

ETUDE ET COMPARAISON DES METHODES D'ESSAIS DE RESISTANCE DES BETONS AUX CYCLES DE GEL-DEGEL SELON LA PRENV 12390-9, L'ISO/DIS 4846-2 ET LA NTN-018

**PROF. DR. IR. LUCIE VANDEWALLE¹, DR. IR. ANNE BEELDENS²,
DR. CHRISTIAN PIERRE³, DR. IR. OLIVIER GERMAIN³, ING. OLIVIER DE
MYTTENAERE²**

**¹Katholiek Universiteit Leuven, ²Centre de Recherches Routières,
³Centre national de Recherche scientifique et technique pour l'Industrie
Cimentière**

Résumé

Dans cet article, nous présentons le projet de recherche prénormative mené pendant 4 ans de manière conjointe par le Centre national de Recherche scientifique et technique pour l'Industrie Cimentière, le Centre de Recherches routières et la Katholieke Universiteit Leuven. Celui-ci a pour but de comparer entre-elles 5 méthodes d'essai d'évaluation de la résistance des bétons aux cycles gel-dégel (les 3 méthodes proposées par la prEN 12390-9, la NTN-018 de Probeton et l'ISO/DIS 4846-2). Les objectifs principaux de cette comparaison sont : déterminer la méthode d'essai la plus adéquate en fonction du type de béton à tester, fixer des critères à respecter par les bétons en fonction de l'application concernée.

Samenvatting

Deze paper geeft de resultaten weer van het prenormatief onderzoek dat gedurende 4 jaar gevoerd is als samenwerking tussen het Onderzoekscentrum voor de cementnijverheid, het Opzoekingscentrum voor de wegenbouw en de Katholieke Universiteit Leuven. Dit onderzoek had als doel de 5 verschillende methodes ter bepaling van de weerstand van beton tegen vorst-dooicycli onderling te vergelijken. (de 3 methodes voorgesteld door de prEN 12390-9, de methode volgens NTN-018 van Probeton en volgens de ISO/DIS 4846-2). De belangrijkste doelstellingen van deze onderlinge vergelijking zijn: bepalen van de meest toepasselijke methode in functie van het type beton dat getest wordt, limieten vastleggen die niet overschreden mogen worden voor bepaalde toepassingen van het beton.

1. Introduction

La résistance des bétons au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage est d'une importance primordiale pour les applications routières. En vue de garantir la durabilité des bétons routiers mis en oeuvre, les différents Cahiers des Charges Types fixent des exigences relatives à la composition des bétons : teneur minimale en ciment, rapport E/C maximum et, éventuellement, teneur en air entraîné.

Le projet de norme prENV 12390-9 existe depuis 2002. Celui-ci propose trois méthodes différentes pour l'évaluation de la résistance des bétons aux cycles gel-dégel : le Slab-test comme méthode de référence, le Cube-test et le CF-CDF test comme méthodes alternatives (CF-CDF respectivement sans et avec sels de déverglaçage).

L'introduction d'une norme européenne nécessite non seulement de déterminer la méthode la plus adéquate, mais également de définir des critères (pertes de masse par écaillage) en relation avec les domaines d'application des bétons.

C'est dans ce but qu'un programme de recherche a été conjointement démarré par le Centre national de Recherche scientifique et technique pour l'Industrie Cimentière (CRIC), le Centre de Recherches routières (CRR) et la Katholieke Universiteit Leuven (KUL). Dans ce cadre, les méthodes actuellement utilisées en Belgique, l'ISO/DIS 4846-2 et la NTN-018 de Probeton, sont comparées aux nouvelles méthodes proposées dans le projet de norme.

