



Utilisation de liants alternatifs et de granulats recyclés dans les chaussées épaisses en béton monocouche : résultats du projet MONOCRETE

Van der Wielen Audrey, CRR¹, Smets Sylvie, CRR², Van Hoyer Thomas, ELOY³, Hubert Julien, ULiège⁴, Courard Luc, ULiège⁵, NGanjie Josiane, CRIC⁶, Schaerlaekens Steven, Holcim⁷

Introduction

Les chaussées épaisses en béton monocouche (≥ 30 cm) sont de plus en plus populaires en Europe, car elles permettent de faire face à l'augmentation du trafic sur les autoroutes, les voies de circulation des aéroports ou les plates-formes logistiques industrielles. Elles nécessitent moins d'entretien que d'autres matériaux de revêtement, ont une très longue durée de vie, même sous de lourdes charges, et peuvent supporter des charges statiques sans déformation permanente. Cependant, les revêtements en béton épais peuvent être plus complexes à mettre en place et à vibrer, car le risque de ségrégation et de ressuage est plus élevé. De plus, l'impact environnemental de ces chaussées est important, en raison des grandes quantités de ciment et de matériaux inertes nécessaires pour chaque projet. Le projet de recherche MONOCRETE (mars 2021-mars 2024), financé par le pôle d'innovation wallon GreenWin, a réuni des partenaires industriels (Eloy et Holcim) ainsi que des institutions de recherche (CRR, CRIC-OCCN et ULiège) dans le but de relever ces défis. Cet article présente les résultats du projet concernant la réduction de l'impact environnemental par l'incorporation de granulats de béton recyclés et un ciment alternatif présentant une empreinte carbone plus faible. Ces questions ont été étudiées par le biais d'essais en laboratoire et par l'exécution de sections d'essai.

Description des mélanges de béton recyclé

L'objectif du projet étant de développer des solutions pour les chaussées à trafic élevé, le béton du projet a été formulé en visant les exigences pour un béton autoroutier dans le CCT QualiRoutes (Service Public de Wallonie [SPW], Infrastructures, 2021, chapitre 5). Les exigences relatives à la composition et aux performances du béton sont énumérées dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 - Propriétés du béton pour les autoroutes en Wallonie (Dmax= 20mm)

Paramètres	Valeur
Teneur en ciment	≥ 400 kg/m ³
E/C	<0,45
Ciment	CEM III/A 42,5 N LA
WAI (absorption d'eau par immersion)	$\leq 6,3\%$ (valeur moyenne)
Rc moyen à 90 jours sur les carottes (h = 10 cm, s = 100 cm ²)	≥ 50 MPa (si l'air entraîné est incorporé)
Teneur en air v	$3\% \leq v \leq 6\%$
Résistance au gel et au dégel en présence de sels de déverglaçage	Pertes <5 g/dm ² avec la méthode ISO/DIS 4846-2 ("CME 53-16") (ISO, 1984)

1. Van der Wielen Audrey ; PhD Eng. ; Centre de recherches routières ; a.vanderwielen@brrc.be

2. Smets Sylvie ; MSc ; Centre de recherches routières ; s.smets@brrc.be

3. Van Hoyer Thomas, ingénieur, Eloy Béton, t.vanhoye@eloybeton.be

4. Hubert Julien, ULiège ; PhD Eng. ; Université de Liège ; Julien.Hubert@uliege.be

5. Courard Luc, ULiège ; Pr. PhD Eng. ; Université de Liège ; Luc.Courard@uliege.be

6. NGanjie Josiane, ingénieur, CRIC-OCCN, J.Nganjie@cric-occn.be

7. Schaerlaekens Steven, ingénieur, Holcim Belgium, steven.schaerlaekens@holcim.com

Pour l'évaluation de la résistance au gel-dégel, il a été décidé d'utiliser la méthode du slab test (Comité Européen de Normalisation [CEN], 2016) au lieu de la procédure ISO/DIS. En effet, cette dernière est beaucoup plus utilisée au niveau européen et est susceptible de la remplacer dans le CCT Qualiroutes (SPW, Infrastructures, 2021) au cours des prochaines années. Pour le béton autoroutier, les pertes cumulées maximales à 28 jours sont fixées par le cahier des charges flamand SB250 (Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer [AWV], 2021) à 1,5 kg/m².

Différents matériaux granulaires naturels et recyclés étaient disponibles sur le site des planches d'essai du projet. Les matériaux naturels étaient un sable de rivière 0/2 ainsi que des granulats concassés de porphyre 2/6 et 6/20. Des granulats de béton recyclé (RCA) étaient également disponibles, avec des granulométries de 2/6 et 6/20. Tous les matériaux ont été caractérisés physiquement et chimiquement en laboratoire.

Avec ces matériaux, il a été décidé de définir différentes squelettes granulaires, avec des teneurs en granulats recyclés de 0 %, 25 %, 50 % et 100 % (taux de substitution en volume de la fraction granulaire). Pour ces mélanges, seul le RCA 6/20 fourni a été utilisé, la courbe granulométrique du 2/6 étant moins bien intégrée à celle du béton de référence. Quelques essais ont néanmoins été menés sur des compositions intégrant cette fraction (C5 et C10), mais ceux-ci ont confirmé leurs performances décevantes. Pour cette raison, les résultats relatifs à ces compositions ne seront pas présentés dans cet article. Les proportions volumiques des matériaux granulaires dans chaque composition sont détaillées dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 - Proportion volumique des granulats dans chaque composition

Proportion volumique du squelette granulaire (%)	0/2 sable	6/20 RCA	2/6 porphyre	6/20 porphyre	Remarque
C1/C6 : 0% RCA	36,5	0,0	5,5	58,0	Mélange de référence
C2/C7 : 100 % RCA	29,0	71,0	0,0	0,0	100% de granulats recyclés
C3/C8 : 50% RCA	33,0	33,5	0,0	33,5	50% de granulats recyclés
C4/C9 : 25% RCA	36,0	16,0	0,0	48,0	25% de granulats recyclés

Le ciment généralement utilisé pour la construction routière en Belgique est le CEM III A 42,5 N, dans lequel 36 à 65% du clinker Portland est remplacé par du laitier de haut fourneau. Dans ce projet, Holcim et le CRIC-OCN ont développé un nouveau ciment bas carbone, le CEM V/A (S-V) 42,5 N, contenant du laitier de haut fourneau mais aussi des cendres volantes récupérées. Ce ciment n'étant produit dans le cadre du projet que les jours précédant la mise en œuvre des sections d'essai, un ciment existant assez similaire, le CEM V/A (S-V) 42,5 N, à base de cendres volantes fraîches, a été utilisé pour les mélanges de laboratoire.

