé son niveau initial, est largement inférieure à celle de l'eau résiduelle dans le pore de rayon supérieur déjà partiellement gelé. Ceci va créer, afin d'égaliser les concentrations en sels, un afflux d'eau des petits pores vers les plus gros suivant les lois de l'osmose. Ces transferts vont créer des pressions qualifiées d'osmotiques. Si ces pressions viennent à surpasser la résistance à la traction du béton, elles fissureront celui-ci.

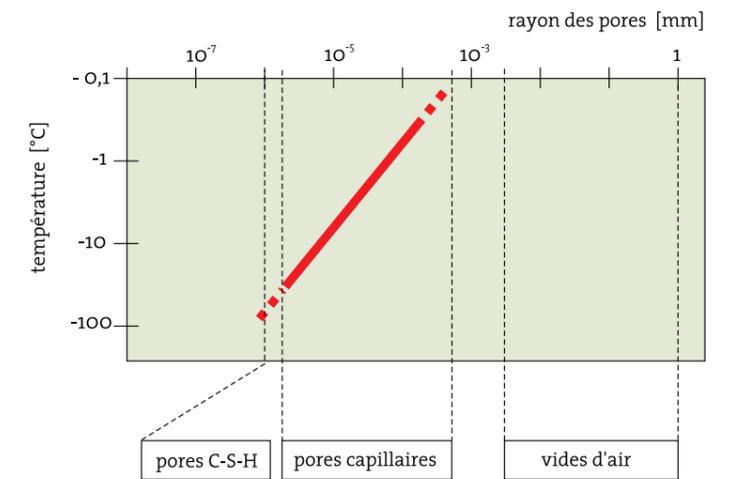


Fig. 1 – Abaissement de la température de fusion de la glace avec la diminution du rayon des pores



Fig. 2 – Représentation schématique du facteur d'espacement.

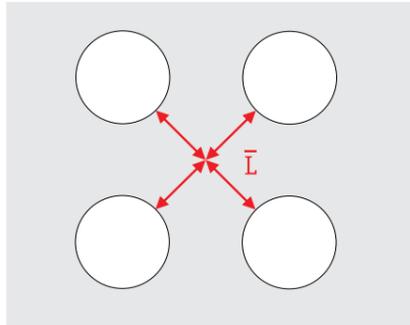
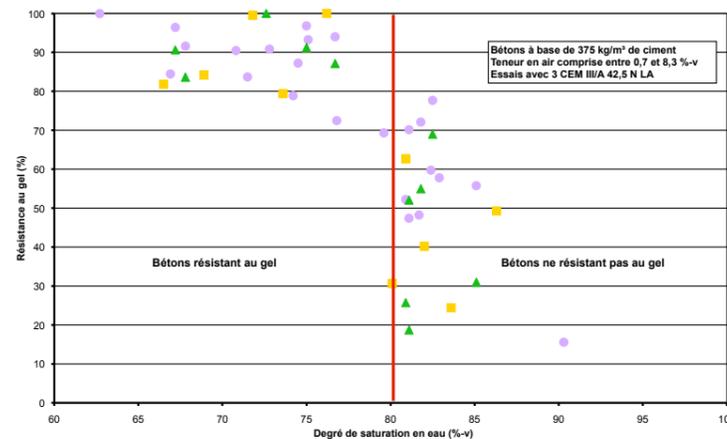


Fig. 3 – Influence du degré de saturation en eau du béton sur sa résistance au gel.



• Suite à ces pressions dues aux lois de la thermodynamique et aux lois de l'osmose, l'eau est attirée par la glace mais en même temps, la glace repousse l'eau qui s'écoule vers elle. Lorsque l'eau commence à geler dans une cavité, son volume augmente de 9 % de sorte que l'eau en excès est expulsée. La vitesse de refroidissement détermine la quantité d'eau poussée par la glace et qui doit cheminer. Il s'établit des pressions hydrauliques qui dépendent de la résistance à l'écoulement. Cette dernière est fonction notamment de la longueur du trajet entre le pore qui gèle et un vide qui peut accepter l'eau qui en est chassée. D'où la notion de facteur d'espacement des bulles d'air noté \bar{L} , définie par la norme américaine ASTM C 457 / C 457M comme étant la demi distance moyenne qui sépare les parois de deux bulles d'air adjacentes appartenant à un réseau supposé régulier (figure 2). Si la distance à parcourir par l'eau est élevée, les pressions hydrauliques peuvent dépasser la résistance à la traction du béton et le risque de fissuration est bien réel.

A RETENIR

Dans un béton, l'eau ne se transforme pas totalement en glace dès que la température s'abaisse en-dessous de 0 °C. La formation de glace s'amorce dans les plus gros capillaires pour se propager dans les pores de plus en plus petits à mesure que la température s'abaisse. Un béton à faible rapport E/C a une taille des pores réduite, ce qui diminue la quantité de glace formée à une température donnée.

Le degré de saturation en eau d'une pâte de ciment conditionne sa tenue au gel. Une pâte non saturée contient des vides gazeux qui constituent un volume tampon dans lequel la glace peut se former sans exercer de pression sur les parois des pores.

Les bulles d'air entraîné offrent des espaces (vases d'expansion) permettant à la phase liquide en mouvement de s'y accumuler et d'y geler sans créer de dommage. Pour protéger la pâte, il faut que les bulles d'air soient suffisamment rapprochées pour faire en sorte que les contraintes internes générées par le gel soient inférieures à la capacité ultime de la pâte. Ainsi, le paramètre essentiel garantissant l'efficacité de la protection offerte par le réseau de bulles d'air entraîné n'est pas le volume d'air entraîné, mais bien le facteur d'espacement \bar{L} : il doit être inférieur à une valeur critique qui dépend de la composition du béton et de la sévérité de l'exposition aux cycles de gel-dégel.

PRÉCAUTIONS A PRENDRE

Le rapport E/C du béton est la caractéristique de composition ayant la plus grande influence sur la résistance à la fissuration interne du béton. D'une part, l'abaissement du rapport E/C engendre une diminution de la quantité d'eau gelable consécutive à la diminution du volume poreux total et à l'affinement de la taille des pores. D'autre part, lorsque le rapport E/C diminue, les résistances mécaniques augmentent, ce qui produit un béton plus résistant aux contraintes internes engendrées lors du gel.

Les additions minérales (laitiers, cendres volantes, fumées de silice) peuvent modifier la résistance à la fissuration interne des bétons en raison de leurs effets sur la maturité du béton et sur la structure de la porosité. L'influence des additions minérales sur la tenue au gel est variable en fonction du type d'addition et du taux de remplacement du ciment. De nombreuses études tendent à démontrer qu'en général, les fumées de silice, les cendres volantes et les laitiers n'améliorent pas significativement la résistance à la fissuration interne. Il est toutefois possible de profiter des nombreux avantages offerts par les additions minérales en imposant une valeur limite sur le taux de remplacement du ciment et en s'assurant d'un niveau de maturité suffisant avant la première exposition au gel.

Les précautions à prendre peuvent être résumées comme suit en fonction de l'exposition des ouvrages en béton soumis au gel :

- dans tous les cas :
- faire du bon béton c'est-à-dire un béton de résistance à la traction élevée et à facteur E/C réduit, $\leq 0,55$ voire 0,50. Respecter les règles de composition notamment en ce qui concerne la continuité granulométrique (stabilité du mélange frais) et la teneur en fines (grandes consommatrices d'eau) ;
- utiliser des granulats sains ; les granulats gélifs, proches de la surface, absorbent de l'eau et se fissurent sous l'effet du gel en détruisant le mortier d'enrobage et en provoquant des cratères superficiels de dimension proportionnelle à celle du granulat concerné ;
- à la coulée du béton, respecter les règles de l'art notamment pour le mode de déversement, l'épaisseur des couches déversées, le serrage ;

- protéger le béton contre la dessiccation le plus rapidement possible après la mise en œuvre, voire après le décoffrage.

• dans le cas de bétons non susceptibles d'être saturés en eau et subissant un gel progressif normal (soit dans des conditions peu sévères d'exposition), aucune mesure particulière ne s'impose. Vu que le béton n'est pas saturé en eau, on dispose d'espaces d'expansion remplis d'air permettant l'écoulement de l'eau mise sous pression. La figure 3 montre bien que lorsque le taux de saturation du béton est limité (inférieur à 80 %), les dégâts dus au gel restent également limités.

• dans le cas de bétons susceptibles d'être saturés en eau et/ou de subir un gel très brutal (soit dans des conditions sévères d'exposition comme les routes, les parois minces exposées sur les 2 faces, ...) :

- veiller à la qualité du béton (abaissement du rapport E/C, $\leq 0,50$ voire 0,45) pour réduire la dimension des pores capillaires ;
- éventuellement et en complément, améliorer encore le comportement au gel de ces bétons par l'addition d'un entraîneur d'air accroissant la réserve d'expansion. La majorité des chercheurs s'accordent pour dire qu'afin d'avoir une protection adéquate contre le gel, il faut une quantité d'air égale à 9 % du volume du mortier. Comme la quantité de mortier présent dans le béton diminue lorsque le diamètre maximum des granulats augmente, la quantité d'air nécessaire pour un béton avec un D_{max} égal à 32 mm sera nettement inférieure à celle d'un béton avec un D_{max} égal à 6 mm. De plus, il faut que les bulles soient de petite taille, de l'ordre de 10 à 100 μm de préférence, et de surface volumique élevée, de l'ordre de 25 à 50 mm^2/mm^3 .



Lorsqu'un granulat poreux et saturé en eau gèle, il s'y développe des pressions hydrauliques internes qui peuvent le fissurer. Le gel des granulats dans un béton se manifeste avec plus d'intensité en surface : il se traduit par des éclatements locaux et par la formation de petits cratères (pop-outs).

En général, les recommandations quant à la teneur en air du béton frais par rapport au D_{max} du granulat sont les suivantes :

- minimum 4 %-v d'air pour un D_{max} compris entre 20 et 31,5 mm;
- minimum 5 %-v d'air pour un D_{max} compris entre 11,2 et 16 mm;
- minimum 6 %-v d'air pour un D_{max} compris entre 5,6 et 10 mm.

En ce qui concerne le facteur d'espacement, si celui-ci est faible, la pression de l'eau poussée par la glace ne sera pas élevée et inversement si la distance est grande, cette pression sera élevée. Un facteur d'espacement inférieur à 200 μm est en général considéré comme suffisant pour une bonne protection contre le gel mais dans le cas de bétons à faible E/C ($\leq 0,40$), des facteurs d'espacement supérieurs peuvent être admis.

- éviter la stagnation d'eau par des profils favorisant l'écoulement. Les parties extérieures de surfaces planes et horizontales favorisent l'accumulation d'eau et la saturation du béton. Il faut donc toujours chercher à donner une pente ou prévoir un système de casse-goutte empêchant les retours d'eau vers l'ouvrage.



Les parties d'ouvrages dont le béton présente le plus fort degré de saturation se dégradent le plus fort : elles correspondent soit à des parties qui fonctionnellement sont au contact de l'eau, soit à des parties qui par leur géométrie retiennent préférentiellement les eaux de précipitation (surfaces horizontales).