Le projet est organisé en deux phases :

- Phase 1 : campagne d'essais Round-Robin auprès des 3 partenaires, réalisée en soumettant un seul et même béton aux 5 méthodes d'essais. Le but de ce Round-Robin est de voir comment les différentes méthodes peuvent être reproduites par les différents laboratoires. L'analyse du travail réalisé par les 3 laboratoires a mis en évidence une interprétation différente de la norme, insuffisamment précise pour ce qui concerne la préparation de l'éprouvette. Celle-ci a pourtant une influence majeure sur les résultats des essais, c'est pourquoi cette première phase a donné lieu à la rédaction d'un mode opératoire commun pour les 5 méthodes d'essai.
- Phase 2 : dans cette seconde phase, l'influence de la composition du mélange et la finition de surface du béton est analysée. Différentes compositions ont été étudiées : divers teneurs en ciment, adjonction ou non d'air entraîné et différentes natures de granulats, de manière à soumettre aux essais plusieurs compositions types de bétons routiers (basées sur les

prescriptions du CCT RW99) et de structure. L'influence de la finition de surface du béton a également été étudiée (surface brossée ou désactivée).

2. Description des méthodes d'essai

Les 5 méthodes d'essai consistent à soumettre les éprouvettes, en contact avec de l'eau ou une solution saline, à une série de cycles gel-dégel. La résistance du béton est définie sur base des pertes de masse cumulées par écaillage à la surface du béton. Dans cet article, nous ne discuterons que les essais en présence de sels de déverglaçage. Dans le cas des essais réalisés avec de l'eau uniquement, les pertes de masse étaient limitées : de 10 à 50 fois inférieures à celles obtenues avec sels, en fonction de la méthode d'essai et du béton testé.

Les paramètres suivants sont importants pour une interprétation correcte des résultats :

- La surface de l'éprouvette en contact avec la solution (surface supérieure, surface inférieure, surface décoffrée, éprouvette totalement immergée...) ;
- La hauteur de l'éprouvette ;
- Le conditionnement de l'éprouvette avant l'essai ;
- Le pré-traitement de la surface du béton (frais ou durci) en contact avec la solution : dénudage chimique, brossage, surface sciée...
- Le cycle gel-dégel : températures maximum et minimum, durée, taux de refroidissement et de réchauffement, ...
- Type de sel de déverglaçage (NaCl ou CaCl₂) ;
- Isolation thermique de l'éprouvette ;
- Localisation de la mesure de température (par laquelle l'enceinte climatique est dirigée) ;
- Le système de refroidissement et de réchauffement (dans l'eau ou par air) ;
- La puissance de l'enceinte réfrigérante.

Tous les essais sont effectués sur des carottes de 113 mm de diamètre. Les autres paramètres sont repris au tableau 1.

Méthode d'essai	Nombre d'échantillons	Hauteur des échantillons en mm	Nombre et durée des cycles	Sel de déverglaçage
Slab-test	4	50 ± 2	56 24 h	3% NaCl
NTN-018	3	100 ± 2	56 24 h	3% NaCl
Cube-test	4	100 ± 2	56 24 h	3% NaCl
CF- CDF	5	75 ± 2	56- 28 12 h	3% NaCl
ISO-DIS	3	45 ± 2	30 24 h	3% CaCl ₂

Tableau 1 : Paramètres pour les 5 méthodes d'essai

La méthode ISO/DIS diffère des autres méthodes non seulement par le type de sel de déverglaçage utilisé, mais également par le cycle de température décrit moins précisément : les températures minimale et maximale sont renseignées, ainsi que le laps de temps durant lequel celles-ci doivent être atteintes. Ceci résulte en une plus grande dispersion des résultats comme discuté au § 4.3.

Les figures 1 et 2 illustrent les variations de température durant un cycle de gel-dégel. On peut remarquer que le Slab-Test et la NTN-018 présentent des cycles très similaires.

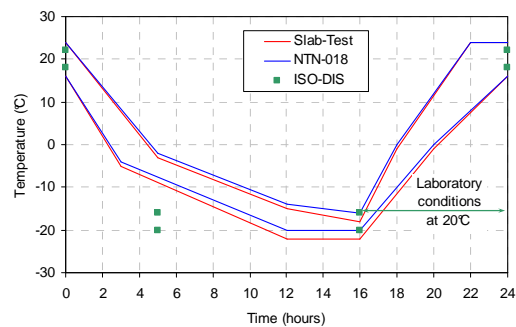


Figure 1 : Variation de température pour 1 cycle de Slab-test, de la NTN-018 et de l'ISO/DIS 4846-2