Pour chaque composition, les proportions massiques des différents constituants sont calculées, en visant une teneur en air de 4% et un rapport E/C de 0,41. Nous avons ajouté 85% de l'eau d'absorption pour les produits recyclés, et 100% pour les produits naturels. Les quantités de plastifiant et d'entraîneur d'air ont été ajustées en laboratoire pour obtenir la teneur en air et la valeur d'affaissement visées (**Tableau 3 et Tableau 4**).

Tableau 3 - Performance des mélanges de béton en laboratoire - CEM III /A

Matériau	C1: CEM III - 0% RCA*	C1: CEM III - 0% RCA	C2: CEM III** - 100% RCA	C3: CEM III - 50% RCA	C4: CEM III - 25 % RCA*	C4: CEM III - 25% RCA
Eau efficace (kg/m ³)	165,00	165,00	168,00	165,00	165,00	165,00
Absorption d'eau (kg/m ³)	8,40	8,13	60,84	28,68	20,03	17,88
Plastifiant (kg/m ³)	2,50	3,00	4,20	3,50	3,50	3,50
Agent entraîneur d'air (kg/m ³)	0,88	0,60	0,6	0,60	0,70	0,60
Affaissement (mm)	10	47	7	9	19	54
Teneur en air (%)	5	4	3,1	5,1	6	3,6
Masse vol béton frais (kg/m ³)	2300	2326	2243	2238	2232	2345
Rc 7 j (MPa)	33,45	32,36	34,18	35,58	30,7	34,96
Rc 28 j (MPa)	49,56	50,15	48,57	50,54	44,34	51,63
Rc 90 j (MPa)	59,37	57,04	58,54	60,4	53,05	60,37
Pertes Slab test 28 cycles (kg/m ²)	1,43			2,07	0,86	
Absorption d'eau 28 j (WAI, %)	6,4	6,1		6,9	6,3	6,77

* La distribution de la taille des particules n'est pas optimale à 100 % ; ** Augmentation de la quantité d'eau efficace.

Tableau 4 - Performance des mélanges de béton de laboratoire - CEM V /A (S-V)

	C6: CEM V - 0% RCA	C7: CEM V - 100% RCA	C8: CEM V - 50% RCA	C9: CEM V - 25% RCA
Eau efficace (kg/m ³)	165,00	165,00	165,00	165,00
Absorption d'eau (kg/m ³)	8,05	51,37	28,41	17,70
Plastifiant (kg/m ³)	3,00	3,33	2,50	3,00
Agent entraîneur d'air (kg/m ³)	0,88	0,65	0,6	0,80
Affaissement (mm)	12	25	14	22
Teneur en air (%)	4,2	3,8	3,4	3,9
Masse vol béton frais (kg/m ³)	2311	2209	2282	2296
Rc 7 j (MPa)	35,33	32,06	36,54	35,11
Rc 28 j (MPa)	53,42	49,08	55,56	54,71
Rc 90 j (MPa)	64,97	60,2	66,19	61,63
Pertes Slab test 28 cycles (kg/m ²)	5,44	7,48	5,82	4,88
Absorption d'eau 28 j (WAI, %)	5,5	8,5	6,7	6,5

Les essais ont montré qu'il fallait utiliser des teneurs en plastifiant assez élevées, probablement assez proches du maximum recommandé par le fabricant (maximum 0,8 à 1% du poids du ciment), tandis que le dosage de l'entraîneur d'air restait un véritable défi. Globalement, l'agent entraîneur d'air semble moins efficace avec le CEM V/A (S-V) qu'avec le CEM III/A.

Les résistances à la compression et les absorptions d'eau sont représentées graphiquement à la **Figure 1**, en fonction du type de ciment et du taux de substitution des RCA.

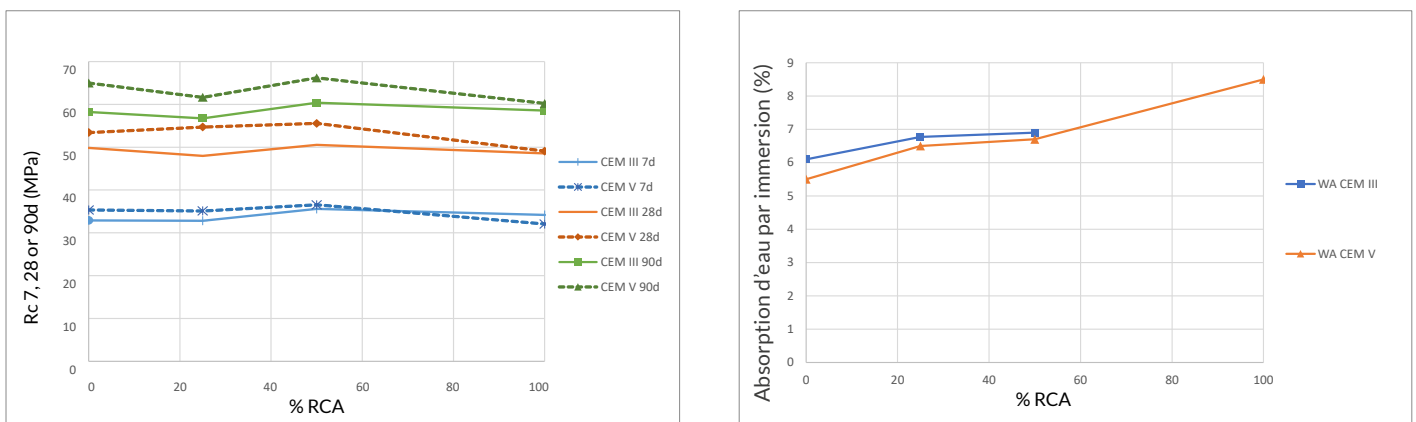


Figure 1 - Influence du taux de substitution du RCA sur la résistance à la compression et l'absorption d'eau des mélanges de béton (étude en laboratoire)