Les normes NBN EN 206-1:2001 et NBN B 15-001:2012 permettent de prescrire les exigences de durabilité pour des bétons non armés, armés et précontraints soumis au gel (classes d'environnement EE2 et EE3 – présence de gel sans agents de déverglaçage). Les exigences des normes liées à ces classes d'environnement EE2 et EE3 sont résumées au *tableau 1* ci-après. A noter que dans certains cas, il est possible de prescrire une classe d'absorption d'eau par immersion WAI. Cette exigence complémentaire est généralement considérée comme un indicateur de durabilité. Une faible absorption d'eau est synonyme d'un béton compact et de qualité résistant à l'environnement auquel il est exposé. Ainsi, à titre d'exemple, un béton armé exposé à la pluie et au gel uniquement

(sans sels de déverglaçage) sera prescrit en classe d'environnement EE3. Il devra donc présenter, outre une classe de résistance minimale C30/37, un rapport E/C $\leq 0,50$ et une teneur en ciment $\geq 320 \text{ kg/m}^3$. Les granulats seront non gélifs et l'utilisation d'additions minérales sera réglementée. Par ailleurs, si le prescripteur en fait la demande, une classe d'absorption d'eau par immersion WAI (0,50) devra être garantie. Ainsi, l'absorption d'eau par immersion mesurée sur éprouvettes de contrôle conformément aux directives de la norme NBN B 15-215, sera inférieure à 6,0 % en moyenne (mesure de trois éprouvettes) et 6,5 % en valeur individuelle conformément à l'annexe O de la NBN B 15-001.

Classe d'environnement	EE2 (Gel mais pas de contact avec la pluie)		EE3 (Gel et contact avec la pluie)	
	Béton non armé (BNA)	Béton armé (BA) ou précontraint (BP)	Béton non armé (BNA)	Béton armé (BA) ou précontraint (BP)
Domaine d'utilisation				
Type de béton	T(0,55)	T(0,55)	T(0,55)	T(0,50)
Rapport eau/ciment	$\leq 0,55$	$\leq 0,55$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$
Dosage en ciment (kg/m^3)	≥ 300	≥ 300	≥ 300	≥ 320
Classe de résistance	$\geq \text{C}25/30$	$\geq \text{C}25/30$	$\geq \text{C}25/30$	$\geq \text{C}30/37$
Teneur en air du béton frais (%)	-	-	-	-
Facteur d'espacement des bulles d'air	-	-	-	-
Type de granulats ⁽¹⁾	Non gélifs	Non gélifs	Non gélifs	Non gélifs
Classe d'absorption d'eau par immersion ⁽²⁾	-	-	-	WAI (0,50)

(1) La résistance au gel de granulats de dimension nominale $D \leq 4 \text{ mm}$ est considérée comme satisfaisante ; celle des granulats de dimension nominale $D > 4 \text{ mm}$ (à l'exception des granulats légers) est satisfaisante si soit l'absorption d'eau mesurée selon NBN EN 1097-6 est $\leq 1,0 \%$, soit le coefficient Los Angeles mesuré selon NBN EN 1097-2 est ≤ 25 ou soit le granulat est conformément à la norme NBN EN 12620 de classe F_4 ou de classe MS_{35} après essais respectivement suivant NBN EN 1367-1 et NBN EN 1367-2
 (2) Exigence d'application si elle est explicitement prescrite

Tableau 1 – Valeurs limites applicables pour la composition et les propriétés du béton soumis au gel-dégel (sans sels de déverglaçage) en fonction de la classe d'environnement selon la norme NBN B 15-001:2012. A noter que les PTV 100 et 200 relatifs aux produits préfabriqués en béton peuvent dans certains cas donner des spécifications légèrement différentes.

La résistance aux cycles de gel-dégel sans sels d'un béton peut être évaluée en laboratoire à partir de la mesure de la fréquence de résonance et de la vitesse de propagation des ultrasons de prismes soumis à des cycles de gel-dégel. Ces cycles se déroulent en enceinte climatique, selon le Rapport Technique CEN/TR 15177 : après conservation des éprouvettes durant 28 jours sous eau à (20 ± 2) °C, gel dans l'air jusque (-20 ± 2) °C avec une vitesse de refroidissement prescrite et dégel sous eau à (13 ± 8) °C.

Le CEN/TR 15177 propose d'évaluer la susceptibilité au gel d'un béton en comparant les mesures après n cycles (7, 14, 28, 42 et 56 cycles) aux mesures initiales avant gel-dégel selon l'expression :

$$\left(\frac{\text{mesure } n}{\text{mesure } 0} \right)^2 \times 100 [\%]$$

Ces essais peuvent utilement être complétés par des mesures de résistance à la flexion. Les résistances à la flexion des éprouvettes prismatiques sont comparées à celles d'éprouvettes témoins c'est-à-dire n'ayant pas subi de cycles de gel-dégel. Afin d'éviter que les résistances mécaniques n'évoluent encore en cours d'essai, il est utile de débiter ces essais après 91 jours de conservation à 20 °C et plus de 95 % d'humidité relative.

A ce jour, il n'existe pas encore de spécification en Belgique en relation avec ces méthodes. Néanmoins, selon l'expérience acquise par différents laboratoires, les critères suivants pourraient être retenus :

- dans le cas de la mesure de la fréquence de résonance et de la vitesse de propagation des ultrasons, le béton est considéré comme résistant au gel dans les conditions de cet essai si le rapport $(SS_{56}/SS_0)^2 \times 100$ ou le rapport $(FF_{56}/FF_0)^2 \times 100$ est supérieur ou égal à 80 % avec SS_{56} et SS_0 , les vitesses du son (*Sound Speed*) en m/s respectivement après 56 cycles et avant les cycles de gel-dégel (mesure initiale) et FF_{56} et FF_0 , les fréquences de résonance (*Fundamental Frequency*) exprimées en Hz également respectivement après 56 cycles et avant les cycles de gel-dégel (mesure initiale);
- dans le cas de la mesure de la résistance à la flexion, le béton est considéré comme résistant au gel dans les conditions de cet essai si le rapport $(Fcf_{56}/Fcf_0)^2 \times 100$ est supérieur à 60 % avec Fcf_{56} et Fcf_0 , les résistances à la flexion (*Flexural strength*) exprimées en N/mm² respectivement d'éprouvettes ayant subi 56 cycles de gel-dégel et d'éprouvettes n'ayant pas subi de cycle de gel-dégel (conservation à 20 °C et plus de 95 % d'humidité relative). Les résistances à la flexion sont déterminées selon les directives de la norme NBN EN 12390-5.

Mise en vibration en flexion d'une éprouvette prismatique et mesure de la fréquence de résonance en flexion.



Mesure de la vitesse de propagation des ultrasons sur une éprouvette prismatique.



Les entraîneurs d'air sont des adjuvants qui entraînent et stabilisent un nombre élevé de microbulles d'air (diamètre de l'ordre de 10 à 100 µm) réparties uniformément dans le béton après malaxage et qui subsistent après son durcissement.

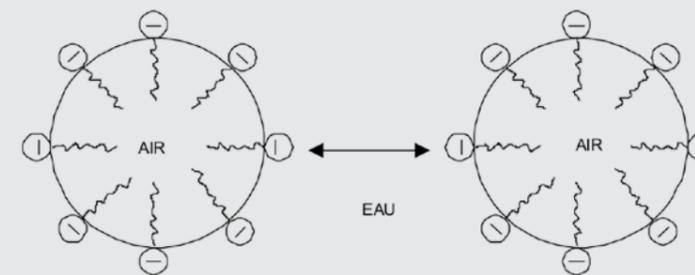
L'ajout d'air améliore d'une façon spectaculaire la résistance des bétons aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage. En effet, les bulles d'une dimension de 10 à 1 000 fois supérieures aux capillaires (diamètre 10^{-5} à 10^{-3} mm) coupent le réseau des capillaires et jouent donc le rôle de vase d'expansion pour l'eau poussée par la glace ou pour la glace elle-même formée dans les bétons durcis. Elles réduisent ainsi les pressions hydrauliques mais l'efficacité des entraîneurs d'air pour prévenir les désordres dus au gel dépend des caractéristiques de l'air entraîné : le pourcentage d'air entraîné, la surface spécifique des microbulles et le facteur d'espacement.

Les adjuvants entraîneur d'air sont des molécules organiques, de diverses compositions chimiques. Leurs molécules sont de longues chaînes qui comportent une partie

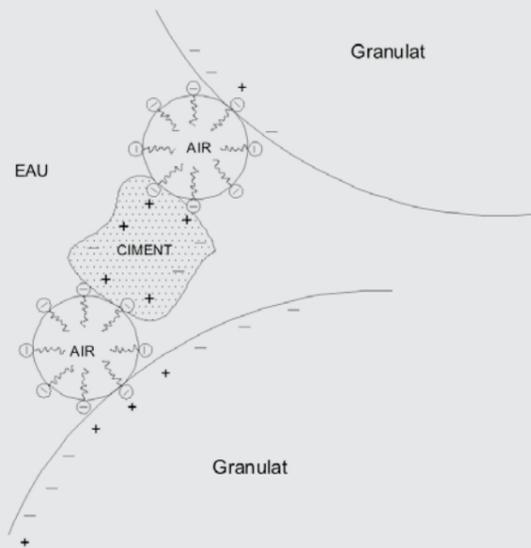
hydrophobe fuyant l'eau et une partie hydrophile ionisable et permettant aux molécules de rester au contact de l'eau. Ceci fait qu'en solution, les molécules s'orientent à l'interface eau-air avec la partie ionisable dans l'eau et la partie organique (hydrophobe) dans l'air. Ceci a pour effet de réduire la tension superficielle de l'eau et de stabiliser des bulles d'air lorsque la solution est agitée. Les bulles d'air ainsi stabilisées sont retenues dans le béton frais par la partie apolaire (partie hydrophobe) des entraîneurs d'air et sont fixées aux grains de ciment grâce à la partie polaire. Il y a deux raisons principales pour lesquelles les bulles d'air sont stabilisées :

- étant donné que les bulles d'air ont sur leur pourtour des molécules chargées négativement, il existe une répulsion électrostatique entre les bulles qui empêche celles-ci de s'unir et qui contribue à les répartir uniformément ;
- en diminuant la tension superficielle, il y a une diminution des efforts qui tendent à rompre les bulles et à former de plus grosses bulles.

Orientation des molécules tensio-actives à l'interface air-eau et répulsion électrostatique des bulles d'air.



Formation de bulles d'air stables.



Le dosage et la nature de l'adjuvant utilisé interviennent sur le volume d'air entraîné, sur la grosseur et la répartition des bulles, ainsi que sur la stabilité. En général, au plus le dosage en entraîneur d'air est élevé, au plus grand est la quantité d'air entraîné mais il existe un dosage maximum à partir duquel il n'y a plus d'augmentation de la teneur en air entraîné. L'ajout simultané d'un adjuvant d'un autre type change les teneurs en air que l'on obtiendrait avec l'utilisation exclusive de l'adjuvant entraîneur d'air. Lorsqu'un plastifiant est utilisé simultanément avec un entraîneur d'air, celui-ci est en général plus efficace et il faut donc utiliser un dosage plus faible.

La teneur en air varie en fonction du type, de la nature et de la teneur en ciment. Il faut d'autant plus d'adjuvant pour obtenir le même pourcentage d'air :

- que le dosage en ciment est plus élevé ;
- que le ciment contient moins de sulfates et moins d'alcalis ;
- que le ciment contient plus de cendres volantes et de fillers ;
- que le ciment est plus fin (les grains les plus gros du ciment étant ceux qui entraînent le plus d'air).

Les entraîneurs d'air sont perturbés par le carbone imbrulé ; les cendres volantes à teneur élevée en carbone diminuent par conséquent l'efficacité des adjuvants entraîneurs d'air par absorption de ceux-ci par le carbone.

