



Projet MONOCRETE: revêtement monocouche épais à base de liants alternatifs et de granulats recyclés

Introduction

A l'heure actuelle, des charges croissantes de trafic s'exercent sur de nombreuses infrastructures. Ainsi, le trafic autoroutier ne cesse d'augmenter, dans les aéroports, les taxiways doivent être adaptés aux avions gros porteurs et les zones de stockage nécessitent des fondations de plus en plus épaisses.

Les revêtements en béton monocouche épais constituent une solution idéale pour répondre à ces nouveaux défis, car ils présentent une durée de vie très longue même sous des sollicitations importantes et ils supportent les charges statiques sans présenter de déformations permanentes.

La formulation et la mise en œuvre de béton de grande épaisseur requièrent une attention spécifique, car une épaisseur plus importante du béton va accentuer d'éventuels problèmes liés à une mauvaise compacité du mélange ou à une mauvaise vibration. Le risque de «ressuage» ou de ségrégation du béton s'en trouve dès lors accentué par rapport à un revêtement plus fin.



Figure 1 – Première planche expérimentale du projet Monocrete à Bierset

Le projet de recherche MONOCRETE, introduit dans le cadre d'un appel à projet du pôle de compétitivité wallon GreenWin, réunit des partenaires industriels (Eloy et Holcim) et des institutions de recherche (CRR, CRIC-OCCN et ULiège) dans le but d'étudier ces problématiques liées aux revêtements en béton de grande épaisseur. Le projet a démarré en mars 2021 pour une durée de trois ans. En plus des problématiques liées à la formulation et à la mise en œuvre des bétons, un second aspect du projet vise à diminuer l'impact environnemental de ces revêtements en y intégrant des granulats de béton recyclé ainsi qu'un ciment alternatif de type CEM V. L'impact environnemental des applications proposées sera pour finir évalué grâce à une analyse du cycle de vie (ACV) réalisée pour chacune des variantes testées.

Ces problématiques sont étudiées en combinant étude bibliographique, essais en laboratoire et la réalisation de deux planches d'essais, dont la première a été mise en œuvre au mois de novembre.

Influence de la vibration sur les propriétés des bétons routiers (étude bibliographique)

Au cours des premiers mois du projet, une étude bibliographique poussée nous a montré que la vibration du béton routier avait déjà été le sujet de nombreuses études, notamment dans certains états des États-Unis.

On distingue en général dans les bétons l'air occlus de l'air entraîné. Le premier est constitué de bulles de plus d'un millimètre de diamètre d , que l'on vise à évacuer au maximum pendant la vibration des bétons. À l'inverse, l'air entraîné est un réseau de micro-bulles d'air ($50 \mu\text{m} \leq d \leq 500 \mu\text{m}$, idéalement autour de $100 \mu\text{m}$) (Groupement Belge du Béton, 2018), généré par l'ajout dans le mélange d'un agent entraîneur d'air. Ces bulles d'air vont assurer le rôle de vases d'expansion permettant d'obtenir une résistance suffisante au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage.

On estime en général qu'une teneur en air du béton frais de 4 à 6 % permet d'assurer une résistance suffisante au gel-dégel. Cette affirmation n'est vérifiée que si l'air présent dans le béton est principalement de l'air entraîné et non quelques grosses bulles d'air occlus. Pour s'en assurer, on peut mesurer (sur béton durci) le facteur d'espacement du réseau de bulles, qui est la demi-distance moyenne entre deux bulles (Powers, 1949). Plus ce facteur est faible, plus les bulles sont petites. La norme NBN EN 934-2 sur les adjuvants pour bétons (Bureau de Normalisation [NBN], 2012) exige ainsi une valeur de facteur d'espacement inférieure à $200 \mu\text{m}$.

La vibration des bétons a pour objectif de diminuer la teneur en air occlus des bétons, et non celle en air entraîné. Néanmoins, il a été démontré que c'était pourtant le cas, en particulier lorsque des fréquences de vibration élevées étaient utilisées. Stark a ainsi montré dès 1986 (Stark, 1986) que la résistance au gel-dégel pouvait diminuer lorsque la fréquence augmentait. Ling et Taylor, 2021 ont récemment montré que le facteur d'espacement augmentait en parallèle.

Des expériences ont également été menées à grande échelle, sur du béton mis en œuvre par des machines à coffrage glissant.

