



Évaluation de l'aptitude à l'emploi des ciments ternaires incluant des matériaux alternatifs

Compositions de béton soumises aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglçage

Introduction

Dans le cadre du projet prénormatif NEOCEM, les centres de recherche collectifs belges pour l'industrie cimentière (CRIC-OCCN) et pour le secteur de la construction (routière) (CRR et Buildwise) évaluent depuis 2020 l'aptitude à l'emploi de nouveaux ciments ternaires, alternatifs.

En effet, la norme européenne NBN EN 197-5 (Bureau de Normalisation [NBN], 2021) a récemment inclus de nouveaux types de ciment ternaire (CEM II/C-M et CEM VI) contenant jusqu'à 20 % en masse de filler calcaire ou dolomitique. Les argiles calcinées ont également été étudiées en tant que nouveaux matériaux minéraux secondaires MMS dans les ciments CEM II/B, CEM II/C-M et CEM V.

Conformément aux règles belges de normalisation, l'aptitude spécifique à l'emploi de ces nouveaux ciments doit être démontrée conformément aux prescriptions de la norme belge NBN B15-100 (NBN, 2018a). Ceci est l'objectif principal du projet de recherche prénormatif NEOCEM, dans le cadre duquel un programme d'essai ambitieux a été réalisé sur différentes compositions de béton conformément à diverses classes d'environnement.

Bien que la composition des bétons routiers en Belgique ne corresponde pas tout à fait aux spécifications des normes pour le béton, (NBN EN 206 [NBN, 2013+2021] et annexe nationale NBN B15-001 [NBN, 2022]), il est intéressant de se pencher sur les résultats obtenus sur les compositions de la classe d'environnement EE4, avec et sans entraîneur d'air. La classe EE4 inclut la résistance du béton aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage, c'est-à-dire la résistance à l'écaillage.

Même si les essais n'ont pas porté sur des compositions de béton spécifiques, les résultats du projet de recherche NEOCEM pourraient servir de point de départ à d'autres études sur l'utilisation potentielle de ciments ternaires et d'autres matériaux minéraux secondaires dans le béton routier.

Enjeux de la recherche

Il est possible de réduire considérablement l'empreinte carbone de la production de ciment en remplaçant une partie du clinker par des MMS tels que des cendres volantes, du laitier de haut fourneau ou de l'argile calcinée.

Ces matériaux contribuent à des pratiques de construction plus respectueuses de l'environnement et à l'atténuation de l'impact environnemental de l'industrie de la construction.

Dans ce contexte, le ciment au laitier de haut fourneau CEM III/A 42,5 LA a été pendant de nombreuses années la référence dans le secteur belge de la construction routière pour la plupart des revêtements en béton.

À l'avenir, cependant, le secteur de la construction risque d'être confronté à l'indisponibilité temporaire de certains types de ciment, dont le ciment de type CEM III/A, et de devoir recourir à d'autres types de ciment contenant des MMS alternatifs. Il devient donc nécessaire d'améliorer notre compréhension du comportement des liants alternatifs dans les compositions de béton.

Description générale du projet NEOCEM

Dans le cadre du projet NEOCEM, 25 types de ciment différents ont été initialement produits en laboratoire en utilisant une combinaison de clinker, deux laitiers, trois argiles calcinées, quatre fillers calcaires et un régulateur de prise.

Des essais ont été menés sur des compositions de mortier, puis 16 types de ciment ont été sélectionnés pour être testés dans six compositions de béton différentes, correspondant aux classes d'environnement les plus représentatives en Belgique.

Le projet de recherche visait principalement à évaluer l'aptitude générale et spécifique à l'emploi des nouveaux types de ciment dans des compositions de béton appartenant à des classes d'environnement spécifiques. Les essais requis dans la norme de référence pour l'évaluation de l'aptitude à l'emploi des ciments alternatifs (NBN, 2018a) ont été réalisés.

Afin de limiter le nombre d'essais, la teneur en clinker de chaque type de ciment correspondait généralement à la valeur la plus faible possible selon la norme (scénario «worst-case»).

Dans le présent document, nous analyserons les résultats obtenus pour les compositions de béton les plus proches des compositions de béton routier utilisées traditionnellement en Belgique, à savoir les compositions de la classe EE4 avec un rapport eau/ciment de 0,45, et une teneur minimale en ciment de 340 kg/m³, avec et sans entraîneur d'air.

Constituants du ciment

Les constituants utilisés dans les compositions de béton EE4 (combinaison des classes d'environnement XC4, XD3 et XF4) sont énumérés au tableau 1.

Constituant	Code	Commentaire
Clinker	K	CEM I 52,5 N ciment
Laitier de haut fourneau	S	
Argile calcinée	Q1	Origine locale
	Q2	Origine locale
	Q3	Hors Belgique
Filler de carbonate de calcium	L	Carbone organique total (TOC) ≤ 0,5%
	LL	TOC ≤ 0,2% - CaCO ₃ ≥ 99%
	L''	TOC ≥ 0,5% - CaCO ₃ ≥ 75%
	Ld	(MgCO ₃ +CaCO ₃) ≥ 75% - Calcaire dolomitique

Tableau 1 – Constituants des types de ciment utilisés dans les compositions EE4.