Le rapport E/C a une influence non seulement sur la teneur en air, mais également sur la répartition des bulles. Plus le rapport E/C est élevé, plus le diamètre des bulles est important et donc plus le facteur d'espacement sera grand à volume d'air entraîné constant. Plus la teneur en eau est élevée, plus l'ouvrabilité sera grande et plus la teneur en air entraîné sera grande. Mais au-delà d'une certaine ouvrabilité (slump > 150 mm), il résulte de l'augmentation de l'ouvrabilité, une perte plus grande de la teneur en air durant le transport et la mise en œuvre. Il faut un minimum de temps de malaxage afin de permettre une bonne répartition des bulles. De nombreux paramètres peuvent modifier la teneur en air : mode, énergie, temps de malaxage ainsi que le type de malaxeur et le volume de béton traité. On constate qu'il y a un maximum d'air pour un temps de malaxage donné au-delà duquel la teneur en air diminue. La granularité des bulles d'air doit d'ailleurs se modifier en cours de malaxage, les grosses bulles ayant tendance à disparaître.

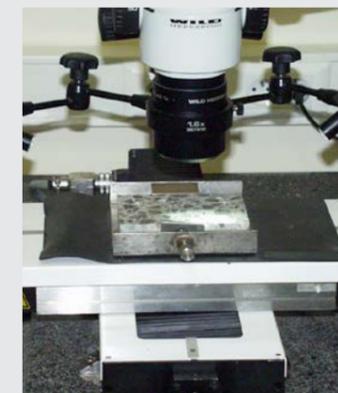
La vibration du béton a pour effet de chasser uniquement les grosses bulles d'air (peu utiles). Plus la température du béton frais est élevée, plus la teneur en air occlus sera faible et vice-versa. Ceci est encore vrai lorsque la teneur en eau a été modifiée pour garder l'ouvrabilité constante. Les pertes en air avec augmentation de la température sont d'autant plus importantes que l'ouvrabilité du béton est élevée.

L'ajout d'un entraîneur d'air au béton en modifie ses caractéristiques tant à l'état frais qu'à l'état durci. A même teneur en eau, l'ajout d'un entraîneur d'air à un béton augmente l'ouvrabilité de celui-ci. En effet, les bulles agissent comme lubrifiant grâce à leur bon coefficient de forme, à leur capacité d'être déformable, élastique et de pouvoir glisser sans frottement.

Les autres conséquences sur le béton frais sont une plus grande homogénéité et cohésion des bétons (diminution de la ségrégation et du ressuage). Les résistances mécaniques diminuent avec l'augmentation de la teneur en air. Les résistances à la compression peuvent chuter de 3 à 5 N/mm² par % d'air entraîné. Il faut aussi noter que l'absorption d'eau par immersion et plus exactement le résultat d'un essai d'absorption d'eau par immersion est augmentée lors de la présence d'un réseau de bulles d'air. En effet, l'absorption d'eau par immersion est exprimée en % par rapport à la masse sèche du béton. Or, cette masse est plus faible étant donné la présence de bulles d'air. Le résultat d'absorption d'eau par immersion peut augmenter de 0,2 % par % d'air entraîné.



Il est essentiel de vérifier la teneur en air entraîné du béton. Sur béton frais, cette mesure peut se faire par la méthode pressiométrique en conformité avec la norme NBN EN 12350-7.



Sur béton durci, la teneur en air peut être déterminée à partir d'observations au microscope de sections polies taillées dans le béton. Outre le volume d'air, la surface volumique moyenne des bulles et le facteur d'espacement peuvent être déterminés (norme NBN EN 480-11).

2. L'ACTION DES SELS DE DÉVERGLAÇAGE

L'emploi de sels de déverglage accroît les dégâts sur les ouvrages durant les périodes hivernales. Ces dégâts qui se manifestent préférentiellement sous forme d'écaillages sont devenus fréquents pour plusieurs raisons :

- l'augmentation de la consommation de tels produits due à la généralisation des traitements hivernaux préventifs et curatifs. De plus, les épandages sont parfois effectués sur des bétons trop jeunes, de moins de 6 à 8 semaines d'âge ;
- l'inadéquation de certains bétons à cette sollicitation. Les bétons ne sont pas toujours composés et mis en œuvre suivant les règles de bonne pratique. De plus, il arrive que des sels de déverglage soient projetés sur des ouvrages dont les bétons n'ont pas été étudiés à cet effet (sols industriels, stations d'essence, parkings, piles de ponts, ...). Il faut également ne pas oublier que les roues des véhicules transportent les sels sur des bétons également non prévus pour cet usage (entrée de garage,...) ;
- les sels fondants sont en contact immédiat avec les couches externes du béton. Les caractéristiques de la peau du béton sont liées à la mise en œuvre (spécialement à la finition) et à la cure du béton. Les propriétés de la peau sont influencées par les méthodes de coffrage, la ségrégation, l'évaporation, la fissuration excessive, etc. Il en résulte des différences de qualité parfois importantes lorsque l'on se déplace de la surface externe vers le cœur de l'ouvrage. La peau du béton est en général plus poreuse que le cœur du béton et, de ce fait, plus accessible à l'eau. A noter que pour les produits préfabriqués, selon l'orientation des faces coffrées lors de la préfabrication, ce n'est pas forcément le cas.

A RETENIR

La sévérité des dommages résultant de l'action combinée des cycles de gel-dégel et des sels de déverglage est due principalement à la plus grande gélivité de la zone superficielle (porosité élevée) et des conditions hivernales qui renforcent ses défauts en la maintenant saturée, en la soumettant à des chocs thermiques et en créant des gradients de concentration saline (osmose, gel par couche).

L'action des sels fondants est due à plusieurs facteurs qui peuvent être résumés comme ceci :

- la fonte de la glace par les sels est une réaction endothermique. La chaleur nécessaire est puisée dans le matériau au contact du sel, c'est-à-dire dans la couche superficielle du béton qui se refroidit donc brusquement. Il apparaît alors un gradient thermique qui entraîne l'apparition de contraintes internes susceptibles de créer une fissuration du béton ;
- la fonte de la glace maintient un degré de saturation en eau élevé en surface du béton ;
- après le dégel, on obtient une eau à forte concentration en chlorures. Ceux-ci sont alors entraînés par absorption capillaire et diffusion. La présence de sel abaisse le point de congélation et cela d'autant plus que la concentration augmente. Des mesures sur des ouvrages régulièrement salés montrent que les chlorures présentent généralement des profils de concentration en fonction de l'épaisseur tels que présentés en *figure 4*. La combinaison point de congélation/ température du béton peut être telle que deux couches gelées soient séparées par une couche intermédiaire non gelée. Si, suite à un abaissement supplémentaire de la température, l'eau de cette couche vient à geler, elle ne trouve pas d'espace d'expansion et repousse de ce fait la couche supérieure. Cet effet s'appelle «écaillage» ;
- du fait que la concentration en sels varie fortement, naissent des pressions osmotiques qui cumulent également leurs effets.

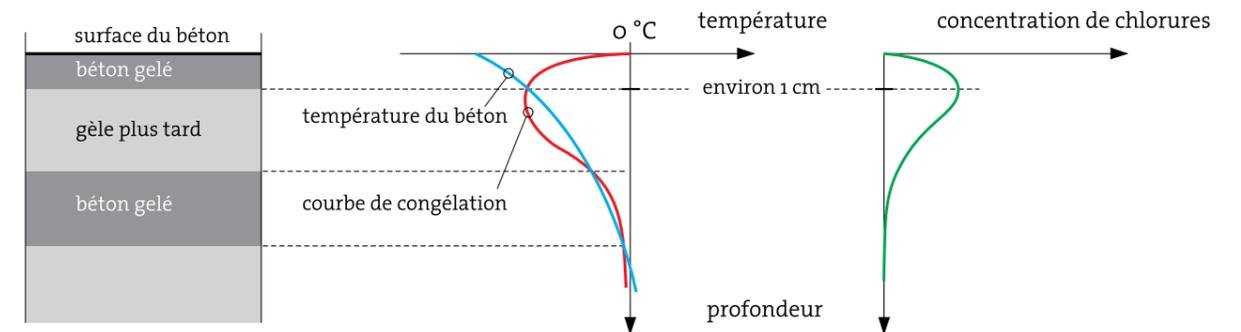


Fig. 4 – Mécanisme d'action du gel en présence de sels de déverglage (écaillages).



Ecaillage à la surface d'un revêtement en béton imprimé exposé à des sels de déverglage



Piste cyclable réalisée en 2001, toujours en très bon état, à l'exception de la zone autour de la chambre d'inspection. La dégradation est due à une mauvaise composition du béton.

PRÉCAUTIONS A PRENDRE

Elles sont impératives eu égard aux risques encourus.

Le béton doit être de très bonne qualité. Il offre ainsi une faible porosité et une grande résistance à la traction. Cette qualité s'obtient par la voie classique du E/C très bas, $\leq 0,50$ voire $0,45$ ce qui implique une faible teneur en eau du béton ($\leq 180 \text{ l/m}^3$) et une teneur minimale en ciment de 360 à 375 kg/m^3 . Si d'autres fines sont ajoutées (comme par exemple des pigments dans les bétons colorés), la teneur en eau du béton ne peut absolument pas être augmentée. Le rapport E/C sera même diminué si la teneur en ciment est augmentée. L'utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air est absolument nécessaire, bien plus que dans le cas de la fissuration interne, à l'exception peut-être des bétons contenant peu de sable (maximum 500 kg/m^3 de sable $0/2$) et dont le rapport E/C est $\leq 0,45$ pour une teneur en ciment de minimum 400 kg/m^3 . L'expérience a montré qu'au delà d'une certaine teneur en air fonction du D_{max} du béton et moyennant un facteur d'espacement $\bar{\Gamma}$ des bulles d'air inférieur à $200 \mu\text{m}$, les écaillages dus aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage restent limités (figure 5). Il faut toutefois que le rapport E/C du béton soit relativement bas ($\leq 0,50$ voire $0,45$) car pour un béton avec un E/C de $0,55$ ou plus, une teneur en air adéquate combinée à un facteur d'espacement faible ne pourra jamais produire une durabilité à l'écaillage suffisante. L'utilisation d'un squelette inerte du béton offrant une très bonne stabilité au mélange de béton frais est primordiale. Ainsi, un bon sable pour béton demandant peu d'eau de mouillage et dans des proportions les plus faibles possibles en fonction du D_{max} du granulat sera favorisé par rapport aux sables fins ou aux sables anguleux demandant beaucoup d'eau de mouillage. L'instabilité de certaines compositions conduit à des remontées importantes de mortier et de laitance vers la couche supérieure qui est justement celle agressée par les sels. Consistance adéquate, continuité granulométrique et serrage adapté sont des points à surveiller tout particulièrement.

Comme dans le cas de la fissuration interne, les additions minérales (fumées de silice, cendres volantes et laitiers) peuvent modifier la durabilité à l'écaillage en raison de leurs effets sur la maturité du béton et sur la structure de la porosité. L'influence des additions minérales est variable en fonction du type d'addition et du taux de remplacement du ciment.

Les bétons de résistances normales, contenant moins de 10% de fumées de silice en remplacement du ciment, résistent très bien à l'écaillage lorsqu'ils sont protégés par un bon réseau de bulles d'air entraîné ou lorsque les bétons ont un rapport Eau/Liant faible ($\leq 0,35$ voire $0,30$). Les bétons avec cendres volantes ont une moins bonne durabilité à l'écaillage particulièrement lorsque le taux de remplacement excède les 25% . Les causes de la moins bonne résistance à l'écaillage des bétons avec cendres volantes ne sont pas encore parfaitement comprises. Certains chercheurs ont néanmoins montré que les bétons avec cendres volantes présentent souvent une forte porosité en surface résultant du ressuage plus important de ceux-ci.