Ainsi, une étude a été menée en Iowa en 1999 (Tymkowicz & Steffels, 1999a) afin d'étudier l'influence de la fréquence de vibration (5 000, 8 000 ou localement 12 000 vpm), de la vitesse d'avancement (1,5 m/min ou 0,75 m/min) et de la position verticale dans le revêtement sur la teneur en air du béton durci. L'étude a montré que la teneur en air variait fortement avec la profondeur dans le revêtement, la teneur en air de la surface étant en général plus faible que celle de la base de l'échantillon (Figure 2). L'étude a aussi confirmé qu'une fréquence trop élevée (ici 12 000 vpm) générait une perte de l'air entraîné, dont la teneur devenait inférieure au seuil requis pour assurer une bonne résistance au gel (Figure 3).

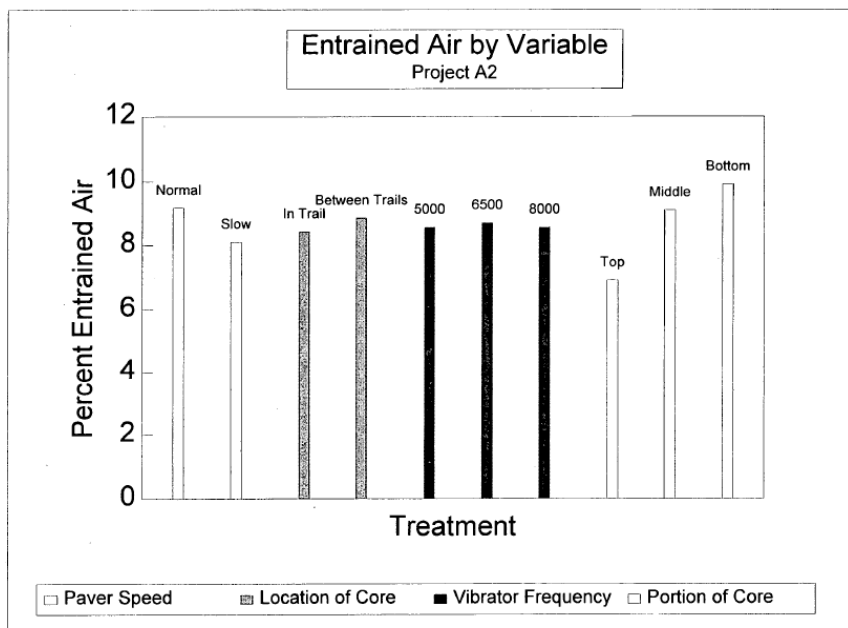
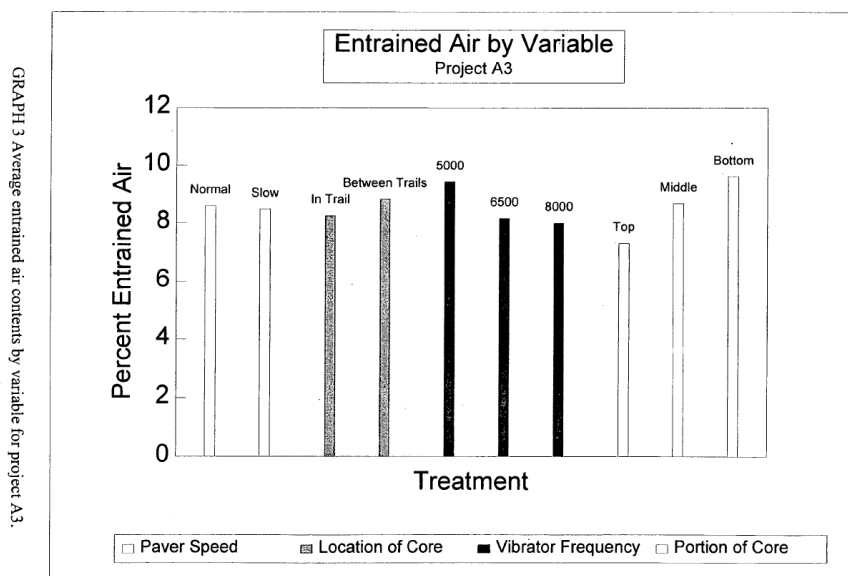


Figure 2 – Évolution de la teneur en air en fonction de la vitesse d'avancement de la machine, de la position par rapport aux aiguilles vibrantes, de la fréquence de vibration et de la profondeur pour l'une des zones testées (Tymkowicz & Steffels, 1999b)