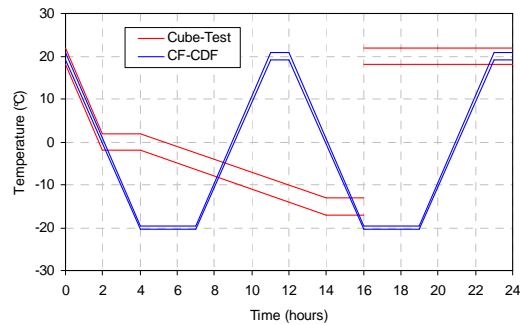


Figure 2 : Variation de température pour 1 cycle de Cube-test et de CF-CDF

Le traitement de l'éprouvette est très important. Pour le Cube-test, l'éprouvette est totalement immergée dans la solution. Dans les autres cas, seule la surface supérieure ou inférieure de l'éprouvette est en contact avec la solution, la surface latérale étant protégée, dans certains cas même isolée. Un récapitulatif est donné au tableau 2.






Méthode d'essai	Surface en contact avec l'électrolyte	Conservation de l'éprouvette avant le démarrage des essais	Exemple
Slab-test	Surface supérieure	7 jours sous eau à 20°C + 21 jours à 20°C et 65% H.R.	
NTN-018	Surface supérieure	7 jours sous eau à 20°C + 21 jours à 20°C et 65% H.R.	
Cube-test	Toutes les surfaces (éprouvette immergée totalement)	7 jours sous eau à 20°C + 21 jours à 20°C et 65% H.R.	
CDF	Surface inférieure	7 jours sous eau à 20°C + 21 jours à 20°C et 65% H.R.	
ISO-DIS	Surface supérieure	14 jours sous eau à 20°C + 14 jours à 20°C et 65% H.R.	

Tableau 2

3. Préparation du béton

Le but de la deuxième phase était de déterminer l'influence de la composition du béton sur la résistance au gel-dégel, et ce pour les 5 méthodes d'essai. Plusieurs bétons ont été fabriqués suivant des compositions types de bétons routiers et de structure. Les différentes compositions sont détaillées au tableau 3.

Type de béton	Teneur en ciment	Rapport E/C	Teneur en air	Absorption d'eau	Type de gravillons	Type de sable
	[kg/m ³]	[-]	[%]	[%]		
Béton routier (trafic faible), sans air entraîné	300	0,47	2,3	4,8	Porphyre	Sable de mer
Béton routier (trafic faible), avec air entraîné	350	0,47	7,8	5,0	Porphyre	Sable de mer
Béton d'ouvrage 0/20	300	0,61	1,8	6,0	Calcaire	Sable de rivière
Béton pour barrière de sécurité	375	0,50	4,4	6,2	Calcaire	Sable de mer
Béton d'ouvrage 0/20 (sable calcaire)	300	0,61	1,2	5,5	Calcaire	Lime stone
Béton dénudé 0/20 (surpondération en fraction 4/8)	400	0,49	4,6	6,4	Porphyre	Sable de mer
Béton dénudé 0/14 (surpondération en fraction 4/8)	400	0,49	4,8	6,5	Porphyre	Sable de mer
Béton Ultra fast track (CEM I 52,5)	450	0,43	0,9	4,9	Porphyre	Sable de mer

Tableau 3 : Composition des différents bétons soumis aux essais – Caractéristiques du béton frais et durci

L'influence de l'entraîneur d'air ainsi que du traitement de surface du béton sur la résistance au gel-dégel furent également analysées. Etant donné que les échantillons ont été fabriqués en laboratoire, on peut remarquer des différences par rapport aux résultats obtenus avec des bétons « de chantiers », spécialement en cas de béton dénudé.

4. Résultats

4.1 Comparaison des méthodes d'essai

L'objectif premier du projet de recherche était de déterminer la méthode la plus adaptée pour déterminer la résistance du béton au gel-dégel. Jusqu'à présent, deux méthodes ont fréquemment été utilisées en Belgique : la NTN-018 de Probéton et l'ISO/DIS 4846-2.

Dans un premier temps, la comparaison des résultats obtenus avec les différents essais est réalisée. A la figure 3, les pertes de masse cumulées obtenues avec les différentes méthodes d'essai sont comparées aux pertes de masse obtenues avec la NTN-018.