Ciments sélectionnés

Cinq types de ciment différents, appartenant à la famille des nouveaux ciments ternaires telle que définie dans la norme NBN EN 197-5 (NBN, 2021), ont été produits: CEM II/B-M (Q-L), CEM II/C-M (S-L), CEM II/C-M (Q-L), CEM VI (S-L), et une autre variante, CEM V/A (Q-S), produite à partir de laitier et d'argile calcinée.

Différentes combinaisons de MMS ont été choisies pour la fabrication de 14 ciments et de 2 ciments de référence, et ce pour la validation des compositions de béton EE4 (tableau 2).

Comme indiqué précédemment, la teneur en clinker de chaque type de ciment correspondait à des valeurs faibles compte tenu des exigences de la norme pour ce type de ciment. Par conséquent, les résultats obtenus avec différents types de ciment ne sont pas comparables directement.

Les ciments CEM II/B-M (1 et 2) ont la teneur en clinker la plus élevée avec une teneur en CEM I de 65 %.

Les ciments CEM VI (11 à 14) ont la teneur en clinker la plus faible avec une teneur en CEM I de 35 %.

Les autres compositions de ciment présentent des teneurs en CEM I de 45 ou 50 %.

N°	Ciment	CEM I 52,5 N	Argile calcinée Q1	Argile calcinée Q2	Argile calcinée Q3	Laitier S	Filler calcaire L	Filler calcaire L''	Filler calcaire Ld	Filler calcaire LL	Gypse
1	CEM II/B-M (Q1-L) ; Q125/L10	65	25				10				(1)
2	CEM II/B-M (Q3-L) ; Q3 25/L10	65			25		10				(1)
3	CEM II/C-M (S-LL) ; S30/L20	50				30				20	(1)
4	CEM II/C-M (S-L) ; S30/L20	50				30	20				(1)
5	CEM II/C-M (S-L'') ; S30/L20	50				30		20			(1)
6	CEM II/C-M (S-Ld) ; S30/L20	50				30			20		(1)
7	CEM V/A (S-Q1) ; S30/Q1 25	45	25			30					(1)
8	CEM V/A (S-Q2) ; S30/Q2 25	45		25		30					(1)
9	CEM II/C-M (Q1-L) ; Q1 40/L10	50	40				10				(1)
10	CEM II/C-M (Q3-L) ; Q3 40/L10	50			40		10				(1)
11	CEM VI (S-LL) ; S45/L20	35				45				20	(1)
12	CEM VI (S-L) ; S45/L20	35				45	20				(1)
13	CEM VI (S-L'') ; S45/L20	35				45		20			(1)
14	CEM VI (S-Ld) ; S45/L20	35				45			20		(1)
15	CEM I 52,5 N	100									(1)
16	CEM III/A avec (15) ; K45/S55	45				55					(1)

(1) Quantité nécessaire pour que la teneur totale en sulfate du ciment soit égale à 3,5 %

Tableau 2 – Ciments fabriqués et leur composition en %

Compositions de béton

Toutes les compositions de béton (exemple au tableau 3) ont été conçues conformément aux exigences de la norme pour le béton NBN EN 206 (NBN, 2013+2021) et de l'annexe nationale belge NBN B15-001 (NBN, 2022).

La valeur d'affaissement visée était de 150 mm et en cas d'utilisation d'un entraîneur d'air (EA), la teneur en air cible était de (6±2) %.

En ce qui concerne la consistance des mélanges de béton, il a rapidement été établi que la valeur cible d'affaissement était difficile à atteindre avec les compositions contenant des argiles calcinées. Il a donc fallu utiliser une autre version du superplastifiant (SP) (Sika Viscocrete 1560 au lieu de Sika Viscocrete 1020x).

Ces compositions de béton du projet NEOCEM sont les plus proches des compositions de béton routier belges, conçues pour résister aux charges de trafic lourdes, aux conditions climatiques belges et aux variations de température.

Il existe cependant des différences significatives entre les compositions conformes à la norme et les compositions de béton routier telles que spécifiées dans les cahiers des charges types régionaux pour la construction routière. Tout d'abord, la teneur en ciment des compositions de béton routier est plus élevée, jusqu'à 400 kg/m³. Ensuite, le squelette inerte visé est différent.

Composant	Pas d'EA (kg/m ³)	Avec EA (kg/m ³)
Ciment	340	340
Calcaire 4/6,3	169	159
Calcaire 6,3/14	416	391
Calcaire 14/20	446	419
Sable 0/2	195	184
Sable 0/4 (rond)	654	617
Eau	153	153
Eau absorbée	9	8
Superplastifiant Sika Viscocrete (1020x ou 1560)	2,0 à 4,0	1,6 à 3,0
EA Sika LPSA-94	-	0,07 à 0,26

Tableau 3 – Exemple de compositions de béton EE4 testées, avec et sans entraîneur d'air (EA)

En outre, la valeur d'affaissement dans le béton routier doit être maintenue à un niveau suffisamment bas pour permettre la pose à l'aide d'une machine à coffrages glissants. Les bétons routiers sont généralement adjuvantés avec un plastifiant et un entraîneur d'air. La teneur en air est généralement de l'ordre de 3 à 4 %, afin de maintenir des niveaux de résistance mécanique plus élevés tout en garantissant la résistance à l'écaillage du béton.