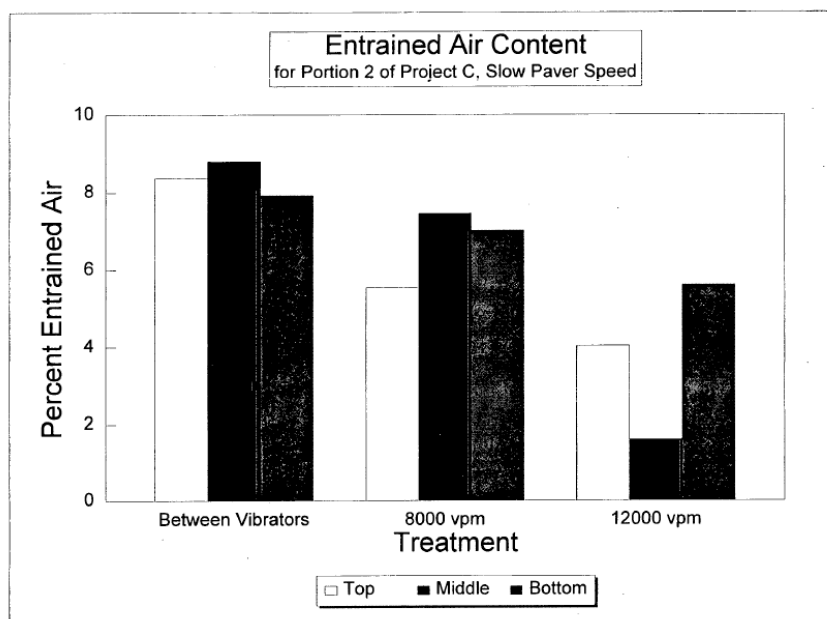


Figure 3 – Évolution de la teneur en air en fonction de la position par rapport aux vibreurs, de la fréquence de vibration et de la profondeur de la zone testée (Tymkowicz & Steffels, 1999b)

Une autre étude, menée en Iowa (Cable et al., 2000), s'est intéressée à l'influence des paramètres de mise en œuvre sur le réseau de bulles d'air entraîné. Sur le chantier pilote, le béton a été mis en œuvre avec deux fréquences (5 000 ou 8 000 vpm) et deux vitesses (1,22 ou 1,88 m/min). Les essais ont révélé que le meilleur réseau de bulles (la teneur en air la plus élevée et le facteur d'espacement le plus faible) était obtenu en utilisant une fréquence et une vitesse faibles, une fréquence et/ou une vitesse plus élevées menant parfois à un manque de bulles dans les premiers centimètres (qui sont les plus importants pour assurer la résistance au gel-dégel du revêtement). Cette configuration, combinant une fréquence faible et une vitesse de mise en œuvre faible, n'est pourtant pas celle qui aurait été retenue par l'équipe de mise en œuvre pour optimiser l'aspect esthétique de la surface. La finition de surface la plus satisfaisante serait plutôt obtenue en combinant une fréquence et une vitesse élevées. Cette étude suggère donc qu'il n'est probablement pas optimal pour le réseau de bulles et la résistance au gel-dégel de se baser uniquement sur l'aspect visuel d'un revêtement en béton pour sélectionner les paramètres de mise en œuvre ou juger de la qualité du compactage.

Dans plusieurs états américains, ces études ont mené à des recommandations pour les fréquences et les vitesses à utiliser sur les chantiers pour la mise en œuvre du béton routier. On prescrit ainsi de limiter la fréquence à 5 000 à 8 000 vpm et d'utiliser une vitesse d'avancement moyenne de 1 m/min.

En Belgique, comme dans la plupart des pays d'Europe, il n'existe actuellement pas de recommandations par rapport aux paramètres de mise en œuvre des bétons routiers. Il semblerait néanmoins que les fréquences utilisées soient en général supérieures aux recommandations précitées (> 9 000 vpm). Nos compositions de béton étant assez différentes de celles que l'on peut retrouver aux États-Unis, il a été décidé de tester dans le cadre du projet Monocrete différents paramètres, non seulement en laboratoire, mais aussi sur des planches d'essais à grande échelle.