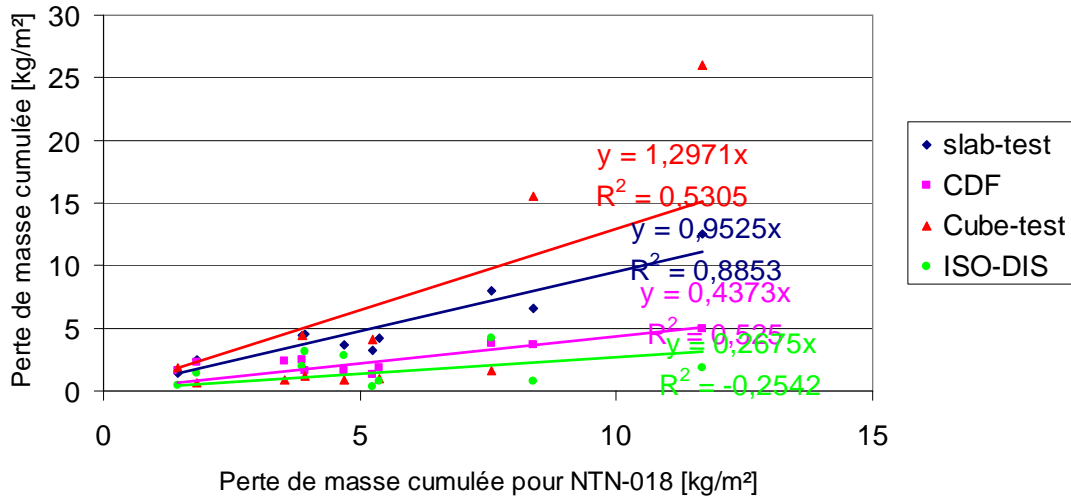


Figure 3 : Comparaison des pertes de masse cumulées [kg/m²] obtenues avec les différentes méthodes d'essai

Les résultats illustrés à la figure 3 appellent une première remarque : les pertes de masse de certains échantillons sont particulièrement élevées (pour rappel, les limites fixées par le CCT RW99 sont respectivement de 0.5, 1 et 2 kg/m² pour les réseaux I, II et III). Ceci est vraisemblablement dû au fait que la simulation en laboratoire de certains bétons de chantiers n'a pas toujours réussi. L'interprétation de ces résultats doit donc être considérée avec certaines réserves. Les droites obtenues par régression linéaire indiquent une bonne corrélation entre le Slab-test et la NTN-018. Les résultats montrent également que les différences entre les différents échantillons, de même qu'entre les différents laboratoires, sont limitées. Ceci est également le cas lorsqu'on s'intéresse aux pertes de masse par écaillage à différents stades d'avancement des essais (figure 4).

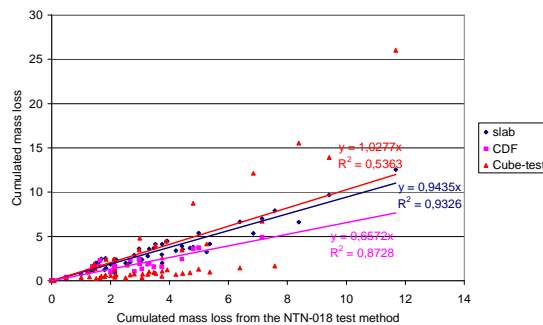


Figure 4 : Comparaison entre les résultats obtenus avec la méthode NTN-018 et les autres méthodes d'essai

Les résultats du Cube-test montrent une variation importante des résultats obtenus, en fonction des bétons soumis aux essais. Bien que la figure 4 donne l'impression qu'il y a deux séries de résultats, aucune corrélation n'a pu être trouvée entre les

résultats et les paramètres externes, tels que le laboratoire qui a réalisé les essais, la préparation des éprouvettes, ...

La corrélation entre la méthode ISO-DIS et la NTN-018 est très faible. Ceci peut être la conséquence de la différence des paramètres de conditionnement de l'éprouvette avant démarrage de l'essai, ainsi qu'au cycle de température moins strict de l'ISO/DIS 4846-2.