Exigences du cahier des charges type flamand SB 250

Le cahier des charges type flamand SB 250 (Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer [AWV], 2021) donne des spécifications détaillées pour la réalisation d'une étude préliminaire sur béton routier.

Les exigences de l'étude préliminaire en termes de résistance à la compression, d'absorption d'eau par immersion et de résistance à l'écaillage (Slab test) sont présentées au tableau 4.

Essai	Unité	Échantillon	Catégorie de trafic					
			B1 à B5 (lourd)		B6 à B10 (modéré/faible)		BF (pistes cyclables)	
			A<3,0	A≥3,0	A<3,0	A≥3,0	A<3,0	A≥3,0
Rc 7 jours	MPa	Cubes (15x15x15) cm ³	35	30	30	25	25	20
Rc 28 jours	MPa		55	50	45	40	40	35
WAI	%	Cubes (10x10x10) cm ³	6,0	TBR	6,0	TBR	6,0	TBR
Ecaillage à 28 jours	kg/m ²	Carottes extraites de la surface moulée de cubes	1,5		3,0		3,0	

A = Teneur en air de la composition du béton en %
TBR = To Be Reported
Rc = Résistance à la compression
WAI= Absorption d'eau par immersion

Tableau 4 – Exigences de l'étude préliminaire selon le cahier des charges type flamand SB 250 (Vlaamse Overheid, AWW, 2021)

Résultats des essais

Béton frais

Les résultats sur béton frais sont présentés au tableau 5. Il convient de noter que de nombreuses compositions de béton sans entraîneur d'air présentent des teneurs en air relativement élevées, neuf compositions ayant une teneur en air de 3 % ou plus.

En particulier, les compositions contenant des ciments contenant de l'argile calcinée (n° 1, 2, 9, 10) ont affiché les teneurs en air les plus élevées (> 3,5 %).

Le dosage des adjuvants a varié de manière significative entre les différents ciments, même au sein d'un même type mais avec des MMS différents. En raison de la grande diversité des compositions avec divers constituants et de la large gamme de valeurs d'affaissement, il est difficile de déterminer l'influence spécifique des composants sur le dosage de l'adjuvant.

La variation du dosage de l'adjuvant lors de l'utilisation de différents MMS constitue un défi important dans l'utilisation de ciments alternatifs.

N°	Ciment	Pas d'EA			Avec EA			
		SP (%)	Affaissement (mm)	Teneur en air (%)	SP (%)	EA (%)	Affaissement (mm)	Teneur en air (%)
1	CEM II/B-M (Q1-L) ; Q125/L10	1,03	190	3,6	0,74	0,02	150	5,1
2	CEM II/B-M (Q3-L) ; Q3 25/L10	1,03	150	4,8	0,88	0,02	160	7,0
3	CEM II/C-M (S-LL) ; S30/L20	0,59	150	3,0	0,53	0,03	120	6,0
4	CEM II/C-M (S-L) ; S30/L20	1,09	160	3,0	0,74	0,09	160	7,5
5	CEM II/C-M (S-L') ; S30/L20	1,00	110	3,0	0,74	0,10	190	4,2
6	CEM II/C-M (S-Ld) ; S30/L20	0,88	160	2,7	0,79	0,02	190	5,2
7	CEM V/A (S-Q1) ; S30/Q1 25	0,74	180	2,3	0,59	0,04	220	4,1
8	CEM V/A (S-Q2) ; S30/Q2 25	1,03	150	3,2	0,76	0,03	150	5,6
9	CEM II/C-M (Q1-L) ; Q1 40/L10	0,88	120	3,6	0,59	0,03	150	4,8
10	CEM II/C-M (Q3-L) ; Q3 40/L10	1,18	150	3,8	0,94	0,02	150	6,0
11	CEM VI (S-LL) ; S45/L20	0,79	200	1,3	0,47	0,02	160	4,2
12	CEM VI (S-L) ; S45/L20	0,79	150	1,7	0,74	0,08	190	4,0
13	CEM VI (S-L') ; S45/L20	0,88	140	3,0	0,59	0,07	200	4,6
14	CEM VI (S-Ld) ; S45/L20	0,88	180	2,2	0,47	0,05	130	8,0
15	CEM I 52,5 N	1,18	180	2,6	0,79	0,02	150	5,4
16	CEM III/A ; K45/S55	0,88	180	2,5	0,59	0,03	170	5,5

Tableau 5 - Consistance et teneur en air des compositions de béton

Résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée sur des cubes (15x15x15) cm³ conformément à la norme NBN EN 12390-3 (NBN, 2016).

Les résultats à 7 et 28 jours sont présentés à la figure 1 (sans EA) et à la figure 2 (avec EA).

Si l'on examine le SB 250 (Vlaamse Overheid, AWW, 2021) pour les exigences de l'étude préliminaire, on constate que de nombreux résultats correspondent à l'une des trois catégories de trafic. Seule une composition contenant un ciment CEM VI (ciment 14, avec EA) n'a pas atteint la valeur minimale la plus faible. Comme mentionné précédemment, la teneur en clinker de ce ciment, comme pour toutes les compositions de ciment CEM VI (n° 11 à 14), est la plus faible de toutes les compositions testées.

Comme mentionné précédemment, les compositions testées ont une teneur en ciment de 340 kg/m^3 , alors que les bétons routiers en Belgique ont généralement des teneurs en ciment allant de 350 à 400 kg/m^3 en fonction de la catégorie de trafic.