Essais en laboratoire

Afin de mieux maîtriser le comportement du béton au cours de sa mise en œuvre, un programme d'essais en laboratoire a été mis sur pied à l'Université de Liège. Une boîte a ainsi été réalisée afin de pouvoir mesurer et observer les facteurs influençant le comportement en vibration. Les dimensions de la boîte, de 35*35*40 cm, ont été sélectionnées afin de pouvoir réaliser des mesures en dehors de la zone d'influence du vibreur, qui s'élève à environ 15 cm selon les données trouvées dans la littérature. La boîte a été équipée d'accéléromètres positionnés à 15 et 20 cm de la base ainsi que d'une fenêtre en Plexiglas afin d'observer la migration des bulles d'air pendant la vibration (Figure 4).

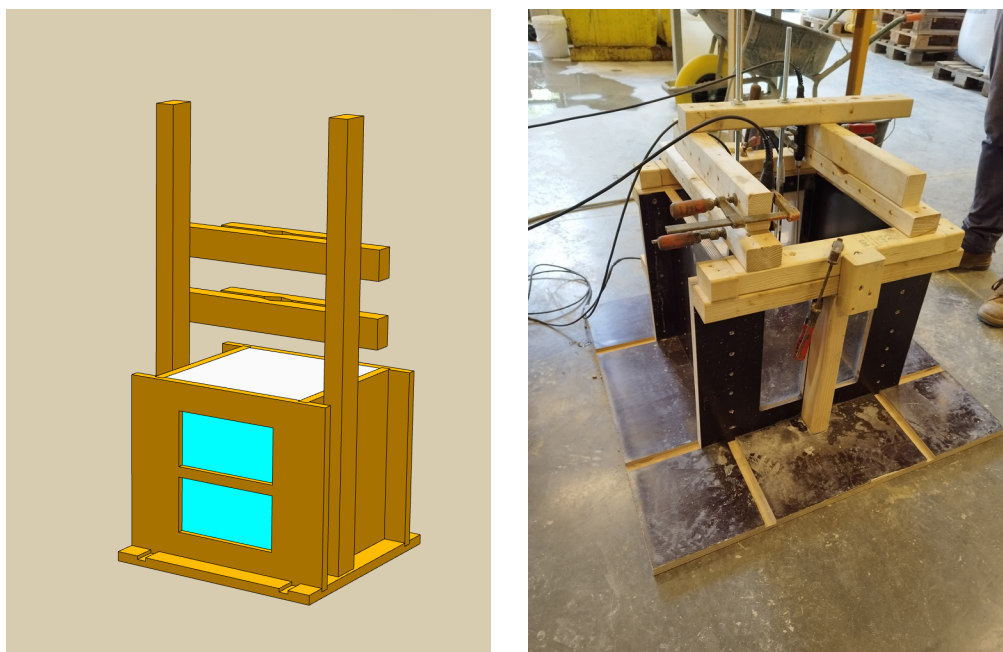


Figure 4 – Dispositif expérimental de mesure de propagation de la vibration dans les bétons (ULiège)

Au cours de la première série d'essais, plusieurs variantes de béton ont été testées, en modifiant la teneur en eau et en air, la composition de base correspondant au béton routier à base de matériaux naturels formulé pour la première planche d'essais du projet. Les mesures ont été réalisées pour plusieurs positions et mouvements d'aiguille.

A ce stade, notre campagne expérimentale n'a pas pu mettre en évidence de paramètre critique au niveau de la vibration des bétons, mais a permis de valider le procédé expérimental en confirmant les observations faites par d'autres auteurs (Banfill et al., 2011; Ling & Taylor, 2021). Cette étude doit être poursuivie en approfondissant l'étude de sensibilité commencée et en étudiant, en outre, l'influence des paramètres de l'aiguille vibrante (diamètre et fréquence).

Zone d'essais

Présentation des planches d'essais liées au projet

La première zone d'essais liée au projet Monocrete a été mise en œuvre au mois de novembre 2022 chez Eloy à Bierset. Elle consiste en deux routes, l'une de 75 m de long sur 6,5 m de large et l'autre de 125 m de long sur 5 m de large, avec une épaisseur de 38 cm. Pour le chantier, une composition classique de béton routier, à base de matériaux naturels (porphyre, sable du Rhin, CEM III/A 42,5), a été élaborée et testée en laboratoire.

