



Nouveaux Matériaux pour structures routières «Vertes» et durables – Les revêtements semi-durs

Introduction

Dans le contexte d'une meilleure gestion des eaux (prévention des inondations, préservation des nappes aquifères, décharge du réseau d'égouttage, etc.), les structures perméables sont privilégiées pour des structures à faible trafic telles que les sentiers pédestres, les pistes cyclables, les places etc. (Gendera, 2017). Dans le même contexte, davantage d'espaces verts sont créés dans les agglomérations, avec notamment la mise en place de plantations et d'arbres (11 onthardingsprojecten, 2023).

Dans le cadre du projet de recherche prénormatif NoMaVert (Grégoire et al., 2021), nous nous sommes intéressés à deux types de matériaux utilisés pour répondre à ces besoins: les revêtements «semi-durs» constitués de mélanges granulaires traités avec des liants naturels et les mélanges terre-pierres composés d'un mélange de granulats et de terre.

Au cours de cette recherche, nous avons étudié les performances de ces matériaux en laboratoire et sur site avec pour objectif d'établir des prescriptions et recommandations dans les cahiers des charges types belges et éventuellement dans les normes européennes futures.

Cet article présente les résultats principaux de la recherche relatifs aux **revêtements semi-durs avec les conclusions principales comprenant des propositions de spécifications pour obtenir un revêtement durable**. Les premiers résultats avaient déjà été partiellement publiés (Grégoire et al., 2021, 2022).

Sélection des matériaux

Six matériaux (M) ont été caractérisés en laboratoire. Ils proviennent de quatre fournisseurs (F) différents. Nous les mentionnons comme:

- F_1 : le liant est un biopolymère d'origine végétale.
- F_2 - M_1 : le liant est minéral, mais n'est pas à base de ciment.
- F_2 - M_2 : le mélange n'est pas lié, mais fréquemment utilisé en Belgique.
- F_3 - M_1 et F_3 - M_2 : le liant est d'origine végétale.
- F_4 : le mélange n'est pas lié, mais est utilisé en Belgique.

Les granulats des mélanges F_1 et F_3 ont été livrés séparément. Les essais effectués sur F_4 sont plus limités car ce matériau n'a été considéré qu'en fin de recherche.

Essais de laboratoire

Caractérisation des mélanges et/ou des granulats

La caractérisation des mélanges et/ou des granulats a été discutée dans (Grégoire et al., 2021, 2022).

Indices de portance Californien différés des mélanges

Les différents matériaux (F_1 , F_2 - M_1 , F_2 - M_2 , F_3 - M_1 et F_3 - M_2) ont été compactés à la densité optimale déterminée par l'essai Proctor modifié (OPM) (Bureau de Normalisation [NBN], 2005). Les mélanges de F_1 et F_2 ont été préparés à la teneur en eau optimale. Les mélanges de F_3 ont été testés à la teneur en eau de réception.

Des mesures de l'indice de portance Californien (Indice CBR) (NBN, 2021) ont été réalisées directement après compactage, après 3, 7 et 28 jours de conservation en chambre climatique (60 % humidité relative (HR) et 20 °C, dans le moule de compactage et avec la surface supérieure non protégée), après quatre jours en immersion directement après le compactage et après une cure de sept jours en chambre climatique (mêmes conditions que ci-dessus) suivie de quatre jours d'immersion.

L'objectif de ces mesures est d'évaluer la portance immédiate, le durcissement éventuel du matériau et sa résistance à l'immersion (période d'averses in situ).

Les résultats sont repris à la figure 1. Pour une application piétonne ou en piste cyclable, un CBR de 100 % est recommandé. Directement après le compactage, tous les mélanges, à l'exception de F_3 - M_1 , atteignent une valeur élevée de CBR (> 150 %). Pour trois mélanges, une augmentation de la portance est observée après trois jours. Un durcissement important du mélange F_1 est observé après 28 jours. Les portances après immersion diminuent légèrement pour F_1 et F_3 - M_2 et de manière plus marquée pour le mélange F_2 , mais restent néanmoins suffisantes. En ce qui concerne le mélange F_3 - M_1 , les valeurs de portance sont faibles, probablement en raison d'une teneur en eau trop élevée.