L'influence des RCA sur la résistance à la compression semble limitée. Seuls les mélanges 100% RCA présentent une résistance inférieure à celle du mélange de référence, mais toutes les valeurs se situent largement au-dessus de l'objectif de 50 MPa à 90 jours. Les mélanges CEM V/A présentent une résistance plus élevée que les mélanges CEM III/A, mais cela pourrait être dû à leur teneur en air plus faible. Cependant, nous remarquons un développement de la résistance légèrement plus lent pour le CEM V/A, avec 55 % de la résistance à 90 jours à 7 jours, comparé à 59 % avec le CEM III/A. L'absorption d'eau, d'autre part, est clairement influencée par le taux de substitution du RCA. Sur l'échantillon de référence, l'absorption semblait plus faible avec le CEM V/A, mais cela n'a pas été confirmé sur les mélanges avec 25 et 50 % de RCA.

Les pertes pendant le slab test sont élevées par rapport au seuil de 1,5 kg/m², ce qui indique une faible résistance aux cycles de gel/dégel en présence de sels de déverglaçage. Pour une même teneur en air, les mélanges CEM III/A semblent être plus performants que les mélanges CEM V/A. L'influence du taux de substitution du RCA sur la résistance au gel, par contre, n'apparaît pas clairement dans ces résultats, si ce n'est que le mélange avec 100 % de RCA présente les pertes maximales à 28 cycles. D'après ces résultats, il semble que la teneur en air de 4 % visée dans cette étude ne soit pas suffisante pour garantir la résistance au gel de la surface du béton.

Sections d'essai

Dans le cadre du projet Monocrete, des chaussées expérimentales en béton ont été mises en place à la centrale à béton d'Eloy à Bierset, couvrant une surface totale de plus de 3 500 m² (**Figure 2**). Ces chaussées de 38 cm d'épaisseur ont été utilisées pour démontrer la faisabilité de la mise en œuvre à grande échelle de bétons intégrant les matériaux alternatifs, ainsi que pour évaluer l'influence des paramètres de vibration sur les performances du béton (ces résultats ont été décrits dans Van der Wielen et al., 2024).



Figure 2 - Section d'essai du projet MONOCRETE à Bierset

Pour évaluer l'impact des granulats recyclés et du ciment alternatif sur un béton routier mis en place avec une machine à coffrage glissant, une section d'essai de près de 500 m de long a été construite au printemps 2023. Les mélanges détaillés au **Tableau 3** et au **Tableau 4** ont été mis en œuvre, avec une adaptation des dosages d'entraineur d'air et de plastifiant. Sur la majeure partie de la section, le béton a été vibré à une fréquence moyenne de 170 Hz et à une vitesse moyenne de 1,1 m/s. Un extrait des résultats obtenus sur cette section d'essai est détaillé dans le **Tableau 5**.

Mélange	Vibration		Béton frais		Carottes					Cubes		
	Fréq.	Vitesse	Affaissement (mm)	Air (%)	Rc 90 j (MPa)			Slab 28 cycles (kg/m ²)	WAI 90 j (kg/m ²)	Rc 90 j (MPa)	WAI 28 j (%)	Slab 28 cycles (kg/m ²)
					Surf.	Milieu	Base					
C1 : 0% RCA CEM III	Moyenne	Moyenne	15	4	71,8	71,3	79,4	2,14	4,8	74,41	5,4	1,34
C2 : 100% RCA CEM III	Moyenne	Moyenne	24	3,5	57,2	60,9	63,9		9,3	60,42	9,1	4,17
C3 : 50% RCA CEM III	Moyenne	Moyenne	2	2	69,5	68,7	76,9	3,17	6,1	74,83	5,5	3,3
C4 : 25% RCA CEM III	Moyenne	Moyenne	4	2,7	81	73,2	80,7	2,58	5,6	75,42	6	3,04
C4 : 25% RCA CEM III	Elevée	Moyenne	12	4,2	63,4	64,6	71,3		6	69,52	5,8	2,34
C4 : 25% RCA CEM III	Moyenne	Faible	26	4,2						69,2		
C6 : 0% RCA CEM V	Moyenne	Moyenne	49	3						67,72	5,9	3,22
C6 : 0% RCA CEM V	Moyenne	Moyenne	15	3,2	83,5	83,3	84,7	4,84	5,2	69,73		4,61
C7 : 100% RCA CEM V	Moyenne	Moyenne	50	2,8		59,4	58,4		9,5	56,61	9,1	6,57
C8 : 50% RCA CEM V	Moyenne	Moyenne	14	2,9						63,53		3,86
C8 : 50% RCA CEM V	Moyenne	Elevée	9	2,6						72,5		
C8 : 50% RCA CEM V	Faible	Moyenne	14	3,4	62,3	72,4	75,4		6,5	65,22	7,1	6,04
C9 : 25% RCA CEM V	Moyenne	Moyenne	10	2,6	76,6	74,9	86,8	2,91	5,3	71,81	6,6	4,07
C9 : 25% RCA CEM V	Moyenne	Moyenne	26	3,6	65,5	74,8	75,6		5,3	67,46	6	5,83

La teneur en air mesurée était très faible par rapport à notre valeur cible de 4 % pour presque tous les mélanges de béton, malgré l'augmentation du dosage de l'agent entraîneur d'air de 2 à 2,5 kg/m³ (plus du double de la quantité utilisée dans les essais en laboratoire). Cela semble indiquer une faible compatibilité entre l'agent entraîneur d'air et le nouveau ciment CEM V/A (avec lequel nous mesurons toujours moins d'air qu'avec le CEM III/A). Le processus de mélange de la centrale à béton (30"- 45" par gâchée) pourrait également être trop court pour que les bulles d'air se développent. En effet, avec le CEM III/A, nous avons toujours mesuré moins d'air avec le processus industriel qu'en laboratoire pour les mêmes compositions (malgré l'augmentation du dosage de l'agent entraîneur d'air).