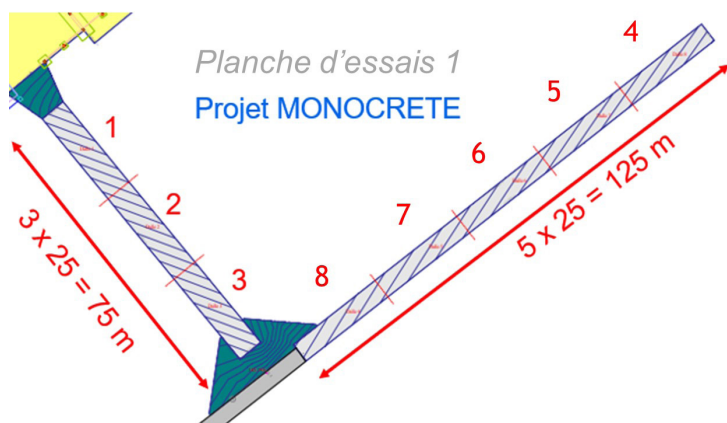


Figure 5 – Première planche d'essais du projet MONOCRETE (Bierset, novembre 2022)

Sur la première partie de la planche d'essais, divisée en 6 (3 x 2) zones, différents paramètres de vibration ont été testés:

- la position des aiguilles (presque horizontales sur la moitié gauche ou plus inclinées sur la moitié droite);
- la fréquence de vibration (150, 170 ou 190 Hz, ce qui équivaut à 9 000, 10 200 et 11 400 vpm);
- la vitesse d'avancement de la machine (0,8 ou 3,5 m/min).

Sur la seconde partie de la planche d'essais, la fréquence et la vitesse d'avancement de la machine ont été maintenues constantes, mais différentes compositions de béton ont été testées:

- composition avec plus de fines (sable et ciment);
- composition avec plus d'air entraîné;
- composition avec moins d'eau et plus de superplastifiant;
- composition d'origine.

Une moitié de la section a été vibrée avec des vibreurs légèrement resserrés.

Au printemps 2023, une seconde planche d'essais, longue de près de 500 m, sera réalisée, en intégrant un ciment alternatif et des granulats recyclés afin de diminuer l'empreinte écologique du revêtement.

Premiers résultats

La mise en œuvre de la première section pilote de 75 m, dans des conditions de fréquence et vitesse relativement extrêmes, nous a permis de faire différentes observations.

Tout d'abord, lorsqu'une vitesse lente est utilisée en combinaison avec une fréquence élevée, on observe des irrégularités au niveau de la surface, correspondant probablement à un phénomène de survibration (Figure 6).



Figure 6 – Irrégularités de surface observées lorsqu'une vitesse lente est utilisée en combinaison avec une fréquence de vibration élevée

Ensuite, lorsqu'une vitesse rapide est combinée avec une fréquence faible de vibration, on observe des problèmes au niveau de la finition de surface, qui semble se «déchirer» (Figure 7).

Lorsque la vitesse est rapide, plusieurs minutes - ou plusieurs dizaines de minutes - après application de la finition de surface (brossage + produit de cure), on observe également l'apparition beaucoup plus fréquente en surface de petits cratères, par lesquels remontent de l'eau et des bulles d'air. Ces derniers correspondent probablement à du ressuage (la gravité tend à expulser vers la surface l'air et l'eau encore présents dans le béton, plus légers

que les particules solides, qui trouvent des canaux de circulation préférentiels dans des zones moins consolidées). L'effet semble plus marqué avec une fréquence de vibration élevée, en particulier sur la moitié de la section présentant des aiguilles presque horizontales (Figure 8 et Tableau 1).



Figure 7 – «Déchirements» de la surface observés lorsqu'une vitesse rapide est combinée avec une fréquence faible de vibration



Figure 8 – Cratère de ressuage apparaissant à la surface du revêtement, principalement lorsqu'une vitesse rapide est utilisée