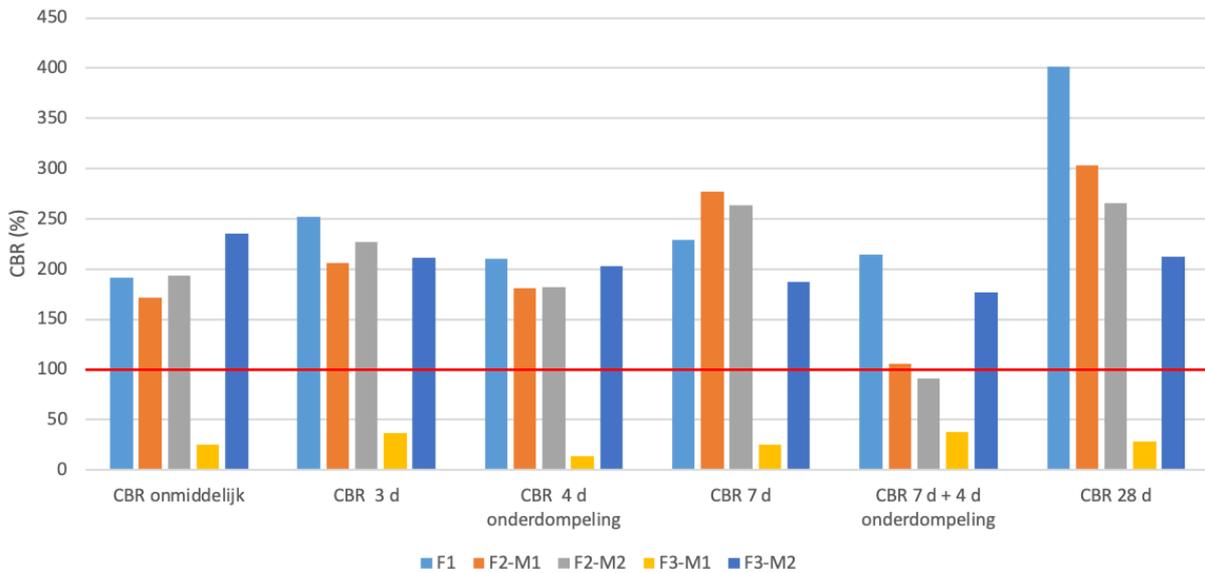


Figure 1 – Résultats des indices de portance Californien pour les mélanges de revêtements semi-durs testés (OPM)- (Grégoire et al., 2022)

Pour plusieurs matériaux, les indices CBR ont été mesurés sur des éprouvettes compactées à l'énergie Proctor normal (OPN = énergie de compaction moindre, qui correspond ici à environ 95 % OPM). Même si l'on observe une diminution des CBR en compactant à l'énergie Proctor normal, ceux-ci restent élevés. Les valeurs obtenues pour F₄ sont du même ordre de grandeur que celles du mélange F₃-M₂. Il est surprenant de constater une augmentation de CBR pour F₄ après 7 ou 28 jours de conservation alors que le mélange n'est pas lié. Une baisse du CBR après l'immersion est observée pour F₄ et F₂-M₁. Il n'a pas été mesuré pour les deux autres mélanges.