A la **Figure 3**, la résistance moyenne à la compression à 90 jours est représentée pour toutes les carottes (sciées en trois échantillons de 10 cm de hauteur pour évaluer l'influence de la ségrégation), en fonction du type de ciment et du taux de substitution du RCA.

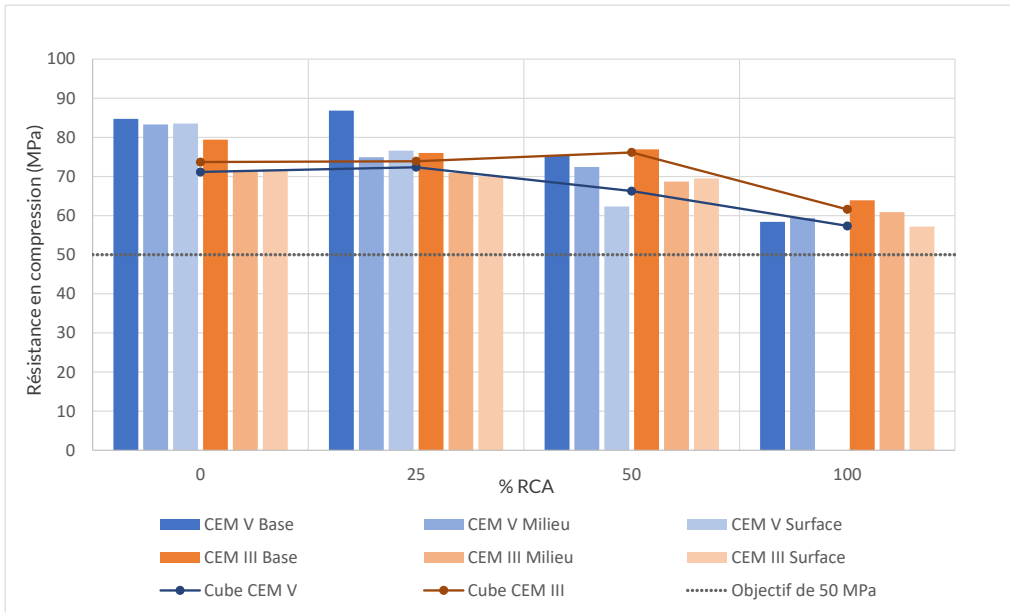


Figure 3 - Résistance en compression à 90 jours mesurée sur les cubes et sur les carottes (divisées en trois échantillons de 10 cm)

Toutes les mesures sont supérieures au seuil de 50 MPa. La présence de RCA provoque une diminution de la résistance à la compression, avec une perte de résistance d'environ 25 % pour un taux de substitution de 100 %. La résistance est en moyenne 9,4% plus élevée à la base de la carotte qu'en surface.

L'absorption d'eau en surface a été mesurée sur des carottes de chaque composition (**Figure 4**). Comme pour les résultats de laboratoire, ce paramètre semble directement influencé par le taux de substitution du RCA, indépendamment du type de ciment. Si on souhaite respecter le critère d'absorption d'eau du CCT Qualiroutes (SPW, Infrastructures, 2021, chapitre 5) ($W_{I,avg} < 6,3\%$), un taux de substitution de 50% semble être un maximum.

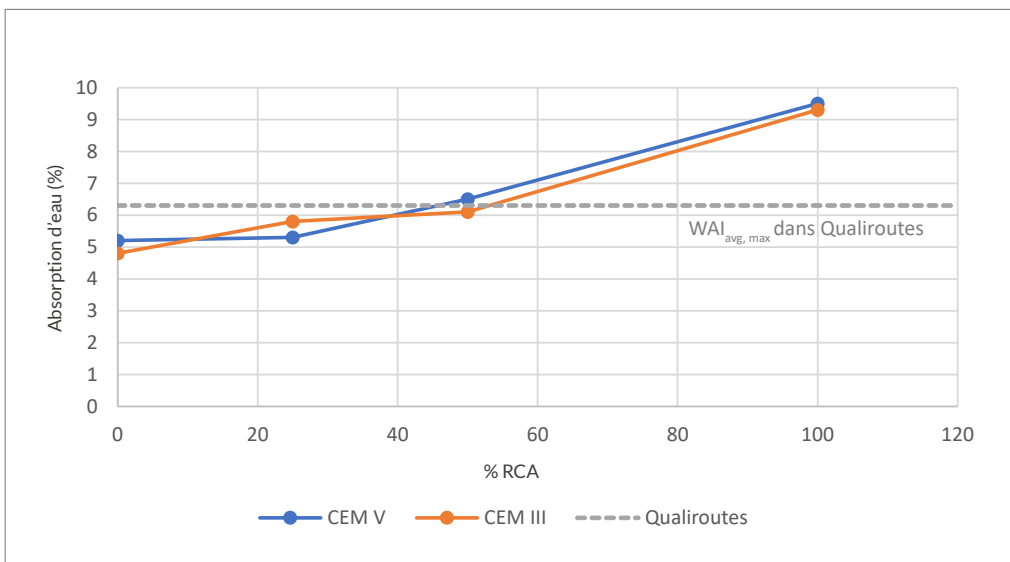


Figure 4 - Influence du taux de substitution du RCA sur l'absorption d'eau en surface à 90 jours

La résistance en traction des bétons est un paramètre important dans le dimensionnement des routes. Elle est en général estimée sur la base de la résistance en compression. Afin de vérifier si la relation entre ces valeurs est influencée par la présence de granulats recyclés ou par le ciment alternatif, des essais de traction par flexion en 4 points ont été réalisés sur des prismes réalisés avec les bétons de la section d'essais. La **Figure 5** présente la relation entre ces résistances en traction et les résistances en compression à 28 jours mesurées sur les cubes des mêmes bétons.