La résistance à l'écaillage des bétons avec laitiers apparaît être satisfaisante s'ils contiennent un bon réseau de bulles d'air entraîné et si la période de mûrissement avant l'application des premiers sels est suffisamment longue.

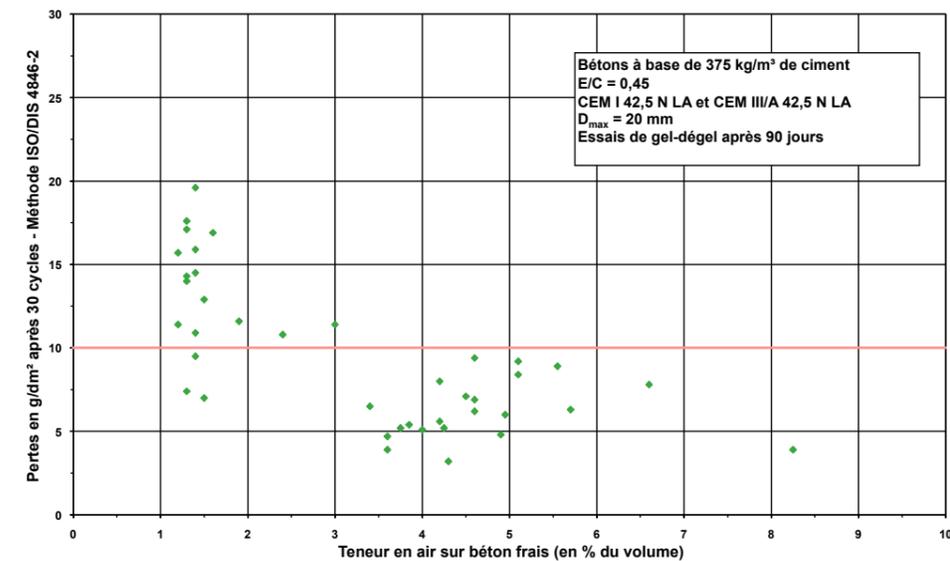


Fig. 5 – Influence de la teneur en air du béton sur la résistance au gel en présence de sels de déverglaçage. Une teneur en air sur béton frais de minimum 3% est nécessaire pour obtenir des pertes après 30 cycles de gel-dégel inférieures à 10 g/dm^2 (valeur seuil admise dans la majorité des cas).



Les bétons colorés sont généralement obtenus par l'ajout d'un pigment sous forme de poudre. Ces colorants sont très fins (grains moyens de l'ordre de $0,2$ à $1 \mu\text{m}$) et ont donc une demande en eau élevée. Il est important pour conserver les caractéristiques de durabilité du béton aux cycles de gel-dégel de ne pas augmenter la teneur en eau du mélange mais de compenser la perte d'ouvrabilité éventuelle par l'ajout d'un plastifiant.



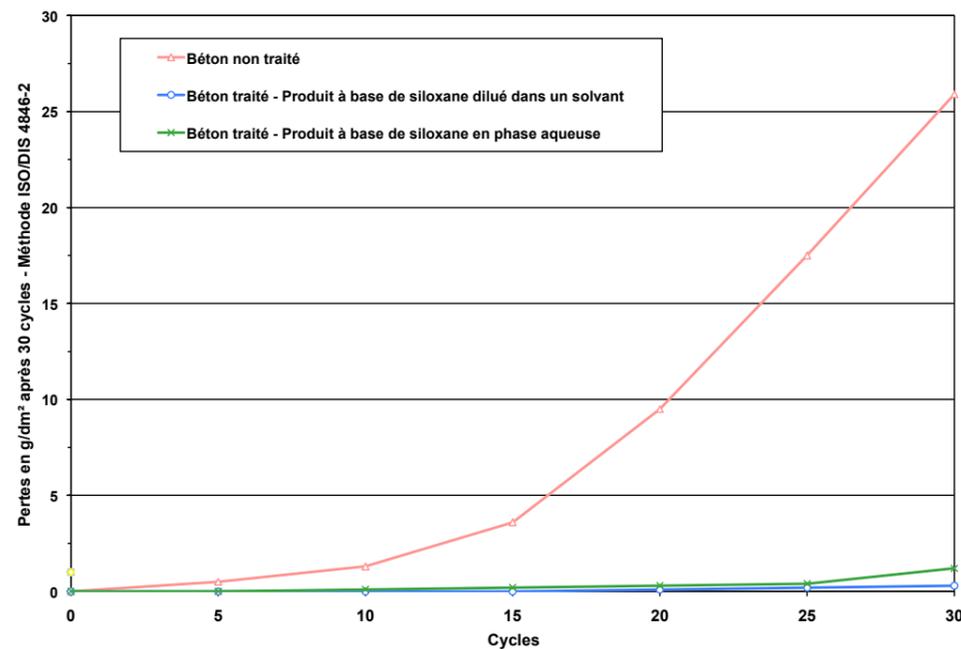
Dégâts de gel avec sels de déverglaçage sur le haut du voile d'un bassin de décantation d'une station d'épuration. La partie supérieure des voiles verticaux est particulièrement vulnérable en cas de remontée trop importante de mortier et de laitance. Il peut s'avérer utile de les enlever par brossage ou de les enrichir par saupoudrage d'un mélange sec (1 part de ciment – 1 part de sable) suivi d'un talochage vigoureux, mécanique ou manuel.

Il y a toujours lieu de protéger efficacement les surfaces de béton frais contre toute dessiccation prématurée : celle-ci conduirait à une hydratation incomplète du ciment en surface, à la multiplication des capillaires et à une micro fissuration superficielle, génératrice de poudrolement, de porosité et de réduction de la résistance aux sels fondants. Les directives concernant les durées minimales de la cure sont données dans l'Annexe nationale belge à la norme NBN EN 13670:2010 concernant l'exécution des structures en béton. Ces durées sont fonction des conditions climatiques et du type de ciment utilisé. A ce sujet, nous renvoyons également le lecteur vers notre bulletin T3 ('Limiter la fissuration : condition indispensable à la durabilité des bétons'). Pour des bétons présentant une résistance limitée au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage, une solution consiste à étancher les surfaces trop poreuses par une imprégnation. Les produits d'imprégnation freinent la pénétration de l'eau et des sels de déverglaçage et évitent ainsi les dégâts dus aux cycles de gel-dégel en polymérisant dans les capillaires.

Ces produits ont donné des résultats concluants sur de nombreux chantiers (figure 6). Lors de l'utilisation de tels produits, il y a lieu de bien vérifier qu'ils sont bien efficaces contre les sels de déverglaçage et il faut noter qu'ils n'ont pas une action permanente, le traitement doit donc être renouvelé périodiquement (tous les 5 ans en général).

Il est également bon d'éviter tout épandage de sels de déverglaçage sur des bétons âgés de moins de 6 semaines. En 1973, une circulaire de l'Administration des Routes du Ministère des Travaux publics signée par monsieur H. Hondermarcq, Directeur général des Ponts et Chaussées, disait ceci : « Les sels de déneigement ne pourront être épandus sur les revêtements routiers en béton de ciment nouvellement construits qu'après un délai de six semaines prenant court à partir de la date de bétonnage. En cas d'absolue nécessité, et notamment lorsque la sécurité de l'usager risque de subir un préjudice par temps de verglas ou de neige, les épandages peuvent être exécutés à partir de 28 jours après la date de bétonnage ».

Fig. 6 – Influence du traitement avec un produit d'imprégnation sur la résistance au gel en présence de sels de déverglaçage.



Béton n°	1 Avec pigment E/C ≈ 0,50	2 Avec pigment E/C ≈ 0,50	3 Avec pigment E/C ≈ 0,50	4 Sans pigment E/C ≈ 0,50	5 Sans pigment mais avec cendres volantes E/C ≈ 0,55	
Gravier concassé 6/20	914 kg/m³	899 kg/m³	908 kg/m³	909 kg/m³	893 kg/m³	
Gravier concassé 2/6	293 kg/m³	289 kg/m³	292 kg/m³	291 kg/m³	286 kg/m³	
Sable de rivière 0/2	357 kg/m³	351 kg/m³	355 kg/m³	355 kg/m³	348 kg/m³	
Sable de rivière 0/1	186 kg/m³	183 kg/m³	185 kg/m³	185 kg/m³	182 kg/m³	
CEM III/A 42,5 N LA	366 kg/m³	360 kg/m³	364 kg/m³	364 kg/m³	334 kg/m³	
Cendres volantes	-	-	-	-	29 kg/m³	
Pigment (oxyde de fer rouge)	5 % soit 18,3 kg/m³	5 % soit 18,0 kg/m³	5 % soit 18,2 kg/m³	-	-	
Plastifiant Entraîneur d'air	780 ml/m³ 450 ml/m³	770 ml/m³ 480 ml/m³	775 ml/m³ 485 ml/m³	780 ml/m³ 490 ml/m³	765 ml/m³ 380 ml/m³	
Eau totale	183 l/m³	185 l/m³	187 l/m³	185 l/m³	190 l/m³	
Essais sur béton frais	Slump	35 mm	35 mm	20 mm	35 mm	
	Teneur en air	3,8 %	4,5 %	4,5 %	4,1 %	4,7 %
	Masse volumique humide	2318 kg/m³	2285 kg/m³	2310 kg/m³	2290 kg/m³	2263 kg/m³
Essais sur béton durci	Résistance à la compression ⁽¹⁾	55,6 N/mm²	53,1 N/mm²	52,8 N/mm²	54,2 N/mm²	45,4 N/mm²
	Absorption d'eau par immersion ⁽²⁾	6,3 %	6,6 %	6,4 %	7,5 %	7,4 %
	Résistance au gel, écaillages à 30 cycles ⁽³⁾	4,6 g/dm²	6,9 g/dm²	6,6 g/dm²	6,1 g/dm²	15,5 g/dm²

(1) La résistance à la compression est mesurée sur carottes de 100 cm² de section et de 10 cm de hauteur à 90 jours
(2) L'absorption d'eau par immersion est mesurée sur tranches découpées à la surface supérieure de carottes de 100 cm²
(3) La résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage est mesurée à 90 jours d'âge sur tranches découpées à la surface supérieure de carottes de 100 cm², essai selon ISO/DIS 4846.2

Tableau 2 – Exemples de composition de béton et influence de plusieurs paramètres sur la résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage. (Résultats issus de mesures sur chantiers – pistes cyclables à Aarschot)



A noter :

- Les différents bétons présentent des pertes de matières à l'essai d'écaillage faibles à l'exception du béton n° 5 dont la teneur en ciment est également plus faible ; ceci est partiellement dû à la faible teneur en sable de ces bétons (de l'ordre de 31 % par rapport à la totalité du squelette inerte).
- L'ajout d'un colorant sans ajout complémentaire d'eau n'est pas défavorable au comportement du béton.