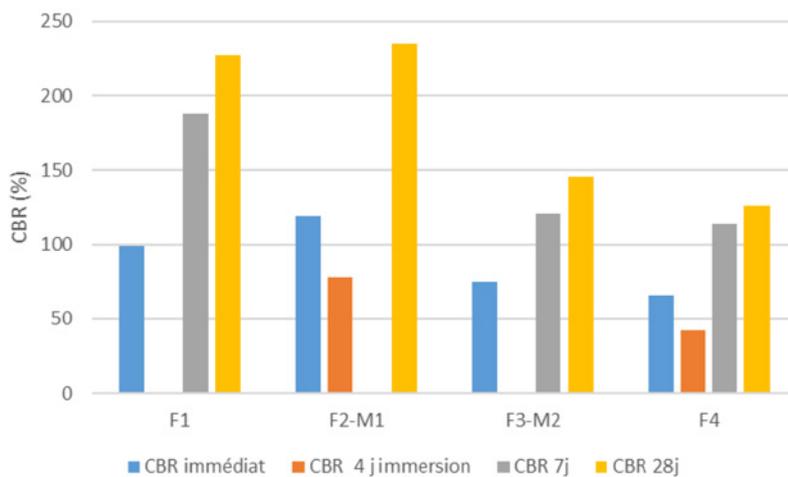


Figure 2 – Résultats des indices de portance Californien pour les mélanges de revêtements semi-durs testés (OPN)

Cycles secs-humides

L'objectif de ces essais a consisté à vérifier le maintien de la portance des matériaux étudiés (compactés à l'énergie Proctor Normal) après une alternance de périodes sèches et humides de

24 heures. Cette succession de cycles a été simulée en laboratoire après une période de cure de 14 jours à 20 °C et 60 % humidité relative, correspondant à une mise en œuvre dans des conditions climatiques adéquates pour « la prise » des mélanges, suivie par une période d'immersion durant 4 jours. Au terme des 10 cycles, correspondant à 28 jours après le compactage, l'indice CBR a été mesuré sur les matériaux F_1 et F_3-M_2 (voir tableau 1).

Par la suite et pour les quatre matériaux F_1 , F_3-M_2 , F_3-M_2 et F_4 , un cycle en conditions sèches a été ajouté avant la mesure de l'indice CBR. L'indice CBR est alors mesuré après 29 jours. Le fait de terminer par un cycle en conditions sèches n'a pas impacté significativement l'indice CBR (par manque de temps, les CBR à 28 j après dix cycles secs-humides n'ont pas été mesurés sur les matériaux F_2-M_1 et F_4).

	CBR 28 j après cycles secs-humides (OPN)	CBR 29 j après cycles secs-humides (OPN)	CBR 28 j (OPN)	Ratio (CBR après cycles/ CBR 28 j)
F_1	129 +/- 13,9 w=10 %	105 +/- 5,2 w=11,45 %	227 +/- 3,4 w=11,13 %	0,57/0,46
F_3-M_2	97 +/- 15,3 w=8,7 %	85 +/- 4,1 w=7,75 %	146 +/- 13,3 w=8,28 %	0,65/0,34
F_2-M_1	Pas mesuré	79 +/- 6,7 w=6,1 %	235 +/- 13,0 w=5,5 %	0,34
F_4	Pas mesuré	30 +/- 5,5 w=6,08 %	126 +/- 2,2 w=6,11 %	0,23

- Compactage OPN
- 14 jours en chambre climatique à 20 °C et 60 % HR
- 4 jours en immersion
- Alternance de 10 (ou 11) cycles de 24 h en chambre climatique en alternance conditions sèches/conditions humides
- Mesure du CBR 28 (ou 29) jours après compactage

Tableau 1 – Indices CBR mesurés après les cycles secs-humides pour revêtements semi-durs – comparaison avec des valeurs après une cure en chambre climatique (20 °C – 60 % HR).

Pour F_1 , F_3-M_2 et F_2-M_1 , une diminution du CBR est observée mais les valeurs restent élevées. Ces matériaux résisteraient bien aux périodes de pluie. Pour F_4 , on observe une forte diminution du CBR après l'alternance de cycles en conditions sèches et humides.

Résistance au gel-dégel

La résistance au gel-dégel est étudiée sur la base de la méthode de la CEN/TS 13286-54 (Comité Européen de Normalisation [CEN], 2014). Pour ces essais, trois séries de trois éprouvettes ont été préparées (densité 100 % OPN, W_{OPM}). Pour les trois séries, les éprouvettes sont conservées 14 jours en chambre climatique (20 °C, 60 % HR, face supérieure non protégée) et 2 jours en immersion. Après cette première cure, on distingue:

- Série 1: 10 cycles gel-dégel + 2 jours en chambre climatique (20 °C, 60 % HR, face supérieure non protégée) – CBR testé à 28 jours.
- Série 2: 12 jours en chambre climatique (20 °C, 60 % HR, face supérieure non protégée) – CBR testé à 28 jours.
- Série 3: CBR testé à 16 jours (directement après la première cure).