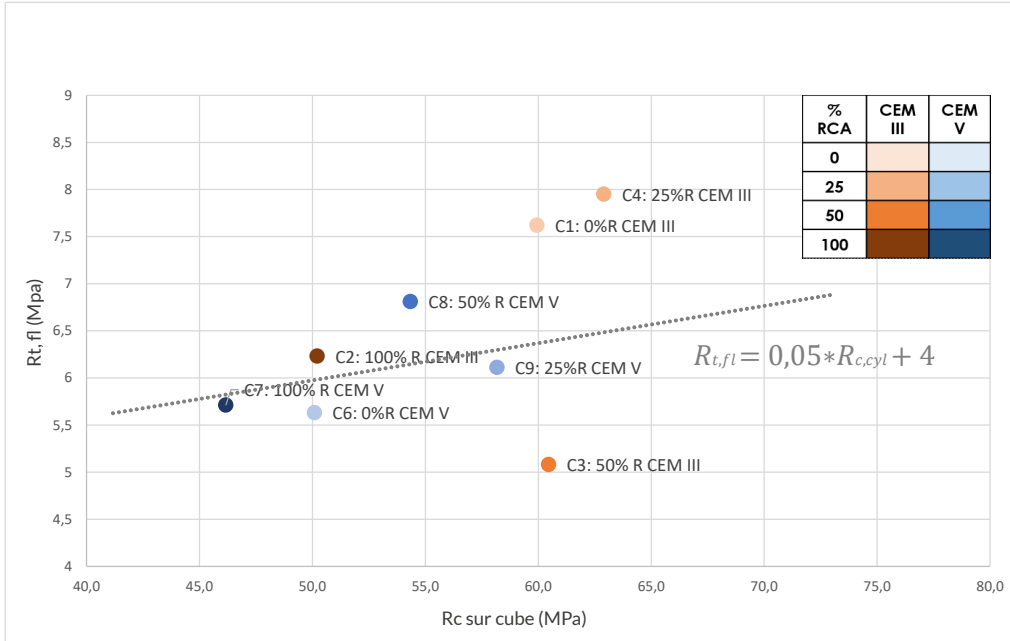


Figure 5 - Relation entre résistance en traction par flexion et résistance en compression à 28 jours.

On observe que la relation $R_{t,fl} = 0,05 * R_{c,cyl} + 4$, utilisée pour le dimensionnement des routes en béton en Belgique (SPW, 2013) et matérialisée par la ligne en pointillés, est plutôt bien vérifiée. Les granulats recyclés et le ciment alternatif ne semblent pas avoir d'influence déterminante sur cette relation

La **Figure 6** présente les pertes au slab test à 28 cycles mesurées sur les cubes de chantier, en fonction de la teneur en air des échantillons.

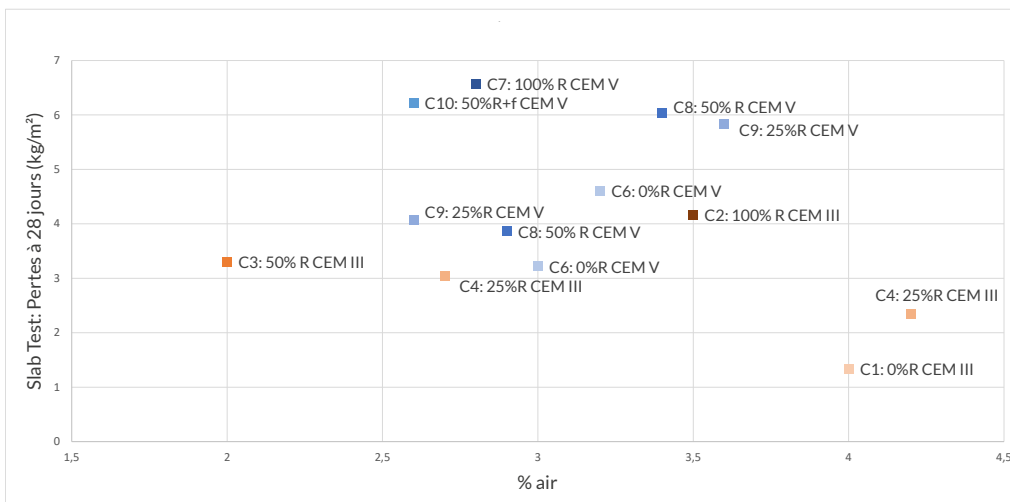


Figure 6 - Influence de la teneur en air du béton frais sur la résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglçage (slab test)

On peut observer qu'à une exception près, les échantillons présentent des pertes supérieures au seuil de 1,5 kg/m², souvent avec des valeurs très élevées. Les mélanges à base de CEM III/A semblent avoir de meilleures performances pour des teneurs en air similaires. Néanmoins, il aurait été intéressant de tester des mélanges avec le CEM V/A et des taux de substitution en RCA élevés incorporant des teneurs en air élevées (4-5%) afin de vérifier si le critère de résistance au gel pouvait être respecté avec ces mélanges. Comme expliqué précédemment, cela n'a pas pu être réalisé avec l'agent entraîneur d'air présent sur le site.

Etude du réseau de bulles d'air entraîné des nouveaux bétons

A la suite de ces résultats, il a été décidé de réaliser de nouveaux mélanges de laboratoire afin de tester des mélanges utilisant du CEM V et présentant une teneur en air suffisante. Pour atteindre cet objectif, nous avons sélectionné un entraîneur d'air spécifique : le AER 200 P de Sika. Cet adjuvant génère la création de bulles d'air sur la base d'une réaction chimique, lui permettant d'être peu affecté par toutes les autres propriétés du béton (temps de malaxage, composition alternative des granulats ou du ciment, ...). Étant donné la réaction chimique permettant la génération des bulles d'air, le fabricant recommande de mesurer la teneur en air 30 minutes après le mélange.

Des compositions avec 0, 50 et 100% de RCA ont été testées en visant des teneurs en air de 5%, ainsi qu'une composition avec 0% de recyclés et une teneur en air plus élevée (6 kg/m³ d'entraîneur d'air). Le **Tableau 6** présente les compositions testées.