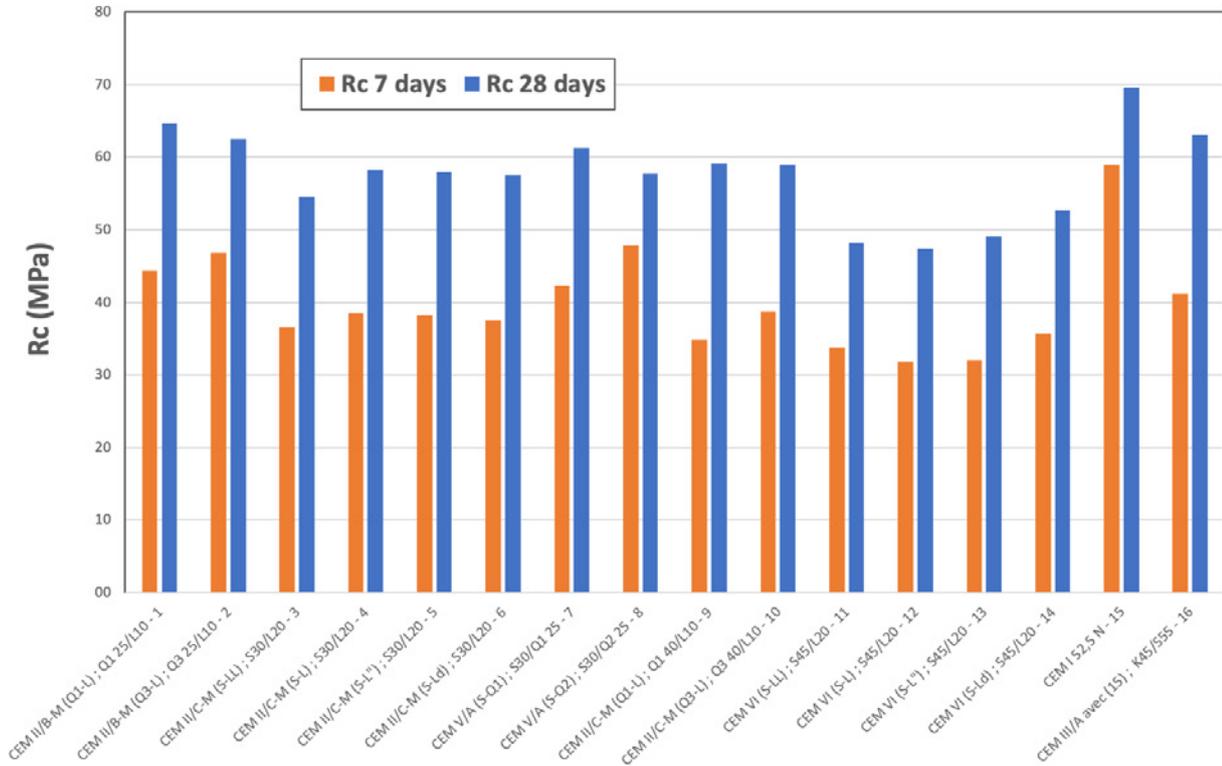


Figure 1 – Résistance à la compression des compositions EE4 sans entraîneur d'air