Comme première conclusion, on peut considérer le Slab-test comme la méthode la plus appropriée pour évaluer la résistance des bétons au gel-dégel conformément à la méthode NTN-018 déjà largement appliquée en Belgique.

Les écarts de résultats entre les différentes éprouvettes sont fonction de la méthode d'essai utilisée, comme illustré au tableau 4. A nouveau, le Slab-test donne de bons résultats.

Slab-test	NTN-018	CDF	Cube-test	ISO-DIS
7%	13%	14%	6%	15%

Tableau 4 : Coefficient de variation des différentes méthodes d'essais (écart type/moyenne)

Dans la seconde phase du projet, l'influence de plusieurs paramètres sur la résistance aux cycles gel-dégel a été étudiée.

4.2 Influence de la conservation de l'éprouvette

Dans un premier temps, l'influence de la conservation de l'éprouvette, avant démarrage de l'essai, est analysée. Pour les 5 méthodes d'essai, une conservation à 65 % H.R. et 20°C après 7 jours sous eau est pres crité. En vue de déterminer l'influence de la cure, une série d'éprouvettes ont été conservées à 95 % H.R. et 20 °C, et une troisième série d'éprouvettes à été c onservées sous eau. Cette analyse a été effectuée pour le béton à base de gravillons calcaires et pour le béton 0/20. Les résultats sont repris à la figure 5.

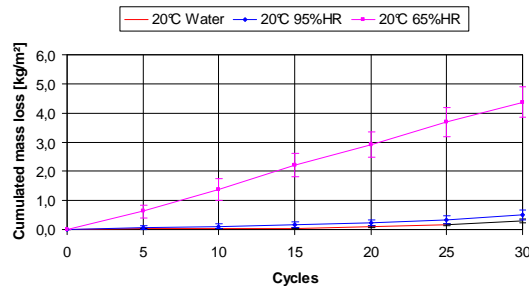


Figure 5 : Influence de la cure de l'éprouvette sur la résistance au gel-dégel (évaluée suivant la méthode ISO/DIS) d'un béton à base de gravillons calcaires

Des résultats similaires ont été obtenus pour le béton 0/20 : après 28 cycles de Slab-test, la perte de masse cumulée par écaillage s'élevait à 2,104 kg/m² pour les éprouvettes conservées à 65 % H.R. et 0,037 kg/m² pour celles conservées à 95 % H.R.. Pour les essais réalisés suivant l'ISO-DIS, la perte de masse cumulée était de 0,706 kg/m² après 25 cycles pour les éprouvettes conservées à 65 % H.R. et 0,010 kg/m² pour celles conservées en chambre humide.

La différence d'écaillage du aux cycles gel-dégel en présence de sels de déverglaçage est notamment due au fait que les pores sont plus ouverts lorsque les échantillons sont conservés à 65 % H.R.. La solution saline va dès lors pénétrer plus facilement et plus profondément le matériau, engendrant un écaillage plus important une fois le béton soumis aux cycles de gel-dégel.

Etant donné que ce mode de conservation est appliqué pour toutes les méthodes d'essai, les résultats correspondent donc à la situation la plus contraignante.

4.3 Influence de la composition du mélange

Différents composants du mélange ont été modifiés afin d'en analyser les conséquences sur les résultats : teneur en ciment, nature des gravillons, type de sable et teneur en air entraîné. Les données sont reprises au tableau 3.

La teneur en ciment a été analysée en premier lieu. La figure 6 montre clairement l'influence de celle-ci sur la résistance aux cycles gel-dégel. Au plus la teneur en ciment est élevée, meilleure est la résistance du béton au gel-dégel. Toutefois, d'autres paramètres comme une bonne distribution granulométrique, la limitation de la fraction sable et une bonne qualité de ce dernier sont également important pour l'obtention d'un béton durable.