PRESCRIPTION D'UN BÉTON RÉSISTANT AUX CYCLES DE GEL-DÉGEL EN PRÉSENCE DE SELS DE DÉVERGLAÇAGE SELON LES NORMES NBN EN 206-1 ET NBN B 15-001

Tout comme pour l'action du gel seul, les normes NBN EN 206-1:2001 et NBN B 15-001:2012 permettent également de prescrire les exigences de durabilité pour des bétons non armés, armés et précontraints soumis aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage (classe d'environnement EE4 – présence de gel avec agents de déverglaçage). Les exigences des normes liées à cette classe d'environnement sont résumées au *tableau 3*. A noter que par domaine d'utilisation (béton non armé ou béton armé et précontraint), deux types de bétons peuvent être prescrits. Un type de béton sans air entraîné (noté T(0,45)) et un type de béton avec air entraîné (noté T(0,50)A ou T(0,45)A). Il faut bien retenir que si le prescripteur n'impose pas explicitement la présence d'air entraîné, il s'agira toujours du béton sans air entraîné qui sera d'application. Il est également possible de prescrire une classe

d'absorption d'eau par immersion WAI. Ainsi, à titre d'exemple, un béton armé exposé au gel et aux sels de déverglaçage et pour lequel un réseau de bulles d'air entraîné est souhaité sera prescrit en classe d'environnement EE4A. Il devra donc présenter, outre une classe de résistance minimale C30/37, un rapport E/C ≤ 0,45, une teneur en ciment ≥ 340 kg/m³ et une teneur en air sur béton frais de minimum 4 % en fonction de son D_{max}. Les granulats seront non gélifs et l'utilisation d'additions minérales sera réglementée. Par ailleurs, si le prescripteur en fait la demande, une classe d'absorption d'eau par immersion WAI (0,45) A devra être garantie. Ainsi, l'absorption d'eau par immersion mesurée sur éprouvettes de contrôle conformément aux directives de la norme NBN B 15-215, sera inférieure à 5,8 % en moyenne (mesure de 3 éprouvettes) et 6,3 % en valeur individuelle conformément à l'annexe O de la NBN B 15-001.

Classe d'environnement	EE4 (Gel et sels de déverglaçage)			
	Béton non armé (BNA)		Béton armé (BA) ou précontraint (BP)	
Domaine d'utilisation	Béton non armé (BNA)		Béton armé (BA) ou précontraint (BP)	
Réseau de bulles d'air entraîné souhaité	non	oui	non	oui
Type de béton	T(0,45)	T(0,50)A	T(0,45)	T(0,45)A
Rapport eau/ciment	≤ 0,45	≤ 0,50	≤ 0,45	≤ 0,45
Dosage en ciment (kg/m ³)	≥ 340	≥ 320	≥ 340	≥ 340
Classe de résistance	≥ C35/45	≥ C25/30	≥ C35/45	≥ C30/37
Teneur en air du béton frais (%)	-	≥ 4 % ⁽¹⁾ ≥ 5 % ⁽²⁾ ≥ 6 % ⁽³⁾	-	≥ 4 % (1) ≥ 5 % (2) ≥ 6 % (3)
Facteur d'espacement \bar{L} des bulles d'air ⁽⁴⁾	-	< 200 μm	-	< 200 μm
Type de granulats ⁽⁵⁾	Non gélifs	Non gélifs	Non gélifs	Non gélifs
Classe d'absorption d'eau par immersion ⁽⁶⁾	WAI (0,45)	WAI (0,50)A	WAI (0,45)	WAI (0,45)A

(1) D'application si 20 mm ≤ D_{max} ≤ 31,5 mm
(2) D'application si 11,2 mm ≤ D_{max} ≤ 16 mm
(3) D'application si 5,6 mm ≤ D_{max} ≤ 10 mm
(4) Le facteur d'espacement doit être mesuré sur béton durci selon la norme NBN EN 480-11. Contrairement à la norme ASTM C457 / C457M où les bulles d'air sont comptabilisées jusque 1 mm, dans la norme européenne, elles sont comptées jusque 4 mm.
(5) La résistance au gel de granulats de dimension nominale D ≤ 4 mm est considérée comme satisfaisante ; celle des granulats de dimension nominale D > 4 mm (à l'exception des granulats légers) est satisfaisante si
- soit l'absorption d'eau mesurée selon NBN EN 1097-6 est ≤ 1,0 %,
- soit le coefficient Los Angeles mesuré selon NBN EN 1097-2 est ≤ 25 ou
- soit le granulats est conformément à la norme NBN EN 12620 de classe F₂ ou de classe MS₃, après essais respectivement suivant NBN EN 1367-1 et NBN EN 1367-2.
(6) Exigence d'application si elle est explicitement prescrite.

Tableau 3 – Valeurs limites applicables pour la composition et les propriétés du béton soumis au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage selon la norme NBN B 15-001:2012.

A noter que les PTV 100 et 200 relatifs aux produits préfabriqués en béton peuvent dans certains cas donner des spécifications légèrement différentes.

PRESCRIPTION D'UN BÉTON DE REVÊTEMENT CONFORMÉMENT AUX CAHIERS DES CHARGES-TYPES SB 250, CCT QUALIROUTES ET CCT 2011

Nous renvoyons le lecteur vers les prescriptions complètes des cahiers des charges-types régionaux mais les exigences en matière de composition et de performances des bétons routiers selon le SB 250, le CCT *Qualiroutes* et le CCT 2011 peuvent être résumées comme présentées au *tableau 4*. En raison de leur grande surface exposée, les revêtements routiers sont particulièrement soumis aux cycles de gel-dégel et aux sels de déverglaçage et sont généralement dans un état proche de la saturation en eau. De plus, les revêtements routiers doivent particulièrement être résistants à l'usure sous l'influence du trafic. C'est ainsi que les teneurs en ciment prescrites sont largement supérieures à celles prescrites par les normes NBN EN 206-1 et NBN B 15-001. Par ailleurs, les performances sont contrôlées de manière totalement différente de celles des bétons conformes à ces normes et il y a lieu de ne pas confondre ces deux types ou modes de prescription d'un béton. Des teneurs en ciment élevées pour la réalisation de bétons routiers de qualité sont absolument nécessaires afin d'obtenir une pâte présentant une faible porosité et donc une meilleure résistance aux cycles de gel-dégel. Néanmoins, pour ce faire, il y a lieu de respecter scrupuleusement les rapports E/C maximum prescrits voire même de confectionner des bétons présentant des teneurs en eau telles que les rapports E/C soient encore inférieurs. En effet, il devient inutile d'augmenter les teneurs en ciment en gardant les rapports E/C égaux, ceci revenant

à augmenter conjointement les teneurs en eau et donc à augmenter la porosité ou encore à diminuer la résistance aux sels fondants. Afin d'apprécier la résistance aux cycles de gel-dégel et aux sels de déverglaçage des revêtements en béton, deux types de performances sont dictées dans les cahiers des charges, l'absorption d'eau par immersion et la résistance à l'écaillage. Ces deux essais sont réalisés sur carottes forées in situ et l'éprouvette soumise aux essais est la tranche supérieure (d'environ 50 mm d'épaisseur) des carottes c'est-à-dire la surface supérieure du revêtement qui subit l'attaque des sels de déverglaçage. Il faut noter que généralement, seul l'essai d'absorption d'eau est réalisé. Si les résultats de cet essai ne sont pas conformes, les essais d'écaillages sont alors effectués pour juger de la qualité du béton. Selon l'expérience acquise, il n'y a pas nécessairement une contradiction entre un résultat d'absorption d'eau un peu trop élevé et une bonne durabilité aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage. En effet, la présence d'un réseau de bulles d'air rend le béton plus léger et donc tend à augmenter le résultat d'absorption d'eau exprimé en % de la masse sèche du béton. De plus, moyennant la présence d'un bon réseau de bulles d'air (teneur en air et facteur d'espacement) et une teneur en ciment élevée, les pertes après 30 cycles de gel-dégel selon la méthode ISO/DIS 4846.2 sont généralement faibles.

Tableau 4 – Valeurs limites applicables pour la composition et les propriétés des bétons routiers selon le SB 250, le CCT *Qualiroutes* et le CCT 2011.

Dimension nominale maximale des granulats du béton	Teneur minimale en ciment ⁽¹⁾	Rapport E/C ⁽²⁾	Teneur en air	Absorption d'eau par immersion ⁽³⁾	Ecaillages à 30 cycles ⁽⁴⁾
D _{max} = 32 mm	de 350 à 400 kg/m ³	≤ 0,50 à ≤ 0,45	-	Absi ≤ 6,5 % Absm ≤ 6,0 %	≤ 20 g/dm ² ou ≤ 10 g/dm ² ou ≤ 5 g/dm ²
6,3 mm < D _{max} ≤ 20 mm	de 350 à 400 kg/m ³	≤ 0,50 à ≤ 0,45	≥ 3 %	Absi ≤ 6,8 % Absm ≤ 6,3 %	≤ 20 g/dm ² ou ≤ 10 g/dm ² ou ≤ 5 g/dm ²
D _{max} ≤ 6,3 mm	de 375 à 425 kg/m ³	≤ 0,50 à ≤ 0,42	≥ 5 %	Absi ≤ 7,0 % Absm ≤ 6,5 %	≤ 20 g/dm ² ou ≤ 10 g/dm ² ou ≤ 5 g/dm ²

Résistance minimale à la compression⁽⁵⁾ de 50 à 70 N/mm² ou de 40 à 60 N/mm² dans le cas où un entraîneur d'air est incorporé au béton

- (1) La teneur en ciment minimale est fonction du type de voirie (intensité du trafic).
- (2) Le rapport E/C maximum est fonction du type de voirie (intensité du trafic).
- (3) Absi = absorption d'eau par immersion individuelle, Absm = absorption d'eau par immersion moyenne. Mesure sur tranches de 50 mm d'épaisseur découpées à la surface supérieure de carottes forées in situ.
- (4) Les écaillages maximum sont fonction du type de voirie (intensité du trafic). Mesure sur tranches découpées à la surface supérieure de carottes forées in situ et essai selon ISO/DIS 4846.2.
- (5) La résistance à la compression exigée est fonction du type de voirie (intensité du trafic). Elle est indépendante du D_{max} du béton et est mesurée sur carottes de 100 cm² de section et de 10 cm de hauteur forées in situ à minimum 90 jours.

ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE D'UN BÉTON AUX CYCLES DE GEL-DÉGEL EN PRÉSENCE DE SELS DE DÉVERGLAÇAGE (ÉCAILLAGES)

Tableau 5 – Description des essais de gel-dégel en présence de sels de déverglage généralement utilisés

Méthode Référence normative	ISO-DIS 4846.2	Slab test CEN/TS 12390-9	Sur éléments de pavage préfabriqués en béton NBN EN 1338 NBN EN 1339 NBN EN 1340 NTN 018
Variation de la température au cours d'un cycle	De $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ à $(-18 \pm 2) ^\circ\text{C}$ avec contrôle de la vitesse de refroidissement	De $(20 \pm 4) ^\circ\text{C}$ à $(-20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ avec contrôle de la vitesse de refroidissement	De $(20 \pm 4) ^\circ\text{C}$ à $(-18 \pm 2) ^\circ\text{C}$ avec contrôle de la vitesse de refroidissement
Point de contrôle de la température	Air ambiant du frigo	Sonde placée à la surface de l'éprouvette soumise aux sels	Sonde placée à la surface de l'éprouvette soumise aux sels
	Faces de l'éprouvette non soumises aux sels non isolées thermiquement	Faces de l'éprouvette non soumises aux sels isolées thermiquement	Faces de l'éprouvette non soumises aux sels isolées thermiquement
Durée d'un cycle	24 h	24 h	24 h
Nombre de cycles	30	56	28
Type de sel fondant	Solution à 3 % de CaCl_2	Solution à 3 % de NaCl	Solution à 3 % de NaCl
Critère	Repris dans les cahiers des charges relatifs aux revêtements routiers en béton – un béton dont pertes $\leq 10 \text{ g/dm}^2$ (1 kg/m^2) est considéré comme résistant	La norme NBN EN 13877-2 propose trois classes de résistance au gel-dégel pour les chaussées en béton. Les critères vont de 0,5 à 1,5 kg/m^2 de pertes au maximum. Néanmoins, à ce jour par manque d'expérience, ceux-ci ne sont pas appliqués en Belgique.	Repris dans les normes relatives aux produits préfabriqués en béton mais généralement $\leq 1,0 \text{ kg/m}^2$ en moyenne et $\leq 1,5 \text{ kg/m}^2$ en valeur individuelle

La résistance aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglage d'un béton peut être évaluée en laboratoire à partir de la mesure de la quantité de particules écaillées à la surface d'une éprouvette en béton recouverte d'une solution saline et soumise à une succession de cycles de gel-dégel. L'éprouvette est généralement la partie supérieure d'une carotte (tranche de surface effectivement en contact potentiel avec des sels

de déverglage) mais peut également être une face sciée d'une éprouvette, un cube ou l'entièreté d'un pavé en béton. Le tableau 5 présente les différentes méthodes appliquées en Belgique. Les différences principales résident dans le nombre de cycles de gel-dégel, les cycles de température et en particulier les vitesses de refroidissement et de dégel ou encore le type de sel fondant utilisé.