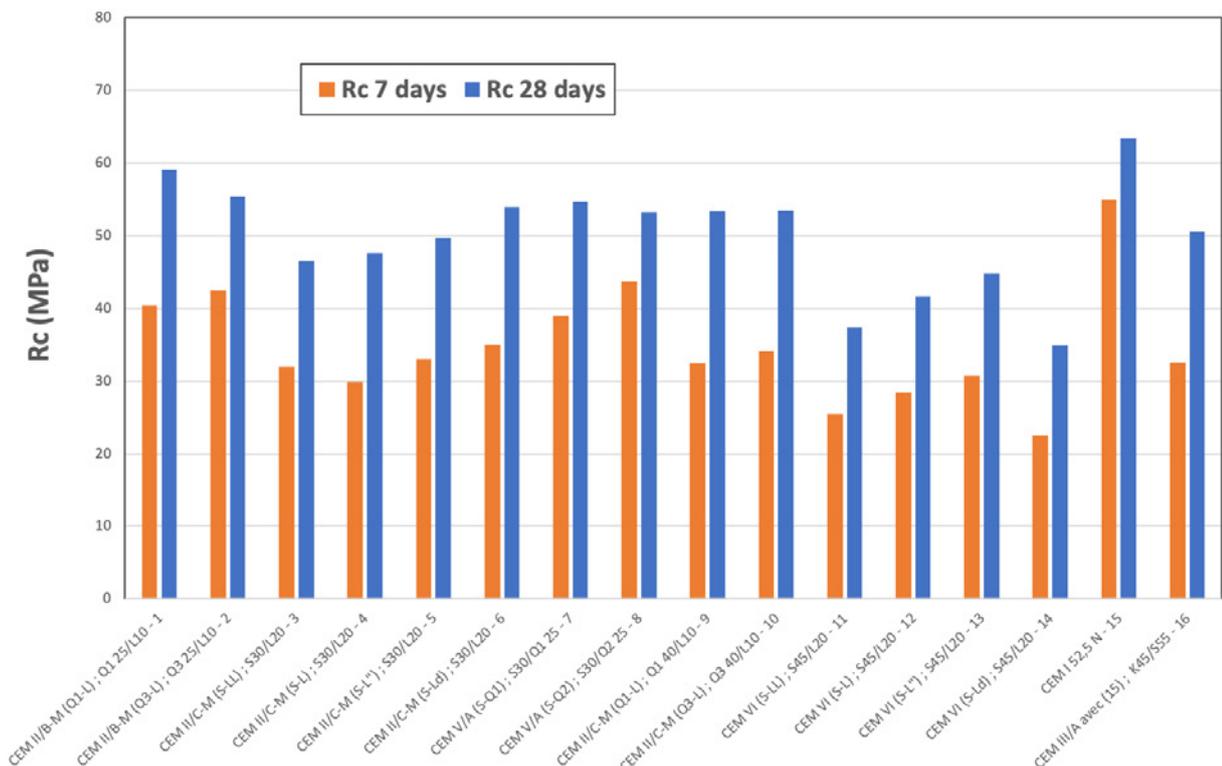


Figure 2 – Résistance à la compression des compositions EE4 avec entraîneur d'air

Absorption d'eau

Les essais d'absorption d'eau (par immersion) ont été réalisés sur des cubes (10x10x10) cm³ conformément à la norme belge NBN B15-215 (NBN, 2018b).

Les résultats sont présentés à la figure 3 (pour les compositions sans EA).

Tous les résultats sont inférieurs à la valeur limite maximale de 6 % exigée dans le cahier des charges type flamand pour l'étude préliminaire.

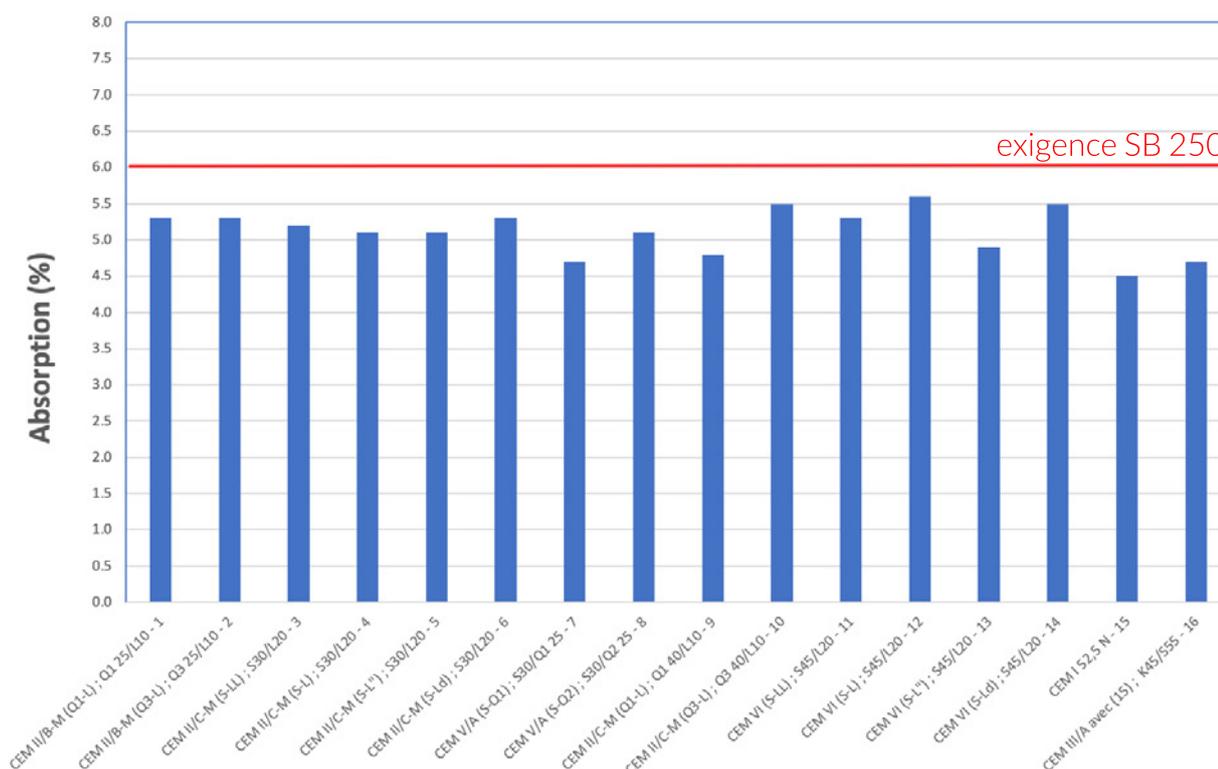


Figure 3 – Résultats de l'absorption d'eau (par immersion) des compositions EE4 sans entraîneur d'air

Résultats du SLAB test

La résistance du béton à l'écaillage est évaluée à l'aide d'une méthode dérivée de la spécification de référence CEN/TS 12390-9 (NBN, 2016), communément appelée *Slab test*.

La méthode d'essai consiste à soumettre des échantillons de béton à des cycles répétés de gel-dégel (24 heures chacun), leur surface supérieure étant recouverte d'une solution de sels de déverglaçage. La résistance du béton aux sels de déverglaçage est évaluée en déterminant la quantité de matériau écaillé après un nombre déterminé de cycles (p. ex après 28 ou 56 cycles de gel-dégel).