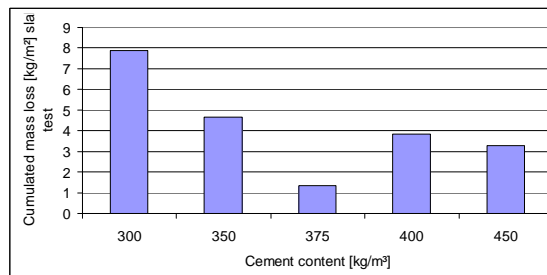


Figure 6 : Influence de la teneur en ciment sur la résistance aux cycles gel/dégel (Slab-Test)

Ceci est confirmé par les essais réalisés sur le béton de barrière de sécurité type « step », dont la composition était la suivante :

- Concassés calcaire 14/20 : 259 kg/m³ ;
- Concassés calcaire 10/14 : 321 kg/m³ ;

- Concassés calcaire 6/10 : 298 kg/m³ ;
- Concassés calcaire 4/6 : 100 kg/m³ ;
- Sable de rivière 0/4 : 509 kg/m³ ;
- Sable fin 0/0,5 : 224 kg/m³ ;
- Sable fin 0/0,0316 : 34 kg/m³ ;
- Ciment CEM III/A 42,5 N LA : 375 kg/m³ ;
- Eau : 188 kg/m³ ;
- Entraîneur d'air : 0,45 kg/m³.

Cette composition a donné lieu à une teneur en air entraîné de 4,4 %. Les pertes de masse cumulées pour ce mélange sont représentées à la figure 7.

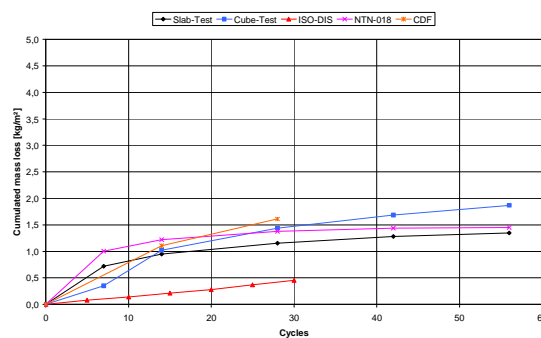


Figure 7 : Influence de la méthode d'essai (béton de barrière de sécurité)

Il est important de remarquer que les pertes par écaillage obtenues avec la méthode ISO-DIS sont systématiquement inférieures que celles obtenues avec les autres méthodes d'essai. C'est pourquoi les critères d'acceptation des bétons résistants au gel-dégel doivent être réévalués pour chaque méthode d'essai et en fonction du type de béton testé.

La figure 8 renseigne les pertes de masse cumulées pour un béton de structure, dont le mélange a été fabriqué en centrale et pour lequel les échantillons ont été carottés in-situ. Les résultats montrent une meilleure corrélation entre les différentes méthodes d'essai que pour les bétons fabriqués en laboratoire. A nouveau, les pertes de masse obtenues avec la méthode ISO-DIS sont inférieures à celles obtenues avec les 4 autres essais.

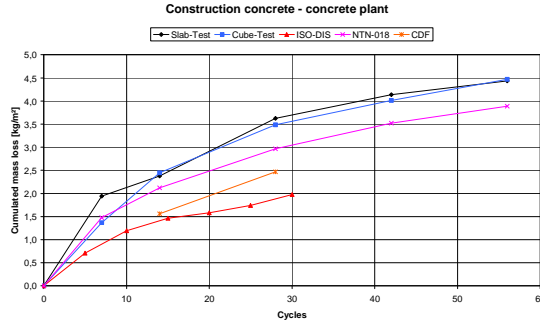


Figure 8 : Influence de la méthode d'essai sur la résistance aux cycles gel-dégel (béton d'ouvrages d'art, fabriqué en centrale).

L'influence de l'air entraîné était moins prononcée que celle de la teneur en ciment, comme illustré à la figure 9.

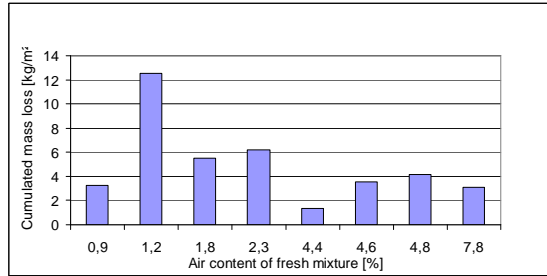


Figure 9 : Influence de la teneur en air sur la résistance aux cycles gel-dégel (Slab-Test)

La figure 10 illustre l'influence positive de l'ajout d'air entraîné au béton, mais la combinaison des différents paramètres reste importante.