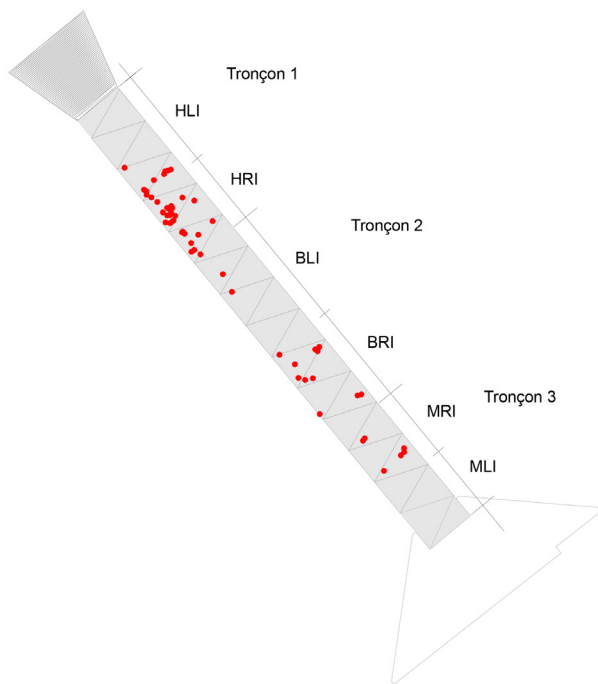


Figure 9 – Position des cratères de ressuage sur la première partie de la première planche d'essais

Section	Notation	Fréquence	Vitesse	Cratères
1a	HLI	Haute	Lente	-
1b	HRI	Haute	Rapide	++
2a	BLI	Basse	Lente	-
2b	BRI	Basse	Rapide	+
3a	MRI	Moyenne	Rapide	+
3b	MLI	Moyenne	Lente	--

Tableau 1 – Fréquence des cratères en fonction des paramètres de mise en œuvre

À la fin de la section, nous avons observé la présence de pâte de ciment en grande quantité à la surface du béton (Figure 10). Cette pâte de ciment provient d'une accumulation à l'avant de la machine. L'impact de cette pâte de ciment en surface sur le revêtement dépendra de la distance sur laquelle la partie finale du béton sera enlevée avant ou après durcissement. Dans le cas de la planche d'essais, nous avons constaté que le surplus de pâte de ciment en surface, même après enlèvement des derniers mètres placés, atteint plus de 10 cm à l'extrémité de la section et est déjà observable à une distance de 2,5 m de l'extrémité, où la pâte de ciment présente encore une épaisseur de 1 cm.

Ce surplus de pâte de ciment, dont la porosité est importante, peut potentiellement augmenter l'absorption d'eau de la surface, et réduire sa résistance en compression. Il est donc important de veiller à retirer l'extrémité du revêtement en béton sur une distance suffisante à la fin de la mise en œuvre.

Si des carottes doivent être prélevées sur le revêtement, il vaut mieux le faire à une distance d'au moins 2 à 3 m de son extrémité. En effet, des carottes prélevées trop près de l'extrémité, ou a fortiori dans la zone qui doit être retirée, peuvent générer des résultats qui ne sont absolument pas représentatifs de l'ensemble du revêtement.



Figure 10 – Accumulation de pâte de ciment à la surface dans la zone finale de la section

Des essais de compression à 28 jours ont été réalisés sur des carottes prélevées sur la planche d'essais. Chaque carotte a été sciée en trois éprouvettes de 10 cm de hauteur. La Figure 11 permet de comparer les résistances en compression mesurées à la base, au milieu et au sommet du revêtement.

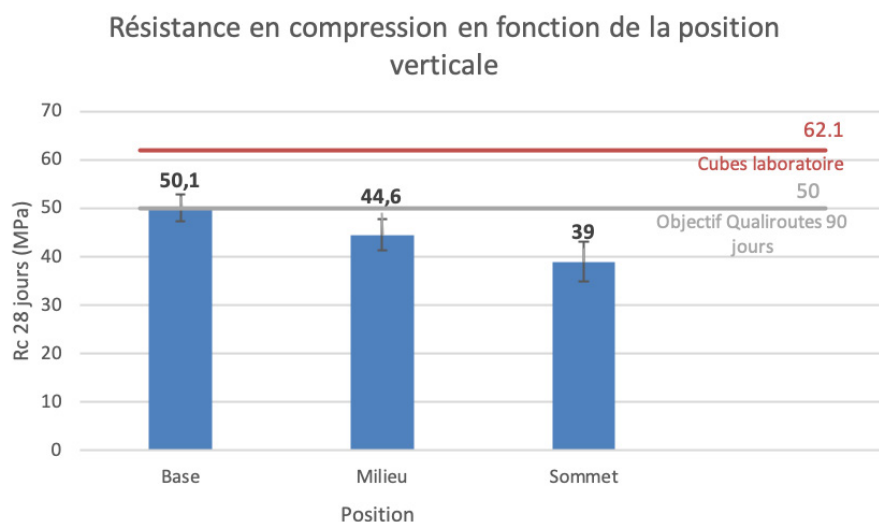


Figure 11 – Les résistance en compression à 28 jours des carottes prélevées sur la planche d'essais dépendent fortement de leur position verticale et sont largement inférieures à celles des cubes fabriqués sur chantier et conservés en laboratoire.