Les résultats des *Slab tests* combinés à la teneur en air mesurée sur le béton frais sont présentés à la figure 4 et à la figure 5.

Pour les compositions ne contenant pas d'entraîneur d'air, on observe que des teneurs en air élevées n'entraînent pas nécessairement des valeurs d'écaillage plus faibles. Il est possible que le réseau de vides d'air créé sans l'utilisation d'un entraîneur d'air ne contribue pas à une résistance efficace aux sels de déverglaçage.

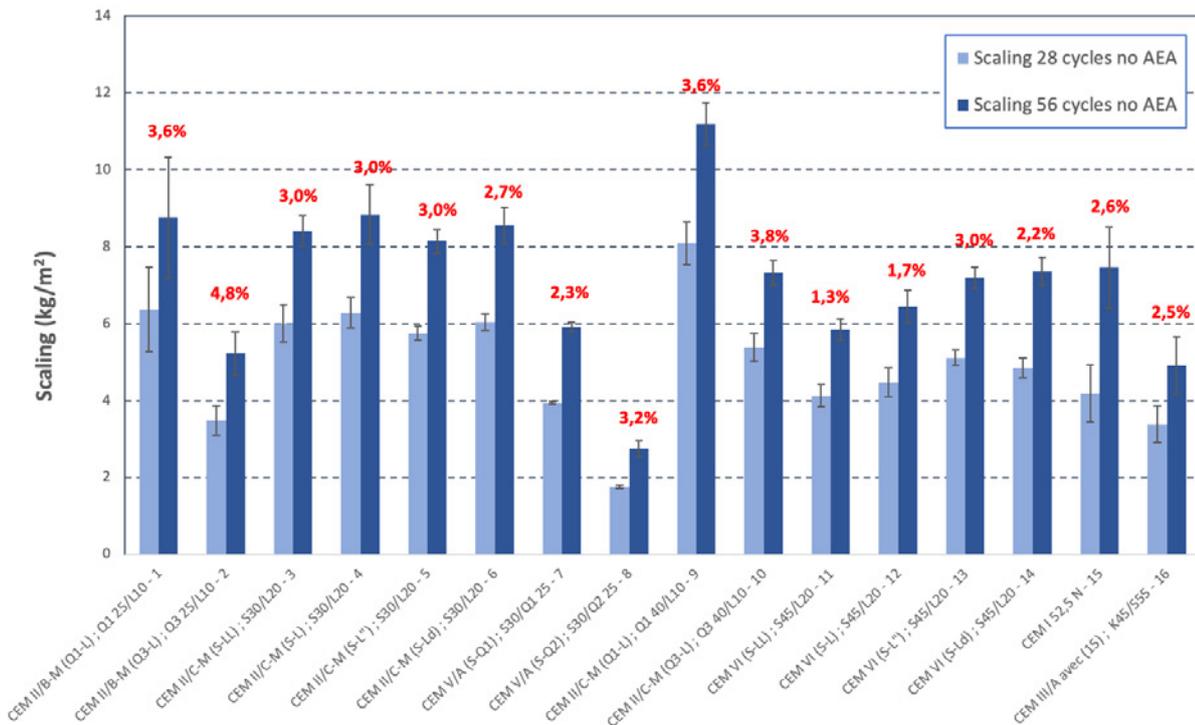


Figure 4 – Résultats du Slab test des compositions EE4 sans entraîneur d'air; la teneur en air du béton frais est mentionnée en rouge au-dessus des barres

Comme prévu, les compositions avec entraîneur d'air présentent une meilleure résistance à l'écaillage (figure 5). Cependant, cette résistance est modérée et le critère correspondant aux charges de trafic élevées (catégorie de trafic B1-B5: 1,5 kg/m²) n'est atteint pour aucune composition, même celles portant la référence CEM III/A. Seules six compositions (avec les ciments n° 2, 7, 8, 11, 14 et 16) ont satisfait au critère pour les charges de trafic modérées et faibles et les pistes cyclables (B6-B10, BF: 3,0 kg/m²).

Une autre observation remarquable est que l'utilisation d'un entraîneur d'air n'engendre pas nécessairement une amélioration de la résistance à l'écaillage. C'est le cas des compositions contenant des ciments n° 1, 8, 13 et 15.

Bien que les résultats des essais soient susceptibles de s'améliorer avec une teneur en ciment plus élevée dans les compositions de béton, l'efficacité de la répartition de bulles d'air microscopiques contre l'écaillage n'est pas démontrée de manière évidente dans ces cas précis.