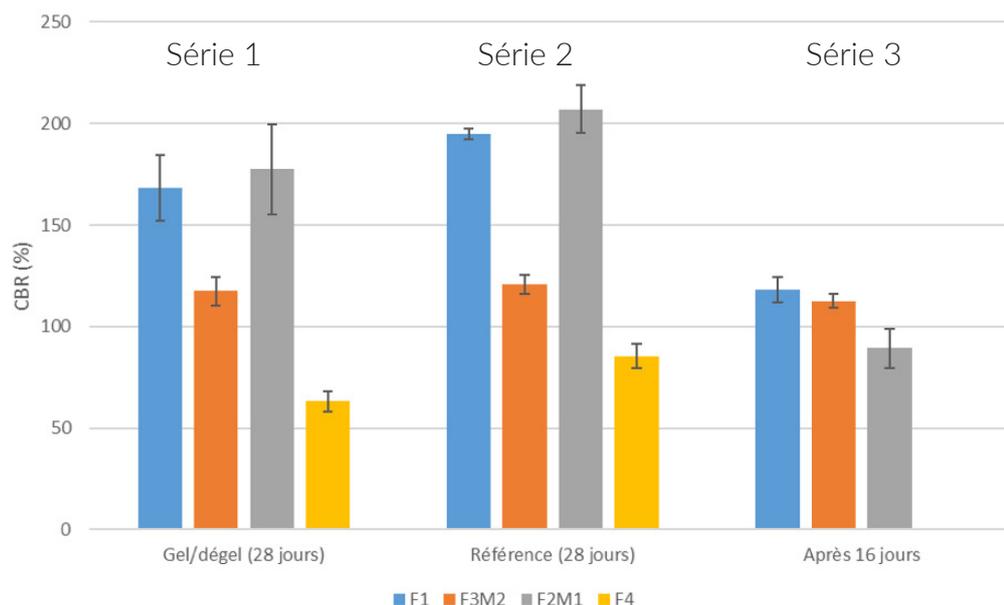


Figure 3 – Résultats pour indices CBR (%) après des essais gel-dégel suivant CEN/TS 13286-54 (CEN, 2014)

Les indices CBR mesurés après les cycles gel-dégel (série 1) restent élevés pour les mélanges testés. Les ratios des $CBR_{série1}/CBR_{série2}$ sont 97 % pour F_3-M_2 et +/- 80 % pour trois autres matériaux testés. Les indices CBR obtenus après les cycles gel-dégel sont aussi plus élevés que ceux obtenus après la première cure de 16 jours. C'est significatif pour les mélanges F_1 et F_2-M_1 , dont la prise se poursuit durant les cycles gel-dégel. Les matériaux testés ont donc montré une bonne résistance au gel.

Mesure de la perméabilité

La perméabilité de différents mélanges a été testée en laboratoire avec le dispositif en colonne développé par le CRR (Van der Wielen & Grégoire, 2018). Les premiers essais ont été réalisés sur une hauteur de matériau de 30 cm, compacté en six couches de 5 cm à la densité 100 % OPN. Les essais suivants ont été réalisés sur une hauteur de matériau de 10 cm, compacté en deux couches de 5 cm, à 100 et 90 % OPN.

Les perméabilités obtenues avec cette méthode sont reprises dans le tableau 2. Elles sont basses (ordre de 10^{-7} m/s) pour les mélanges compactés à l'OPN, à l'exception du mélange F_4 dont la perméabilité est de $1,25 \cdot 10^{-5}$ m/s. La perméabilité du mélange compacté à 90 % OPN est plus élevée mais diminue avec le nombre de mesures.