Matériau	C6: CEM V - 0% RCA	C8: CEM V - 50% RCA	C7: CEM V - 100% RCA	C6: CEM V - 0% RCA
Eau efficace	165,6	165,6	165,6	165,06
Eau d'absorption	8,03	28,38	51,32	8,03
Plastifiant Sika BV3M	2,5	2,50	2,5	2,5
Entraîneur d'air AER 200 P	4	4	4,8	6
Affaissement (mm)	11	12	16	26
Teneur en air 30 minutes (%)	4,4	4	4,3	5,5
Rc 7j (MPa)	35,04	33,28	29,59	26,58
Rc 28j (MPa)	52,47	48,71	45,65	42,55
Slab test 28 cycles (kg/m ²)	3,45	3,89	3,84	3,36

Les teneurs en air obtenues avec le nouvel entraîneur d'air sont effectivement plus élevées que celles qui avaient été obtenues avec l'entraîneur d'air classique. L'efficacité du produit semble toutefois décroître légèrement lorsque la teneur en granulats recyclés (RCA) augmente. Les pertes à 28 jours au Slab Test sont comparées aux résultats de laboratoire précédents (**Figure 7**).

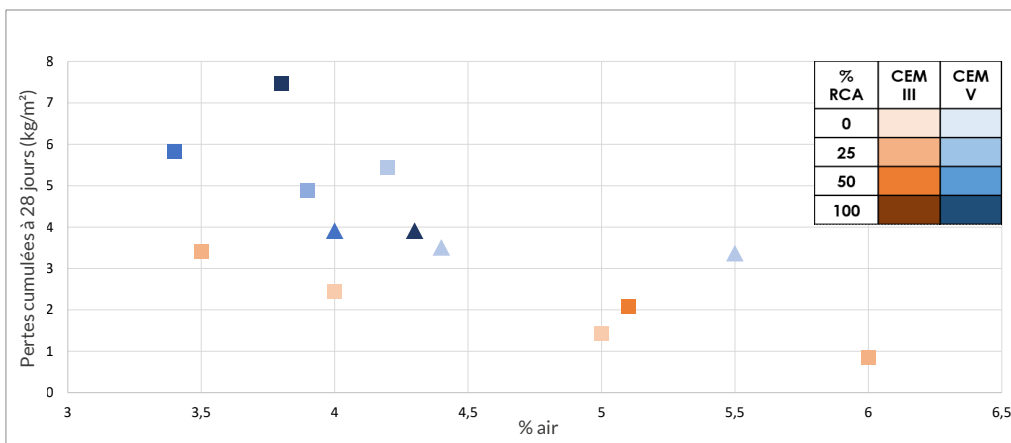


Figure 7 : Influence de la teneur en air du béton frais sur la résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage (slab test) - comparaison des mélanges avec le nouvel entraîneur d'air (triangles) avec les mélanges précédents

Les mélanges réalisés avec le nouvel entraîneur d'air (les triangles sur le graphe) présentent effectivement une meilleure résistance aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage que les mélanges précédents réalisés avec du CEM V. C'est le cas pour les mélanges qui contiennent plus d'air entraîné que ce qui avait été obtenu précédemment, mais aussi pour le mélange avec 50 % de recyclés qui contient 4 % d'air. A teneur en air égale, la protection contre les effets du gel semble donc plus élevée avec le nouvel entraîneur d'air qu'avec le précédent. Malgré ces performances améliorées, les pertes à 28 jours restent supérieures à l'objectif de 1,5 kg/m². A teneur en air identique, les performances des mélanges réalisés avec le ciment CEM V sont moins bonnes que celles des mélanges réalisés avec le CEM III. Sur la base de ces nouveaux essais, il semble à nouveau que les granulats recyclés ont un léger effet négatif sur la résistance au gel-dégel des bétons.

Afin d'expliquer les différences observées, une analyse des caractéristiques du réseau de bulles d'air a été réalisée au CRIC-OCCN, en utilisant le logiciel Image J (qui donne des résultats similaires à ceux de la norme ASTM C457-98 [ASTM International, 1998]). Cette analyse, réalisée sur des lames de béton polies puis scannées en haute définition, vise à déterminer la proportion de bulles ayant la dimension idéale (50 μm -500 μm) pour accroître la résistance au gel-dégel du béton. L'analyse permet également de mesurer le facteur d'espacement du béton, défini comme la demi-distance moyenne entre deux bulles (Powers, 1949). Ce paramètre est, selon de nombreux auteurs, le meilleur indicateur d'une résistance suffisante au gel-dégel, un facteur d'espacement inférieur à 200 μm étant souvent assimilé à une résistance suffisante (ACI Committee 201, 2016 ; GBB, 2018). Cette analyse a été réalisée sur les bétons fabriqués avec le nouvel entraîneur d'air, mais aussi, à titre de comparaison, sur deux éprouvettes avec 0 et 100 % de recyclés fabriquées avec le premier entraîneur d'air LPS-A (**Tableau 7**).

Tableau 7 : Analyse de l'influence de l'entraîneur d'air sur les caractéristiques du réseau de bulles d'air

Echantillons	C6 CEM V 0% RCA AER 200 p	C6 CEM V 0% RCA AER 200 p	C8 CEM V 50% RCA AER 200 p	C7 CEM V 100% RCA AER 200 p	C6 CEM V 0% RCA LPS-A	C7 CEM V 100% RCA LPS-A
50 μm -500 μm : air entraîné durci (%)	4,69	4,02	3,02	3,17	1,71	0,73
$\geq 500 \mu\text{m}$: air occlus durci (%)	3,2	2,95	1,81	1,95	4,06	4,33
Air total sur béton durci (%)	7,89	6,97	4,83	5,12	5,77	5,06
Facteur d'espacement en surface (μm)	171,89	183,03	202,2	198,7	247,6	301,3
Slab test à 28 cycles après 28j (kg/m^2)	3,36	3,45	3,89	3,84	5,44	7,48
Résistance à la compression à 28j	42,55	52,47	48,71	45,65	53,42	49,08
Air total sur béton durci (%)	7,89	6,97	4,83	5,12	5,77	5,06
Air sur béton frais (%)	5,5	4,4	4	4,3	4,2	3,8

L'entraîneur d'air AER 200 p permet d'obtenir des teneurs en air plus importantes avec le CEM V, mais il semblerait qu'il permette également d'améliorer la qualité du réseau de bulles d'air. On constate en effet (**Figure 8**) que les bulles d'air obtenues avec ce produit sont en majorité comprises dans l'intervalle 50 μm -500 μm , alors que les éprouvettes réalisées avec l'ancien entraîneur d'air contiennent principalement de l'air occlus (bulles > 500 μm).