Eprouvette après 30 cycles de gel-dégel (ISO-DIS 4846.2)



Eprouvette d'essai et pertes récupérées lors du Slab test (CEN/TS 12390-9)

EXEMPLES DE COMPOSITIONS DE BÉTONS ET RÉSISTANCE AUX CYCLES DE GEL-DÉGEL EN PRÉSENCE DE SELS DE DÉVERGLAÇAGE

Les tableaux 6.1 et 6.2 présentent des compositions de bétons conformes aux exigences des normes NBN EN 206-1 et NBN B 15-001 d'une part (tableau 6.1) et à celles des cahiers des charges-types d'autre part (tableau 6.2) à l'exception du type de ciment CEM III/B qui n'est pas admis pour la confection de revêtements routiers. Mis à part quelques différences dans les paramètres analysés (rapport E/C, présence ou non d'air entraîné), les bétons des tableaux 6.1 et 6.2 se différencient fortement par leur squelette inerte. Les bétons routiers présentent un squelette granulométrique bien continu avec une teneur en sable faible (33 % de la totalité du squelette inerte) tandis que les autres bétons présentent un squelette granulométrique nettement plus instable (quantité de gravillons 2/6 relativement faible et teneur en sable élevée, de l'ordre de 41 % de la totalité du squelette inerte). L'instabilité de ces dernières compositions est accentuée par le fait que l'ouvrabilité est importante (classe de consistance S3). Ces différents facteurs peuvent engendrer des remontées importantes de mortier et de laitance vers la couche supérieure et rendent les bétons non résistants à l'agression des cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglage. En effet, bien que les teneurs en ciment CEM I 42,5 N LA ou CEM III/B 42,5 N HSR LA des bétons conformes aux normes NBN EN 206-1 et NBN B 15-001 sont quelque peu inférieures, leurs résistances aux sels de déverglage n'a pas de commune mesure à celles des bétons routiers. Or, ces bétons sont

bien conformes aux exigences minimales des normes NBN EN 206-1 et NBN B 15-001. La présence d'une teneur en air de 4,9 % ne permet même pas d'améliorer le comportement face aux sels fondants. On retiendra que la teneur en sable relativement élevée des bétons est un facteur très préjudiciable à leur résistance aux cycles de gel-dégel en présence de sels fondants et il est par conséquent important de limiter le dosage en sable au maximum. Pour une teneur en ciment ou en pâte donnée, une quantité de grains de sable plus élevée dilue la pâte de ciment dans la fraction mortier du béton et rend celui-ci moins résistant aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglage. L'ancienne prescription qui limitait le rapport sable/ciment (S/C) à maximum 1,5 est sans nul doute très sévère pour des bétons dont le D_{max} des granulats est de 20 mm mais une limitation de ce rapport à 1,7 serait favorable à l'obtention de bétons résistants à l'agression que constitue la succession de cycles de gel-dégel avec sels de déverglage. A remarquer également que la résistance aux sels de déverglage des bétons ne peut pas être mise en corrélation avec la résistance à la compression.

Des dégâts dus à l'alternance des cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglage sont fréquemment observés à la surface de revêtements de sols industriels. Il ne faut pas oublier qu'à l'extérieur, les sels fondants sont apportés par les roues des véhicules en quantités importantes. De plus, ces bétons sont rarement composés de manière à leur permettre de résister à cette agression, ils sont souvent mis en œuvre de façon incorrecte et de surcroît, sont généralement dans un état voisin de saturation en eau



Type d'application		Bétons conformes aux normes NBN EN 206-1 et NBN B 15-001					
Type de béton	C35/45 EE4 BNA, BA et BP S3 20 mm Sans air entrainé, WAI (0,45) (E/C = 0,45)	C30/37 EE3 BA et BP S3 20 mm Sans air entrainé, WAI (0,50) (E/C = 0,50)	C30/37 EE4 BA et BP S3 20 mm Avec air entrainé, WAI (0,45)A (E/C = 0,45)	C35/45 EE4 BNA, BA et BP S3 20 mm Sans air entrainé, WAI (0,45) (E/C = 0,45)	C30/37 EE3 BA et BP S3 20 mm Sans air entrainé, WAI (0,50) (E/C = 0,50)	C30/37 EE4 BA et BP S3 20 mm Avec air entrainé, WAI (0,45)A (E/C = 0,45)	
Gravillons concassés 14/20	352 kg/m ³	345 kg/m ³	335 kg/m ³	355 kg/m ³	-	-	
Gravillons concassés 6/14	600 kg/m ³	588 kg/m ³	570 kg/m ³	605 kg/m ³	-	-	
Gravillons concassés a2/6	150 kg/m ³	147 kg/m ³	143 kg/m ³	151 kg/m ³	-	-	
Sable de rivière 0/2	771 kg/m ³	756 kg/m ³	734 kg/m ³	778 kg/m ³	-	-	
CEM I 42,5 N LA	-	-	-	363 kg/m ³	-	-	
CEM III/B 42,5 N HSR LA	362 kg/m ³	365 kg/m ³	361 kg/m ³	-	-	-	
Superplastifiant	1500 ml/m ³	-	615 ml/m ³	1610 ml/m ³	-	-	
Entraîneur d'air	-	-	345 ml/m ³	-	-	-	
Eau totale	173 l/m ³	192 l/m ³	174 l/m ³	173 l/m ³	-	-	
Essais sur béton frais	Slump	140 mm	140 mm	140 mm	140 mm	-	
	Teneur en air	0,9 %	0,8 %	4,9 %	1,3 %	-	
	Masse volumique humide	2412 kg/m ³	2392 kg/m ³	2316 kg/m ³	2427 kg/m ³	-	
Essais sur béton durci	Résistance à la compression	sur cubes de 15 cm à 28 jours	54,9 N/mm ²	48,3 N/mm ²	47,6 N/mm ²	60,5 N/mm ²	-
		sur cubes de 15 cm à 91 jours	61,4 N/mm ²	53,8 N/mm ²	49,8 N/mm ²	70,3 N/mm ²	-
		sur carottes (100 cm ²) à 28 jours	60,0 N/mm ²	54,9 N/mm ²	50,2 N/mm ²	69,6 N/mm ²	-
		sur carottes (100 cm ²) à 91 jours	-	-	-	-	-
	Absorption d'eau par immersion ⁽¹⁾	5,1 % - 5,1 % - 5,0 % moy : 5,1 %	5,8 % - 5,6 % - 5,7 % moy : 5,7 %	5,5 % - 5,6 % - 5,8 % moy : 5,6 %	4,7 % - 4,8 % - 4,7 % moy : 4,7 %	-	-
Résistance au gel, écaillages à 30 cycles ⁽²⁾	42,9 g/dm ²	51,7 g/dm ²	42,6 g/dm ²	49,8 g/dm ²	-	-	

(1) L'absorption d'eau par immersion est mesurée sur tranches découpées à la surface supérieure de carottes de 100 cm²

(2) La résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage est mesurée à 90 jours d'âge sur tranches découpées à la surface supérieure de carottes de 100 cm², essai selon ISO/DIS 4846.2

Tableau 6.1 – Exemples de compositions de bétons, influence de plusieurs paramètres sur la résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage – Cas de bétons conformes aux normes NBN EN 206-1 et NBN B 15-001.

Type d'application		Bétons routiers					
Type de béton	D _{max} = 20 mm CEM = 375 kg/m ³ E/C ≤ 0,50 Sans air entrainé	D _{max} = 20 mm CEM = 375 kg/m ³ E/C ≤ 0,45 Sans air entrainé	D _{max} = 20 mm CEM = 375 kg/m ³ E/C ≤ 0,45 Avec air entrainé	D _{max} = 20 mm CEM = 375 kg/m ³ E/C ≤ 0,50 Sans air entrainé	D _{max} = 20 mm CEM = 375 kg/m ³ E/C ≤ 0,45 Sans air entrainé	D _{max} = 20 mm CEM = 375 kg/m ³ E/C ≤ 0,45 Avec air entrainé	
Gravillons concassés 14/20	387 kg/m ³	389 kg/m ³	376 kg/m ³	394 kg/m ³	394 kg/m ³	381 kg/m ³	
Gravillons concassés 6/14	626 kg/m ³	630 kg/m ³	608 kg/m ³	638 kg/m ³	637 kg/m ³	616 kg/m ³	
Gravillons concassés a2/6	243 kg/m ³	245 kg/m ³	237 kg/m ³	247 kg/m ³	248 kg/m ³	239 kg/m ³	
Sable de rivière 0/2	613 kg/m ³	617 kg/m ³	595 kg/m ³	625 kg/m ³	624 kg/m ³	603 kg/m ³	
CEM I 42,5 N LA	-	-	-	375 kg/m ³	376 kg/m ³	379 kg/m ³	
CEM III/B 42,5 N HSR LA	377 kg/m ³	374 kg/m ³	379 kg/m ³	-	-	-	
Plastifiant	-	2300 ml/m ³	195 ml/m ³	-	480 ml/m ³	-	
Entraîneur d'air	-	-	1130 ml/m ³	-	-	450 ml/m ³	
Eau totale	184 l/m ³	169 l/m ³	171 l/m ³	175 l/m ³	170 l/m ³	171 l/m ³	
Essais sur béton frais	Slump	40 mm	35 mm	40 mm	25 mm	25 mm	
	Teneur en air	0,7 %	1,3 %	3,6 %	1,0 %	1,2 %	
	Masse volumique humide	2430 kg/m ³	2425 kg/m ³	2367 kg/m ³	2454 kg/m ³	2449 kg/m ³	2389 kg/m ³
Essais sur béton durci	Résistance à la compression	sur cubes de 15 cm à 28 jours	-	-	-	-	-
		sur cubes de 15 cm à 91 jours	-	-	-	-	-
		sur carottes (100 cm ²) à 28 jours	59,0 N/mm ²	65,0 N/mm ²	52,8 N/mm ²	69,5 N/mm ²	66,6 N/mm ²
		sur carottes (100 cm ²) à 91 jours	70,7 N/mm ²	74,4 N/mm ²	61,2 N/mm ²	82,2 N/mm ²	77,7 N/mm ²
	Absorption d'eau par immersion ⁽¹⁾	6,3 %	5,7 %	6,3 %	5,3 %	5,1 %	
Résistance au gel, écaillages à 30 cycles ⁽²⁾	16,5 g/dm ²	13,1 g/dm ²	9,0 g/dm ²	11,7 g/dm ²	11,4 g/dm ²		

(1) L'absorption d'eau par immersion est mesurée sur tranches découpées à la surface supérieure de carottes de 100 cm²

(2) La résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage est mesurée à 90 jours d'âge sur tranches découpées à la surface supérieure de carottes de 100 cm², essai selon ISO/DIS 4846.2

Tableau 6.2 – Exemples de compositions de bétons, influence de plusieurs paramètres sur la résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage – Cas de bétons routiers

3. LE GEL DU BÉTON FRAIS

L'eau pure et libre se congèle à 0 °C avec une augmentation de volume de 9 %. Tout comme les tuyauteries éclatent sous l'action du gel par l'expansion du contenu, le béton frais est détruit par l'augmentation du volume de l'eau ayant gelé.