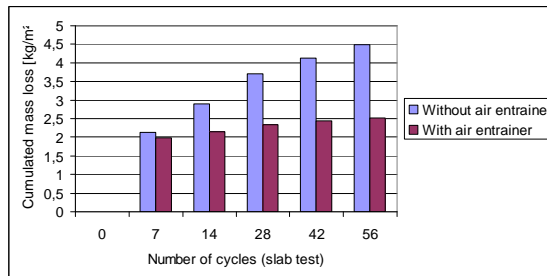


Figure 10 : Influence de l'air entraîné sur la résistance aux cycles gel-dégel (Slab-Test)

Une comparaison entre un béton routier avec et sans air entraîné montre une diminution de 50 % de pertes de masse cumulées par écaillage, grâce à une teneur en air entraîné allant de 2,3 à 7,8 %.

5. Conclusions

La résistance des bétons au gel-dégel peut être déterminée au moyen des différentes méthodes d'essai décrites dans la CEN/TS 12390-9. La méthode de référence (Slab-test) et les deux méthodes alternatives (Cube-test et CF-CDF) ont été comparées aux deux méthodes couramment utilisées en Belgique, à savoir l'ISO/DIS 4846.2 et la NTN-018 de Probeton.

Le Slab-test se révèle être la méthode d'essai la plus fiable et la plus similaire aux deux méthodes utilisées en Belgique.

Au cours de la seconde phase du projet, l'influence de plusieurs paramètres sur la résistance au gel-dégel a été analysée en vue de pouvoir définir des valeurs limites en fonction des bétons testés. A cette fin, davantage de résultats, relatifs à des bétons provenant de chantiers, sont nécessaires : la fabrication en laboratoire de tels bétons n'ayant pas toujours donné satisfaction. Cependant, les résultats indiquent chaque fois des pertes de masse supérieures à celles obtenues avec l'ISO-DIS, et les critères d'acceptation en vigueur en Belgique doivent donc être revus.

Dans un premier temps, le dosage en ciment et la teneur en air entraîné ont été analysées. Comme on le savait déjà, la résistance du béton au gel-dégel augmente avec la teneur en ciment, mais est également influencée par la courbe granulométrique et le type de sables et gravillons choisis.

L'ajout d'air entraîné dans le béton a également une influence positive sur la résistance au gel-dégel.

En fin, l'influence de la cure subie par les éprouvettes avant le début des essais a également été étudiée. La comparaison entre une conservation à 65 % H.R. et une conservation à 95 % H.R. ou sous eau met en évidence la très grande influence de la cure sur la résistance au gel-dégel. Dans le premier cas (cure à 65 % H.R.), la solution saline peut pénétrer le béton plus rapidement et plus profondément que dans le cas d'une éprouvette saturée.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Service Public Fédéral Economie pour la contribution au financement du projet.

Références

- [1] CEN/TS 12390-9 (2006) Testing hardened concrete - Part 9 : Freeze-thaw resistance – Scaling, European Committee for Standardization, Bruxelles.
- [2] ISO-DIS 4846-2 Projet de norme (1984) Béton - Détermination de la résistance à l'écaillage des surfaces soumises à des agents chimiques dégivrants, Organisation internationale de normalisation.
- [3] NBN B 15-001 (2004) Supplément à la NBN EN 206-1, Béton - Spécification, performances, production et conformité, Institut Belge de normalisation, Bruxelles
- [4] NBN EN 206-1 (2001) Béton - Partie 1, Spécification, performances, production et conformité, Institut Belge de normalisation, Bruxelles
- [5] NTN-018 Note technique Probéton (1999) Essais sur béton – résistance aux sels de déverglaçage, Edition no1, Organisme de gestion pour le contrôle des produits en béton, Bruxelles.
- [6] Pierre Christian, Germain Olivier, "Etude et comparaison des methods d'essais de résistance des bétons aux cycles de gel-dégel » (in French), Huitième édition des journées scientifiques du regroupement Francophone pour la recherche et la formation sur le béton, Montréal Canada, 5-6 July, 2007