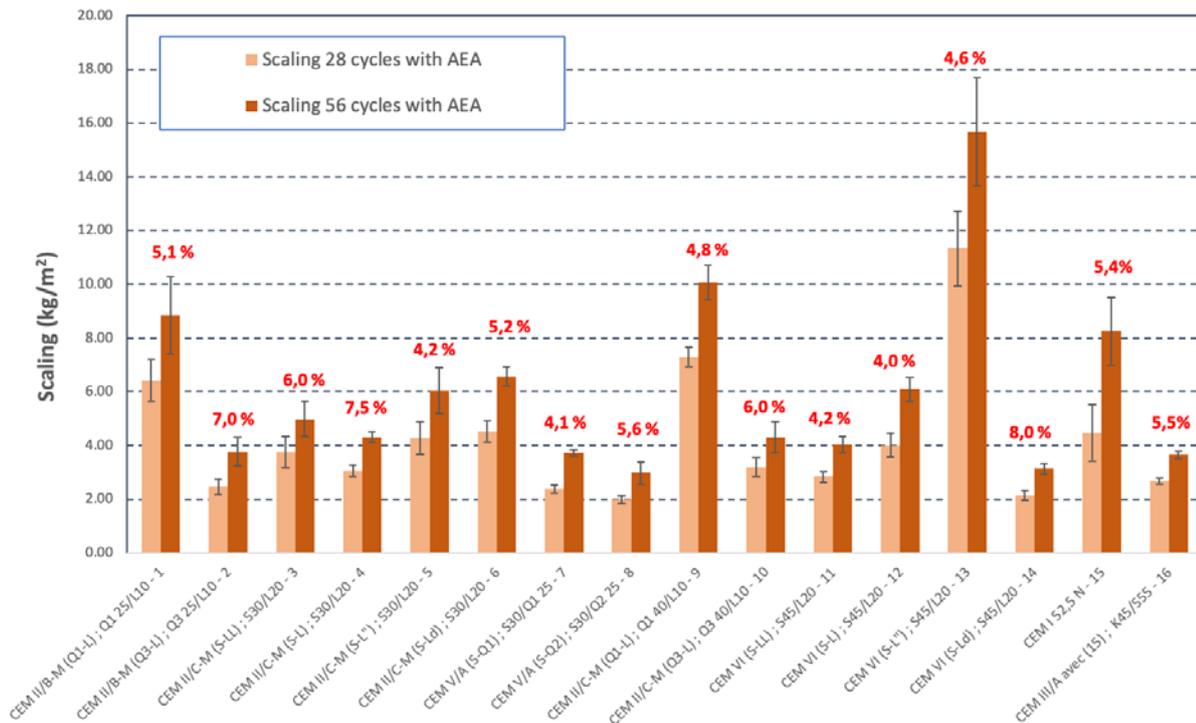


Figure 5 – Résultats du Slab test des compositions EE4 avec entraîneur d'air; la teneur en air du béton frais est mentionnée en rouge au-dessus des barres

Résultats de durabilité pour d'autres compositions de béton

En raison du nombre total important de compositions de béton à tester dans le projet NEO-CEM, seules les compositions de béton T(0,50) et T(0,60), correspondant à un rapport eau/ciment de, respectivement, 0,5 et 0,6 ont été examinées pour la résistance à la carbonatation, la résistance au gel, la migration des chlorures, le retrait et la résistance à la réaction alcali-silice.

Au moment de la rédaction de ce document, certains essais sont encore en cours ou en phase d'interprétation, mais les premiers résultats sont encourageants.

Discussion des résultats par type de ciment

CEM II B/M avec argile calcinée et filler calcaire

Ces ciments (n° 1 et 2) contiennent 65 % de CEM I 52,5, 25 % d'argiles calcinées provenant de différentes sources et 10 % de filler calcaire L. Ils ont la teneur en clinker la plus élevée de tous les ciments testés.

Du point de vue du développement durable, ces ciments ne sont pas les plus intéressants si l'on considère les émissions de CO₂ issues du processus de fabrication du clinker.

La résistance à la compression des compositions de béton avec ces ciments répond aux exigences des charges de trafic élevées (catégorie B1 à B5).

La teneur en air de la composition du béton sans entraîneur d'air est assez élevée (3,6 et 4,8 %). Malgré ces teneurs en air élevées, la valeur d'écaillage n'est pas inférieure à la valeur de la composition du béton avec le ciment CEM III/A.

CEM II C/M avec laitier et filler calcaire

Ces ciments (n° 3 à 6) contiennent 50 % de CEM I 52,5, 30 % de laitier et 20 % de fillers calcaires présentant des caractéristiques différentes.

Sans l'utilisation d'un entraîneur d'air, la résistance à la compression des compositions de béton avec ces ciments répond aux exigences des charges de trafic élevées (catégorie B1 à B5). Les compositions avec entraîneur d'air satisfont aux exigences relatives aux charges de trafic modérées ou faibles (B6-B10), à l'exception d'une composition (ciment n° 6), qui répond toujours aux exigences des charges de trafic élevées.

Les compositions de béton fabriquées avec ces ciments présentent des valeurs d'écaillage élevées par rapport à la composition avec le CEM III/A, avec ou sans entraîneur d'air.

CEM II C/M avec argile calcinée et filler calcaire

Ces ciments (n° 9 et 10) contiennent 50 % de CEM I 52,5, 40 % d'argile calcinée provenant de différentes sources et 10 % de filler calcaire L.

La résistance à la compression des compositions de béton avec ces ciments répond aux exigences des charges de trafic élevées (catégorie B1 à B5).

Les compositions de béton fabriquées avec ces ciments présentent des valeurs d'écaillage élevées par rapport à la composition avec le CEM III/A, avec ou sans entraîneur d'air.

CEM V/A avec laitier et argiles calcinées

Ces ciments (n° 7 et 8) contiennent 45 % de CEM I 52,5, 30 % de laitier et 25 % d'argile calcinée d'origines différentes.