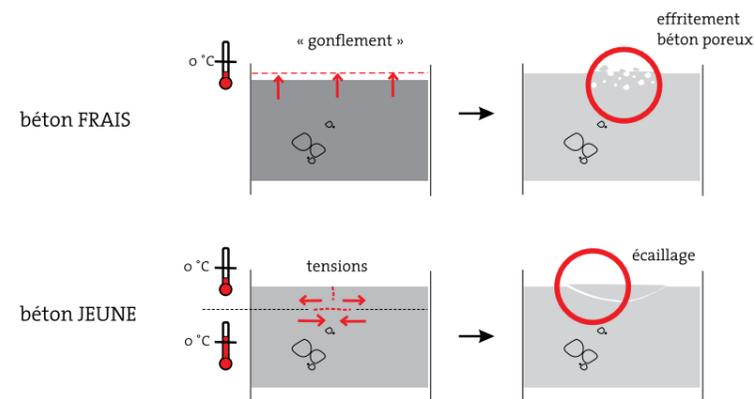
Deux cas sont à distinguer (figure 7) :

- quand l'eau gèle lorsque le béton n'a pas encore fait prise (béton frais) : la dilatation peut être facilement reprise par le béton encore plastique. Cela a comme effet que le

béton s'élève hors du coffrage. Par conséquent, après le durcissement, la qualité du béton est très mauvaise puisque le béton est insuffisamment serré ;

- quand l'eau gèle lorsque le béton a fait prise mais est encore très jeune : la résistance développée est trop faible pour que le béton puisse reprendre les contraintes de traction provoquées par la différence de température entre la surface et l'intérieur. La surface s'écaillera.

Fig. 7 - Gel du béton non encore durci.



PRÉCAUTIONS A PRENDRE

Par temps froid, il y a lieu de ne pas utiliser un ciment à faible classe de résistance mais des ciments de classe de résistance élevée (ciment de classe 42,5 voire 52,5). Il est utile d'augmenter le dosage en ciment (un dosage en ciment d'au moins 350 kg/ m³ est recommandé) sans pour cela augmenter la quantité d'eau. Il faudra donc éventuellement ajouter un adjuvant superplastifiant ou augmenter son dosage pour obtenir une fluidité acceptable.

Les adjuvants accélérateurs de prise et/ou de durcissement qui permettent de diminuer le temps de prise du ciment dans le béton ou qui accélèrent le développement des résistances initiales du béton en modifiant ou non la durée de prise sont généralement employés pour mettre les bétons hors gel, c'est-à-dire pour leur donner une résistance à la compression de 5 N/mm² avant l'arrivée du gel, valeur

qui est considérée comme un seuil critique à dépasser. Les adjuvants à base de chlorures sont très efficaces à ce sujet mais sont sources de corrosion des armatures et par conséquent interdits dans les bétons armés et précontraints conformément à la norme NBN EN 206-1.

Des mesures de protection particulières sont également possibles si la température est inférieure à 5 °C ou s'il y a lieu de bétonner contre des parois dont la température est inférieure à 3 °C. Il est par exemple possible de couvrir le béton (l'isoler du froid) tel que représenté à la figure 8. Il faut toutefois songer au fait que toute isolation mouillée n'isole rien du tout. Une solution plus difficile à mettre en œuvre en pratique est de chauffer l'eau de gâchage ou les granulats. Le tableau 7 résume quelques précautions complémentaires.

A RETENIR

Le bétonnage par temps froid est conditionné à la règle générale suivante : la température de la surface la plus exposée du béton doit être d'au moins + 5 °C pendant les 72 premières heures qui suivent la mise en place.

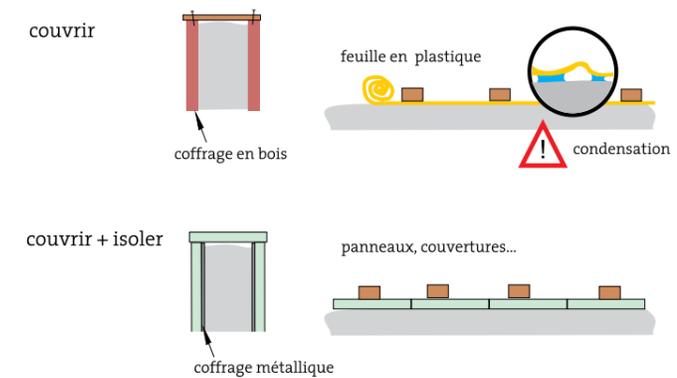


Fig. 8 - Protection du béton frais contre le froid

	A FAIRE	A NE PAS FAIRE
La météo	<ul style="list-style-type: none"> • s'enquérir des conditions climatiques avant le début des travaux 	
Les granulats	<ul style="list-style-type: none"> • les stocker si possible à l'abri du gel 	<ul style="list-style-type: none"> • utiliser des granulats gelés (particulièrement valable pour le sable)
L'eau	<ul style="list-style-type: none"> • utiliser de l'eau préchauffée ; la température du béton fraîchement mélangé ne peut toutefois pas dépasser 40 °C 	<ul style="list-style-type: none"> • utiliser de l'eau très froide
Les coffrages et les armatures	<ul style="list-style-type: none"> • utiliser de préférence des coffrages en bois • éliminer toute trace de neige et de glace présente sur les coffrages et les armatures 	<ul style="list-style-type: none"> • utiliser des coffrages métalliques • bétonner contre un élément gelé
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • bétonner pendant les heures les plus chaudes de la journée • protéger le béton contre l'évaporation de l'eau (produit de cure) et contre les déperditions de chaleur en couvrant les surfaces 	<ul style="list-style-type: none"> • bétonner lorsque la température ambiante est inférieure à + 5 °C • décoffrer ou enlever les protections trop vite, le béton risque de subir alors un choc thermique • décoffrer en période de gel

Tableau 7 - Précautions complémentaires afin de protéger le béton frais contre le gel.



Exemples de bétons gelés à l'état frais :

- filet d'eau, carotte forée dans l'élément ; on remarque le décompactage du béton en surface



- écaillage à la surface d'un sol en béton lissé

La Belgique comporte un vaste réseau routier dont de nombreuses routes en béton. Il n'est pas rare de rencontrer des routes en béton de plus de 40 ans d'âge. A l'époque, la mise en œuvre du béton était réalisée entre coffrages fixes au moyen de machines circulant sur les rails du coffrage. Ensuite, les premières machines à coffrages glissants ont été utilisées, notamment sur l'E42 (photo ci-dessous) dont l'inauguration a eu lieu en décembre 1972. Une grande attention était portée à la composition du béton, mais aussi au compactage, à la finition et à la protection du béton jeune contre la dessiccation.

La composition de béton la plus utilisée était la composition à granulométrie continue type A des Ponts et Chaussées. Elle était constituée comme suit par mètre cube de béton en place :

pierrailles concassées 22/40 :	750 kg/m ³
pierrailles concassées 8/22 :	375 kg/m ³
pierrailles concassées 2/8 :	350 kg/m ³
sable de rivière 0/2 :	405 kg/m ³
ciment :	400 kg/m ³
eau :	160 l/m ³

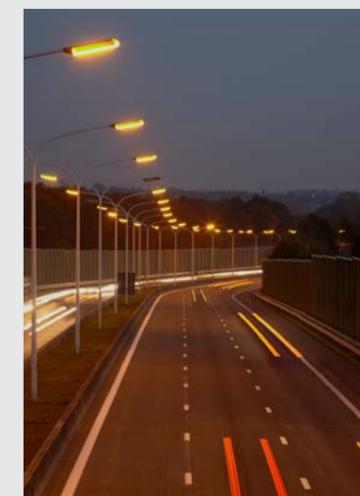
Remarque : à l'époque, les calibres étaient établis sur passoirs à trous ronds.

Aujourd'hui, ils le sont sur tamis à mailles carrées ou des tôles perforées. Ainsi, un 22/40 était très proche d'un 20/32 actuel, un 8/22 d'un 6/20 et un 2/8 d'un 2/6. De par la qualité du béton qui en résulte, ces revêtements présentent une résistance mécanique et une résistance à l'usure très élevées. La résistance à la compression minimale imposée était de 60 N/mm² à 56 jours. Il est à remarquer que ces bétons résistent très bien aux sels de déverglaçage malgré l'absence d'un adjuvant entraîneur d'air. Ceci est dû à la qualité de la pâte (faible teneur en eau, haute teneur en ciment) et à la faible quantité de sable. A l'époque, les cahiers des Charges-types imposaient pour la composition des bétons routiers un rapport sable/ciment (S/C) compris entre 1,0 et 1,5. Aujourd'hui, afin d'améliorer le confort acoustique des revêtements en béton, bon nombre de compositions sont de granulométrie plus fine. La quantité de sable y est donc beaucoup plus importante (généralement 600 kg/m³ de sable de rivière pour un béton 0/20 mm et plus encore lorsque le D_{max} diminue). L'utilisation d'un entraîneur d'air dans ces bétons est absolument nécessaire.



(page suivante:)
 Le centre de Meise et le Jardin Botanique National sont longés par deux voies parallèles : la N277 (Nieuwelaan) – et l'autoroute A12. Dans les deux cas, il s'agit de routes en béton, bien entendu de deux générations différentes. Réalisée en 1952, la Nieuwelaan est aujourd'hui toujours en service. Après soixante hivers, le revêtement fait toujours preuve d'une résistance appréciable! Le tronçon de la A12 au niveau de Meise a été reconstruit en 2001 en béton armé continu. Ce type de béton est évidemment très différent de celui de la Nieuwelaan. Il résiste cependant tout aussi bien aux sollicitations dues au trafic et aux intempéries.