Matériau	Taux de compactage	Début mesure - nombre de jours après compactage	K (m/s)	Hauteur de matériau - (durée d'essai) - vol 5 l
F_1	100 % OPN	6 j	$2,79 \cdot 10^{-7}$	30 cm (3 j)
F_1	100 % OPN	28 j	$1,43 \cdot 10^{-7}$	30 cm (3 j)
F_3-M_2	100 % OPN	3 j	$4,15 \cdot 10^{-7}$	10 cm (3 j)
F_3-M_2	100 % OPN	6 j	$1,98 \cdot 10^{-7}$	10 cm (3 j)
F_3-M_2	100 % OPN	14 j	$2,30 \cdot 10^{-7}$	10 cm (3 j)
F_3-M_2	90 % OPN	3 j (1 ^{re} mesure)	$9,93 \cdot 10^{-5}$	10 cm (1 j)
F_3-M_2	90 % OPN	3 j (2 ^e mesure)	$1,21 \cdot 10^{-6}$	10 cm (3 j)
F_3-M_2	90 % OPN	14 j	$0,05 \cdot 10^{-6}$	10 cm (10 j)
F_4	100 % OPN	Immédiat	$12,5 \cdot 10^{-6}$	10 cm (1 j)

Tableau 2 – Mesures de perméabilité en laboratoire avec le dispositif en colonne

Essais in situ

Introduction

Plusieurs nouveaux chantiers ont été suivis durant le projet. Des mesures in situ ont été faites avec la plaque dynamique allemande (Kudla et al., 2018), le gammadensimètre (ASTM International, 2023) et le CBR dynamique (Schulze et al., 2008) pour contrôler le compactage et la portance des matériaux mis en place.

Le principe de l'essai CBR in situ consiste à laisser tomber un poinçon sur la surface testée et à mesurer l'enfoncement. Il est à noter que vu l'épaisseur réduite des revêtements testés, le module mesuré par la plaque dynamique est influencé par les couches sous-jacentes. Les essais à la plaque dynamique allemande et les CBR dynamiques ont été répétés ultérieurement afin de mettre en évidence un durcissement éventuel des mélanges.

Un échantillon des mélanges a aussi été prélevé sur chaque chantier afin de mesurer la teneur en eau, la densité sèche après compactage Proctor et l'indice de Portance CBR. Les résultats principaux des chantiers de Wavre, Meise et Tervuren sont présentés ci-dessous.

Chantier de Wavre

Le matériau F_3-M_2 a été mis en œuvre en octobre 2020 dans un quartier résidentiel à Wavre pour une application piétonne (figure 4). La structure est composée de 5 cm de revêtement semi-dur, une couche de lave de 1 cm, 4 cm de recyclés mixtes 4/20 et 20 cm de recyclés mixtes 20/56. Le même matériau avait déjà été mis en œuvre sur une autre partie du site en 2018.



Figure 4 – Chantier de mise en œuvre de revêtement semi-dur à Wavre (octobre 2020) ; (Grégoire et al., 2021, 2022)

Les résultats principaux sont repris dans le tableau 3. Les résultats des essais à la plaque dynamique (Evd) et CBR dynamiques sont représentés à la figure 5.

La valeur de l'indice CBR mesurée sur l'échantillon prélevé est cohérente avec la valeur mesurée sur le matériau livré pour l'étude de laboratoire. On observe une grande dispersion dans les modules Evd et les CBR dynamiques, avec des valeurs plus élevées pour le matériau placé en 2020. Pour chaque partie du site (2018 et 2020), une augmentation de la valeur moyenne des

modules dynamiques est observée. C'est moins significatif pour l'indice CBR. Il est à noter que les indices CBR in situ sont plus faibles que ceux mesurés en laboratoire.