On constate une influence assez claire de la position de l'éprouvette, qui présente une résistance en compression 20 % plus faible au sommet qu'à la base du revêtement. Cette différence peut probablement être expliquée par une certaine ségrégation du matériau au cours de la mise en œuvre. Un autre facteur d'influence pourrait être la température du revêtement, qui est dans ce cas plus froide en surface qu'en profondeur. Les températures très faibles observées sur chantier pendant les 20 jours entre la mise en œuvre et le prélèvement des carottes peuvent vraisemblablement expliquer également la valeur absolue assez faible des résistances en compression. En effet, si la résistance exigée par le CCT Qualiroutes (limite individuelle sur carotte de 50 MPa pour un revêtement du Réseau I avec entraîneur d'air) sera probablement atteinte à 90 jours, on observe que les valeurs sont largement inférieures à la résistance en compression moyenne mesurée sur des cubes de béton confectionnés lors de la mise en œuvre, et conservés à 20 °C, qui s'élève à 62 MPa à 28 jours.

Ces résultats devront être confirmés par les essais de compression réalisés à 90 jours ainsi que par les essais d'absorption d'eau et de gel-dégel. Une analyse détaillée du réseau de bulles d'air sera également réalisée sur des éprouvettes de béton durci.

Ces nouvelles analyses, ainsi que les résultats des sections pilotes ultérieures, seront l'objet d'autres publications dans notre Newsletter. Il est également prévu de rédiger dans le cadre du projet des recommandations relatives à la vibration des revêtements en béton de grande épaisseur.

Conclusions provisoires

Les revêtements monocouches épais en béton constituent une bonne solution aux défis actuels de mobilité. Néanmoins, leur mise en œuvre est parfois délicate et leur impact écologique (en équivalent CO₂ et ressources naturelles) reste important. Le projet Monocrete, qui se poursuivra jusqu'en mars 2024, vise à optimiser les paramètres de mise en œuvre, tout en allégeant l'impact environnemental grâce à l'incorporation de matériaux issus de l'économie circulaire.

Sachant que l'industrie de la construction consomme près de 40 % des ressources naturelles exploitées dans le monde et produit des pourcentages semblables de déchets, ce projet contribue à économiser les ressources, à valoriser les déchets et à réduire le transport en favorisant une utilisation locale des produits recyclés.



Audrey Van der Wielen

E a.vanderwielen@brrc.be

T +32 2 766 03 87

Thomas Van Hoya (Eloy Béton)

E t.vanhoya@eloybeton.be

T +32 491 36 78 27

Julien Hubert (ULiège)

E julien.hubert@uliege.be

T +32 4 366 92 24

Bibliographie

- Banfill, P. F. G., Teixeira, M., & Craik, R. (2011). Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation. *Cement and Concrete Research*, 41(9), 932–941. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.011>
- Bureau de Normalisation. (2012). *Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Partie 2: Adjuvants pour bétons: Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage* (NBN EN 934-2+A1). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-934-2-a1-2012_14404/
- Cable, J. K., McDaniel, L., Schlorholtz, S., Redmond, D., & Rabe, K. (2000). *Evaluation of vibrator performance vs. concrete consolidation and air void system* (PCA R&D Serial No. 2398). Portland Concrete Association.
- Groupe Belge du Béton. (2018) [Manuel] *technologie du béton*. <https://www.gbb-bbg.be/publications/manuel-technologie-du-beton/>
- Ling, Y., & Taylor, P. (2021). Effect of controlled vibration dynamics on concrete mixtures. *ACI Materials Journal*, 118(5), 161–172. <https://doi.org/10.14359/51732981>

Powers, T. C. (1949). The air requirement of frost-resistant concrete. Chicago: Portland Cement Association. *Research and Development Laboratories, Development Department. Bulletin, 33.*

Stark, D. C. (1986). *Effect of vibration on the air-void system and freeze-thaw durability of concrete* (Research and Development Bulletin No. RD092.01T). Portland Concrete Association.

Tymkowicz, S., & Steffels, R. (1999a). *Vibration study for consolidation of portland cement concrete: Final report for MLR-95-4*. Iowa Department of Transportation (Iowa DOT).