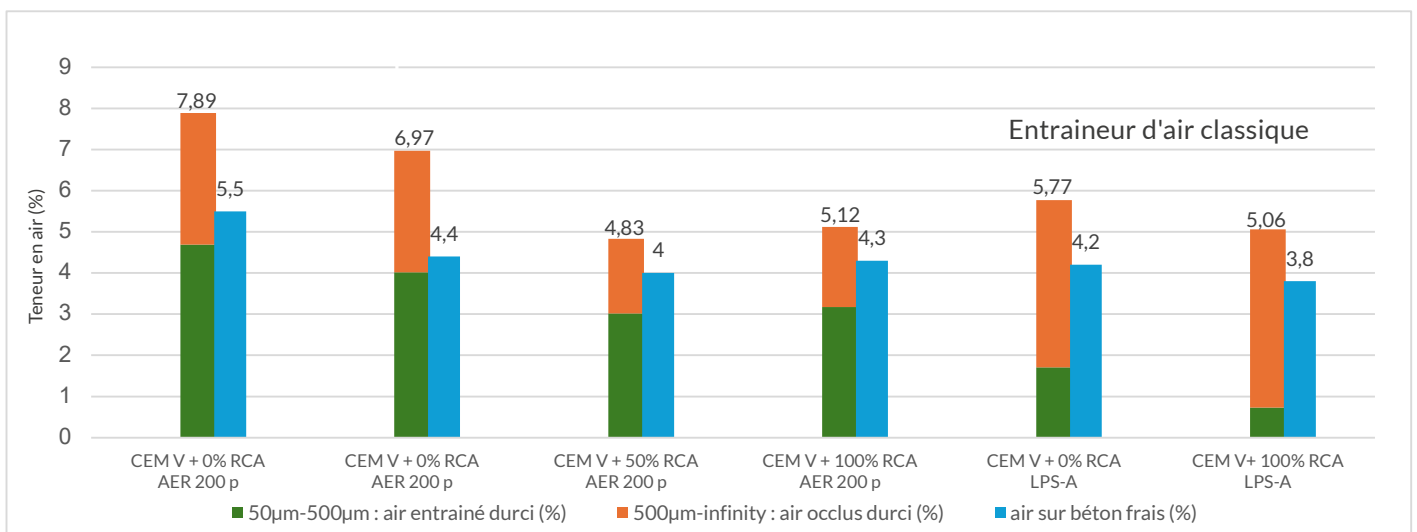


Figure 8 : Influence de l'entraîneur d'air sur la dimension des bulles d'air des éprouvettes de laboratoire réalisées avec du CEM V

La **Figure 9** montre l'influence du facteur d'espacement sur les pertes à 28 jours à l'essai gel/dégel (slab test). On observe une corrélation très claire entre les deux paramètres, un facteur d'espacement plus faible permettant effectivement une réduction des pertes au gel/dégel.

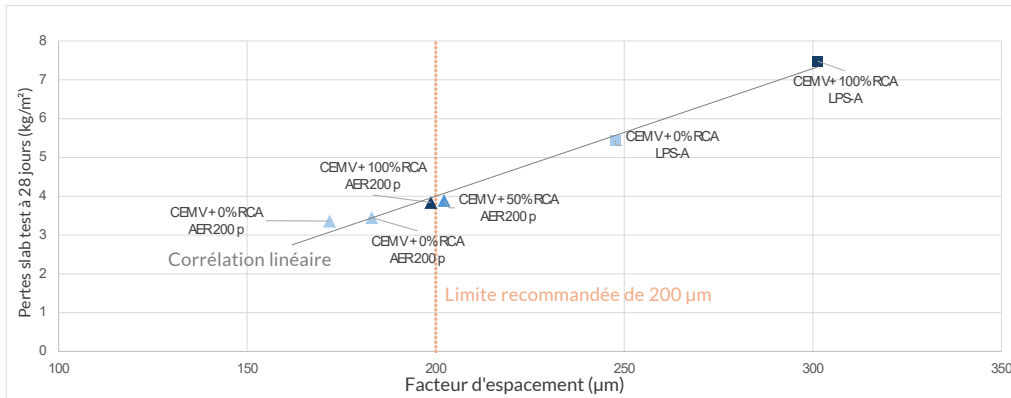


Figure 9 : Corrélation entre facteur d'espacement et pertes au gel-dégel

Dans la littérature, une telle corrélation est régulièrement décrite, mais il est admis (ACI Committee 201, 2016) que le facteur d'espacement permettant d'atteindre la résistance au gel dégel est de l'ordre de de 200 µm, ce qui n'est pas observé ici puisque les pertes pour un facteur d'espacement de 200 µm demeurent supérieures à 3 kg/m².

L'analyse du réseau de bulles sur béton durci a également été réalisée par le CRIC-OCCN sur des carottes prélevées à plus de 90 jours sur la planche d'essais. Ces résultats peuvent être combinés aux résultats sur cubes de chantier et de laboratoire afin de représenter graphiquement l'influence du facteur d'espacement sur les pertes au gel-dégel (**Figure 10**).