(photos A. Nullens)



DES REVÊTEMENTS EN BÉTON RÉSISTANT AUX CYCLES DE GEL-DÉGEL EN PRÉSENCE DE SELS DE DÉVERGLAÇAGE

QUELQUES EXEMPLES

		Ans, Place Mattéoti Première application d'un revêtement en béton coloré lavé en Belgique Mise en œuvre à la poutre vibrante en septembre 1992		Treignes Revêtement en béton coloré lavé Mise en œuvre à la poutre vibrante en juin 1998	
		Gravillons 4/16 Sable de rivière 0/2 CEM III/A 42,5 N LA Pigment rouge	1285 kg/m ³ 515 kg/m ³ 350 kg/m ³ 25 kg/m ³	Grès 4/6 et 6/14 Sable de rivière 0/2 CEM III/A 42,5 N LA Pigment jaune	1235 kg/m ³ 535 kg/m ³ 400 kg/m ³ 12 kg/m ³
		Superplastifiant et entraîneur d'air		Plastifiant et entraîneur d'air	
Essais sur béton frais	Eau totale	207 l/m ³		215 l/m ³	207 l/m ³
	Slump	70 mm		105 mm	80 mm
	Teneur en air	4,5 %		3,9 %	2,7 %
Essais sur béton durci	Résistance à la compression ^(a)	47,7 N/mm ²		42,6 N/mm ²	54,6 N/mm ²
	Absorption d'eau par immersion ^(b)	5,8 %		7,5 %	7,3 %
	Résistance au gel, écaillages à 30 cycles ^(c)	3,8 g/dm ² (partie protégée contre la dessiccation après dénudage)	10,0 g/dm ² (partie non protégée contre la dessiccation après dénudage)	19,6 g/dm ²	15,5 g/dm ²
(a) La résistance à la compression est mesurée sur carottes de 100 cm ² à 90 jours d'âge		Malgré la teneur en ciment relativement faible et la teneur en eau assez élevée, la bonne durabilité du revêtement est sans nul doute à mettre en relation avec une teneur en sable faible (rapport S/C = 1,5), une bonne teneur en air entraîné, une bonne mise en œuvre et une bonne protection du béton contre la dessiccation.		Malgré la teneur en ciment élevée et un rapport S/C très faible (= 1,3), la durabilité aux sels de déverglaçage n'est pas entièrement satisfaisante. La teneur en eau élevée et une teneur en air insuffisante sont responsables de ces résultats. De plus, lors de la mise en œuvre du béton, celui-ci avait tendance à présenter une laitance importante en surface (teneur en pâte élevée).	
(b) L'absorption d'eau par immersion est mesurée sur tranches découpées à la surface supérieure de carottes de 100 cm ²					
(c) La résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage est mesurée à au moins 90 jours d'âge sur tranches découpées à la surface supérieure de carottes de 100 cm ² , essai selon ISO/DIS 4846.2					
Photos : octobre 2011				Photo : août 2012	
					

Pour des bétons soumis à des cycles de gel-dégel associés à des sels de déverglaçage, les mesures de précautions en matière de composition peuvent être résumées comme suit :

- teneur minimale en ciment : 375 kg/m³ ;
- rapport E/C ≤ 0,45 et teneur en eau ≤ 180 l/m³ ;
- sable de bonne qualité (sable à grains ronds) et en quantité limitée, rapport sable/ciment (S/C) ≤ 1,7 voire même 1,5 ;
- usage d'un entraîneur d'air dans le béton tel que la teneur en air du béton frais soit de minimum 4 %.

De plus, la vibration du béton sera soignée et la protection contre la dessiccation aura lieu immédiatement après celle-ci.

Ces conditions sont indispensables car c'est bien la peau des éléments en béton qui est sévèrement exposée aux sels fondants. Les caractéristiques de la peau sont étroitement liées à la mise en œuvre (vibration, finition de surface, mûrissement humide).

Pour les revêtements en béton lavé, un produit de cure sera encore pulvérisé à la surface du béton durci après les opérations de dénudage.

		Gembloux Revêtement en béton coloré lavé Mise en œuvre à la poutre vibrante en août 1998		Herne Revêtement routier en béton dénudé Mise en œuvre à la machine à coffrages glissants en avril 1996		Leuven Revêtement industriel extérieur en béton lissé à l'hélicoptère – Béton fluide Mise en œuvre manuelle sans vibration en octobre 1997	
		400 kg/m ³ de CEM III/A 42,5 N LA Teneur en sable de rivière 0/2 : 33 % de la totalité du squelette inerte Ajout d'un pigment jaune		Porphyre 4/6 Sable de rivière 0/2 CEM III/A 42,5 N LA	995 kg/m ³ 700 kg/m ³ 425 kg/m ³	Classe de résistance C30/37 375 kg/m ³ de CEM III/A 42,5 N LA Fibres métalliques : 30 kg/m ³ Teneur en sable 0/2 : 37 % de la totalité du squelette inerte	
		Superplastifiant et entraîneur d'air		Plastifiant et entraîneur d'air		Superplastifiant	
		210 l/m ³	205 l/m ³	187 l/m ³		212 l/m ³	212 l/m ³
		30 mm	35 mm	25 mm		170 mm	170 mm
		4,4 %	4,5 %	4,2 %		1,2 %	1,3 %
		54 N/mm ²	52,2 N/mm ²	76,3 N/mm ²		55,7 N/mm ²	56,4 N/mm ²
		6,5 %	7,0 %	5,3 %		7,0 %	7,1 %
		7,5 g/dm ²	8,3 g/dm ²	4,6 g/dm ²		37,8 g/dm ²	39,8 g/dm ²
		Cet exemple est à mettre en relation avec celui de Treignes. La durabilité aux sels de déverglaçage est bien meilleure. La teneur en air plus élevée et l'ouvrabilité plus faible (risque de remontée de laitance en surface plus faible) expliquent ces résultats.		Ce béton présente de nombreuses qualités (teneur en ciment élevée, teneur en eau faible, teneur en air satisfaisante) pour résister aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage et les résultats le prouvent. De plus, la mise en œuvre à la slipform évite la création d'une couche de laitance importante en surface.		Ce revêtement en béton ne résiste pas aux sels de déverglaçage. La qualité du béton (haute teneur en eau et absence d'air entraîné) conjuguée à de nombreux défauts de mise en œuvre (absence de vibration, finition à l'hélicoptère, protection tardive contre la dessiccation) sont les raisons de ce manque de durabilité.	
Photo : avril 2012				Photos : aspect du béton en avril 1996 et carottes extraites en mai 2011, y compris dans une fissure transversale du revêtement en béton armé continu			
							

NORMES OU DOCUMENTS NORMATIFS CITÉS

- [1] NBN B 15-001:2012 : Supplément à la NBN EN 206-1:2001 - Béton - Spécification, performances, production et conformité, Bruxelles : NBN, 2012
- [2] NBN EN 206-1:2001 : Béton - Spécification, performances, production et conformité, Bruxelles : NBN, 2001
- [3] ASTM C457 / C457M – 11 : Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.
- [4] PTV 100 (+ Addendum) : Produits préfabriqués en béton non armé, en béton armé et en béton renforcé de fibres d'acier pour travaux d'infrastructure, Bruxelles : PROBETON, 2011
- [5] PTV 200 (+ Addendum) : Eléments de structure préfabriqués en béton armé et précontraint - Spécifications pour les matières premières, la fabrication, les éléments finis et le calcul, Bruxelles : PROBETON, 2005
- [6] CEN/TR 15177 : 2006 : Testing the freeze-thaw resistance of concrete – Internal structural damage, Bruxelles : CEN, 2006
- [7] NBN EN 12350-7 : Essais pour béton frais - Partie 7 : Teneur en air - Méthode de la compressibilité, Bruxelles : NBN, 2009
- [8] NBN EN 480-11 : Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Méthodes d'essai - Partie 11 : Détermination des caractéristiques des vides d'air dans le béton durci, Bruxelles : NBN, 2005
- [9] Cahier des Charges-type Qualiroutes, Service public de Wallonie, 2011
- [10] Standaardbestek 250 voor de wegenbouw, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, versie 2.2., 2010
- [11] Cahier des Charges-type 2011, Ministère de la Région de Bruxelles-Capitales, Administration de l'Équipement et des Déplacements.
- [12] CEN/TS 12390-9:2006 : Testing hardened concrete – Part 9 : Freeze-thaw resistance of concrete – Scaling, Bruxelles : CEN, 2006
- [13] ISO/DIS 4846.2 : Béton – Détermination de la résistance à l'écaillage des surfaces soumises à des agents chimiques dégivrants, 1984
- [14] NBN EN 1338 : Pavés en béton – Prescriptions et méthodes d'essai, Bruxelles : NBN, 2003
- [15] NBN EN 1339 : Dalles en béton – Prescriptions et méthodes d'essai, Bruxelles : NBN, 2003
- [16] NBN EN 1338 : Eléments pour bordures en béton – Prescriptions et méthodes d'essai, Bruxelles : NBN, 2003
- [17] NTN 018 : Essais sur béton - Résistance aux sels de déverglaçage, Bruxelles : PROBETON, 1999
- [18] NBN EN 13877-2 : Chaussées en béton – Partie 2 : Exigences fonctionnelles pour les chaussées en béton, Bruxelles : NBN, 2004



CONCLUSION

Les ouvrages en béton lorsqu'ils ne sont pas en contact direct de l'eau résistent généralement bien aux cycles de gel-dégel dans la mesure où le béton a été formulé et mis en œuvre dans les règles de l'art. Par contre, les parties d'ouvrages en contact prolongé avec l'eau y sont beaucoup plus sensibles. L'obtention d'une durabilité convenable demande que les règles de bonne pratique en matière de composition, de mise en œuvre et de cure soient scrupuleusement respectées.

Si les cycles de gel-dégel sont associés à des sels de déverglaçage, les bétons doivent de plus contenir un réseau de bulles d'air entraîné. Pour ces bétons soumis à un tel environnement agressif, les mesures de précautions en matière de composition peuvent être résumées comme suit :

- teneur minimale en ciment : 375 kg/m³ ;
- rapport E/C $\leq 0,45$ et teneur en eau ≤ 180 l/m³ ;
- sable de bonne qualité et en quantité limitée, rapport sable/ciment (S/C) $\leq 1,7$
- usage d'un entraîneur d'air dans le béton tel que la teneur en air du béton frais par rapport au D_{max} du granulat soit de :
 - minimum 4 %-v d'air pour un D_{max} compris entre 20 et 31,5 mm;
 - minimum 5 %-v d'air pour un D_{max} compris entre 11,2 et 16 mm;
 - minimum 6 %-v d'air pour un D_{max} compris entre 5,6 et 10 mm.

De plus, la vibration du béton sera soignée et la protection contre la dessiccation aura lieu immédiatement après celle-ci. Ces conditions sont indispensables car c'est bien la peau des éléments en béton qui est sévèrement exposée aux sels fondants. Les caractéristiques de la peau sont étroitement liées à la mise en œuvre (vibration, finition de surface, mûrissement).

Lors du bétonnage en hiver, il y a lieu d'éviter de bétonner lorsque la température est inférieure ou égale à +1 °C et des précautions (isolation, ...) doivent être prises lorsque la température risque de descendre sous les +5 °C durant les 72 heures qui suivent le bétonnage. Il faut également proscrire l'épandage de sels de déverglaçage sur des bétons âgés de moins de 6 semaines.

Enfin, pour des bétons trop poreux, la résistance aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage peut être améliorée en pulvérisant en surface un produit d'imprégnation.

photo: Manwolste
dos de couverture: Pazham (stockfreeimages.com)



T-4

Ce bulletin est publié par
FEBELCEM
Fédération de l'Industrie Cimentière Belge
Bld du Souverain 68 - 1170 Bruxelles
tél. 02 645 52 11 - fax 02 640 06 70
www.febelcem.be
info@febelcem.be

Auteur : Ir C. Ployaert

Dépôt légal :
D/2012/0280/03

Ed. resp.: A. Jasienski

BIBLIOGRAPHIE

- [1] JASIENSKI A.
Les Bétons routiers résistant au gel et aux produits de déverglaçage,
Dossier Ciment, bulletin n°2, FEBELCEM, 1994
- [2] NEVILLE A.
Propriétés des bétons, Paris: Eyrolles, 2000
- [3] La durabilité des bétons — Bases scientifiques pour la formulation de
bétons durables dans leur environnement, Association Technique de
l'industrie des Liants Hydrauliques, Paris: Presse de l'école des ponts
et chaussées, 2008
- [4] Code de bonne conduite pour l'utilisation des entraîneurs d'air dans
les bétons routiers. Application, formulation et contrôle, Centre de
recherches routières, Recommandation R 73 / 02, Bruxelles 2002
- [5] HONDERMARCQ H.
Circulaire BRA/591/6 n° 496 217 : Service d'hiver, épandage sur les
routes en béton de ciment nouvellement construites, Ministère des
Travaux publics — Administration des Routes, Bruxelles 1973
- [6] PLOYAERT C.
 limiter la fissuration : condition indispensable à la durabilité des
bétons, Dossier Ciment, bulletin T-3, FEBELCEM, 2010

infobeton.be