La résistance à la compression des compositions de béton avec ces ciments répond aux exigences des charges de trafic élevées (catégorie B1 à B5).

Les compositions de béton fabriquées avec ces ciments présentent des valeurs d'écaillage comparables à la composition avec le CEM III/A, avec ou sans entraîneur d'air.

Compte tenu de la teneur modérée en clinker de ces ciments (45% CEM I 52,5), ils présentent un bon potentiel pour remplacer le CEM III/A si de l'argile calcinée est présente sur le marché local.

D'autres essais devraient être effectués pour le confirmer.

CEM VI avec laitier et fillers calcaires

Ces ciments (n° 11 à 14) contiennent 35 % de CEM I 52,5, 45 % de laitier et 20 % de fillers calcaires présentant des caractéristiques différentes. Ils présentent la plus faible teneur en clinker de tous les ciments testés.

La résistance à la compression des compositions de béton avec ces ciments ne répond pas aux exigences des charges de trafic élevées (catégorie B1 à B5). La plupart d'entre elles satisfait aux exigences relatives aux charges de trafic modérées ou faibles (B6-B10), à l'exception des compositions avec les ciments n°11 (qui répond à la catégorie de trafic BF, pistes cyclables) et 14 (critères jamais satisfaits).

Les compositions de béton fabriquées avec ces ciments présentent des valeurs d'écaillage plus élevées que celles de la composition avec le CEM III/A, mais comparables ou inférieures aux compositions avec le CEM II/C-M ayant des teneurs en clinker plus élevées. Cependant, la composition contenant le ciment n° 13 et un entraîneur d'air, présente des valeurs d'écaillage anormalement élevées. Malheureusement, ce dernier résultat n'a pas pu être vérifié car ce ciment avait été entièrement utilisé pour d'autres essais.

Il serait intéressant de réaliser une étude sur un ciment CEM VI contenant plus de clinker pour évaluer son utilisation potentielle dans les compositions de béton routier.

Conclusion

En tenant compte des spécifications du cahier des charges type flamand SB 250 pour l'étude préliminaire des compositions de béton routier, il semble possible d'utiliser d'autres types de ciment que le ciment de haut-fourneau CEM III/A généralement utilisé en Belgique.

Des essais supplémentaires sur des compositions réelles de béton routier incorporant ces types de ciment alternatifs ou des ciments avec des matériaux minéraux secondaires (MMS) doivent être réalisés pour valider leur aptitude à des charges de trafic et climatiques variables.

L'utilisation de ciments alternatifs contenant de l'argile calcinée a nécessité l'utilisation d'un superplastifiant spécifique, dont l'effet sur la teneur en bulles d'air a été mesuré, mais n'a pas été entièrement compris. Il n'est pas certain que les vides d'air induits par cet adjuvant (et éventuellement par la présence d'argile calcinée) puissent jouer un rôle dans la protection du béton contre l'écaillage par des sels de déverglaçage.

Une meilleure connaissance des caractéristiques du réseau de bulles d'air, telles que le facteur d'espacement ou la surface spécifique des bulles d'air, permettrait une meilleure compréhension de l'influence d'adjuvants spécifiques sur le développement du réseau de bulles d'air.

L'utilisation d'autres types de ciment dans le béton routier induirait la nécessité d'un meilleur contrôle du dosage des adjuvants et une meilleure connaissance de l'interaction entre les plastifiants et les entraîneurs d'air en combinaison avec ces ciments alternatifs.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le SPF Economie (Service public fédéral) et l'Institut Belge de Normalisation (NBN) pour le soutien (financier) apporté au projet.



Bibliographie

Bureau de Normalisation (NBN). (2016). *Essais sur béton durci. Partie 9: Résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage (écaillage)* (CEN/TS 12390-9). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=212805&p40_language_code=fr&p40_detail_id=79363&session=11970424815855

Bureau de Normalisation (NBN). (2018a). *Béton: Méthodologie pour l'évaluation et l'attestation de l'aptitude à l'emploi de ciments et d'additions destinés au béton* (NBN B 15-100). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=350216&p40_language_code=fr&p40_detail_id=113220&session=11970424815855

Bureau de Normalisation (NBN). (2018b). *Essais sur béton durci: Absorption d'eau par immersion* (NBN B 15-215). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=350206&p40_language_code=fr&p40_detail_id=113243&session=11970424815855

Bureau de Normalisation (NBN). (2013+2021). *Béton: Spécification, performances, production et conformité* (NBN EN 206+A2). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=204035&p40_language_code=fr&p40_detail_id=120795&session=11970424815855

Bureau de Normalisation (NBN). (2021). *Ciment. Partie 5: Ciment Portland composé CEM II/C-M et ciment composé CEM VI* (NBN EN 197-5). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=204821&p40_language_code=fr&p40_detail_id=96060&session=11970424815855

Bureau de Normalisation (NBN). (2022). *Béton: Spécification, performances, production et conformité: Complément national à la NBN EN 206:2013+A2:2021* (NBN B 15-001). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=354020&p40_language_code=fr&p40_detail_id=117608&session=11970424815855

Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer (AWV). (2021). *Standaardbestek 250 voor de wegenbouw* (Version 4.1a). <https://wegenenverkeer.be/zakelijk/documenten/standaardbestek>