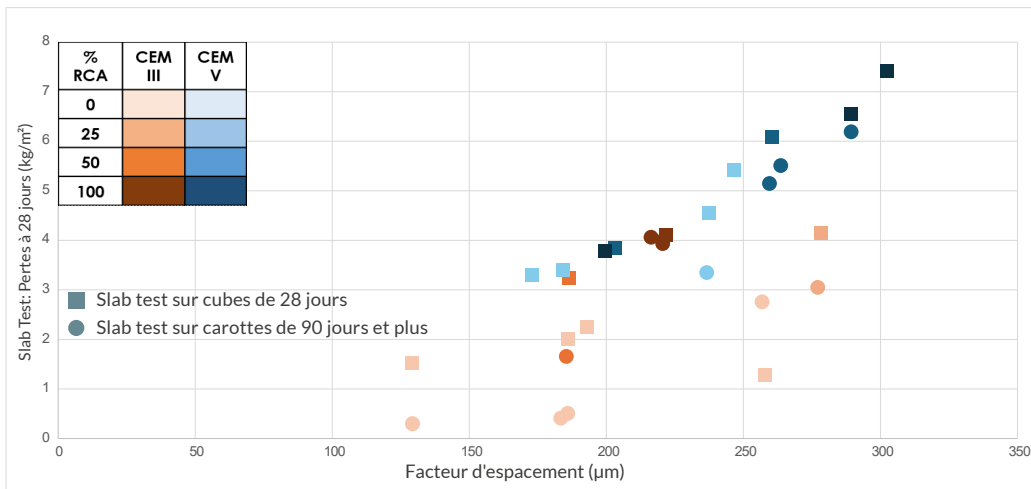


Figure 10 : Corrélation entre facteur d'espacement et pertes au slab test pour les planches d'essais et les éprouvettes de laboratoire

On observe un alignement des points le long d'une droite, qui semble représenter les pertes maximales pour un facteur d'espacement donné. Ces pertes ne semblent pas dépendre directement de la teneur en recyclés ni du ciment utilisé, mais restent globalement supérieures à l'objectif visé, même pour les facteurs d'espacement inférieurs à 200 µm. Certains échantillons présentent des pertes parfois largement inférieures à cette droite. Il s'agit en général de bétons à base de ciment CEM III et contenant peu (0-25%) de granulats recyclés. En général, les pertes sur carottes sont inférieures aux pertes sur cubes, ce qui peut notamment s'expliquer par le fait que celles-ci ont été prélevées à plus de 90 jours, alors que les essais sur cubes sont réalisés sur un béton plus jeune.

Conclusions

Les chaussées épaisses en béton monocouche constituent une bonne solution aux défis actuels de la mobilité. Cependant, leur impact environnemental (en termes d'émissions d'équivalents CO₂ et d'épuisement des ressources naturelles) reste important. Le projet MONOCRETE visait à optimiser les paramètres de vibration tout en réduisant l'impact environnemental en incorporant des matériaux recyclés issus de l'économie circulaire.

En analysant les premiers résultats obtenus en laboratoire et sur nos sections d'essai, il est apparu que les résistances à la compression de tous les mélanges étaient satisfaisantes, bien qu'une diminution puisse être observée à 100% RCA. La résistance à la compression peut être significativement plus élevée à la base du revêtement en béton qu'en surface. L'absorption d'eau augmente quant à elle directement avec le taux de substitution des granulats par des RCA.

D'après ces premiers résultats, la résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage est le principal point d'attention pour les bétons alternatifs. Le ciment CEM V est moins compatible avec les agents entraîneurs d'air classiques et semble mener à une résistance au gel-dégel inférieure à celle obtenue avec le CEM III, même pour des teneurs en air similaires. Une analyse complète du réseau de bulles d'air sur les bétons de laboratoire et des planches d'essai a révélé une forte corrélation entre le facteur d'espacement et la résistance au gel-dégel. Elle a également mis en évidence l'efficacité de l'utilisation d'entraîneurs d'air spécifiques, bien que la résistance au gel-dégel des mélanges réalisés soit souvent inférieure aux prévisions.

Le secteur de la construction consomme près de 40 % des ressources naturelles mondiales et produit un pourcentage similaire de déchets. Ce projet contribuera à préserver les ressources minérales, à récupérer les débris issus de la construction et à réduire les transports en encourageant l'utilisation locale de produits recyclés.

Auteur

Audrey Van der Wielen
T +32 2 766 03 87
a.vanderwielen@brrc.be



Références

- ACI Committee 201. (2016). Guide to durable concrete (ACI Guide No. 201.2R-16). American Concrete Institute (ACI). https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=201216&Language=English&Units=US_AND_METRIC
- ASTM International. (1998). Standard test method for microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete (ASTM C457-98). <https://store.astm.org/c0457-98.html>
- Comité Européen de Normalisation (CEN). (2016). Essais sur béton durci. Partie 9: Résistance au gel dégel-dégel en présence de sels de déverglaçage (écaillage) (CEN/TS 12390-9).
- Groupement Belge du Béton (GBB). (2018). Technologie du béton. <https://www.gbb-bbg.be/publications/manuel-technologie-du-beton/>
- Organisation Internationale de Normalisation (ISO). (1984). Béton: Détermination de la résistance à l'écaillage des surfaces soumises à des agents chimiques dégivrants (ISO/DIS 4846-2).
- Ployaert, C. (2010). Vers une composition optimale des bétons routiers. Fédération Belge du Ciment (FEBELCEM). https://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/autres-publications/fr/Composition-optimale-betons-routiers.pdf
- Powers, T.C. (1949, December 13-16). The air requirements of frost-resistant concrete. In R.W. Crum, F. Burggraf & W.N.J. Carey (Eds), Proceedings of the 29th annual meeting of the Highway Research Board, Washington, DC, USA. National Research Council (NRC), Highway Research Board (HRB).
- Service Public de Wallonie (SPW). (2013). Guide utilisateur du logiciel QualiDim 2.4.0.
- Service Public de Wallonie (SPW), Infrastructures. (2021). Cahier des charges type Qualiroutes (Version 2021 consolidée [et ses adaptations ultérieures]). <https://infrastructures.wallonie.be/pouvoirs-locaux/nos-thematiques/routes/qualite-construction/qualiroutes.html>
- Van der Wielen, A., Smets, S., Van Hoye, T., Hubert, J., Courard, L., Cerica, D., Léonard, A., NGanjie, J. & Schaerlaekens, S. (2024, August 25-29). Optimizing vibration parameters of thick single-layer concrete pavements: Results of the Belgian Monocrete project. In Innovative paths toward lower carbon in concrete pavements. 13th international conference on concrete pavements, Minneapolis, MN, USA. International Society for Concrete Pavements (ISCP).
- Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer (AWV). (2021). Standaardbestek 250 voor de wegenbouw (Version 4.1a). <https://wegenenverkeer.be/zakelijk/documenten>