CBR laboratoire - OPM (matériau livré au laboratoire)	235 % (w=6,85 %)
CBR laboratoire - OPN (matériau livré au laboratoire)	75 % (w=6,92 %)
CBR échantillon prélevé sur site - OPN	75 % (w=8,32 %)
Densité sèche OPN	2,034 g/cm ³
Teneur en eau sur site	8,32 %
Exécution octobre 2020	
EVD jour 0	36 MPa +/- 9,5
EVD jour 32	60 MPa +/- 5,5
EVD après 8 mois (juin 2021)	75 MPa +/- 12,2
EVD après 18 mois (avril 2022)	89 MPa +/- 12,1
CBR in situ après 8 mois (juin 2021)	62 % +/- 11,8
CBR in situ après 18 mois (avril 2022)	66 % +/- 19,4
Taux de compactage (jour de l'exécution)	99,9 % OPN
Exécution 2018	
EVD (juin 2021)	44 MPa +/- 13,9
EVD (avril 2022)	53 MPa +/- 13,9
CBR in situ (juin 2021)	55 % +/-10,6
CBR in situ (avril 2022)	56 % +/-14,7

Tableau 3 – Résultats principaux du chantier de Wavre

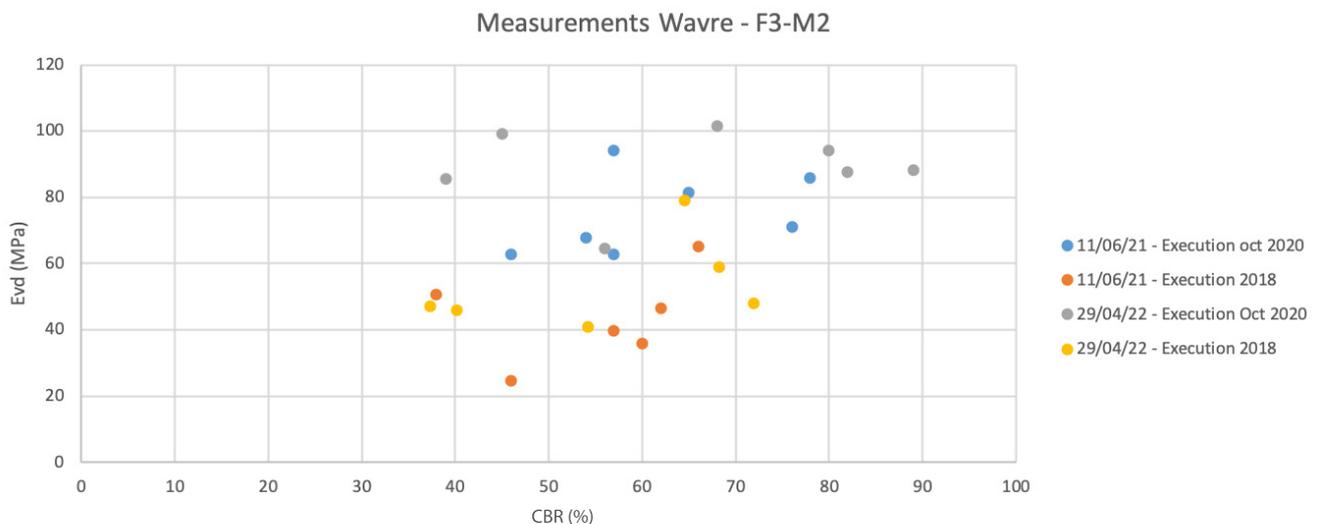


Figure 5 – Module dynamique en fonction du CBR dynamique (chantier de Wavre)

Chantier de Meise

Le matériau F₁ a été mis en œuvre la semaine du 21 juin 2021 sur le site des jardins botaniques de Meise (figure 6). Le matériau est compacté par une plaque vibrante et ensuite par un compacteur à rouleau. L'épaisseur est de 6 cm. Le même matériau avait été mis en œuvre sur un sentier du parc six semaines plus tôt.



Figure 6 – Compactage avec une plaque vibrante aux jardins botaniques de Meise



Figure 7 – Sentier à Meise, six semaines après la mise en œuvre

La figure 8 représente le CBR dynamique en fonction du module dynamique (Evd) mesurés sur le site, à différentes périodes. Une augmentation des deux paramètres avec le temps est observée. Le CBR tend à se stabiliser.

Le tableau 4 donne un résumé des mesures à Meise. Les indices CBR dynamiques mesurés sur site sont plus faibles que ceux mesurés en laboratoire. La différence peut être expliquée par la densité plus faible sur site mais aussi par la méthode d'essai (dynamique vs. statique).

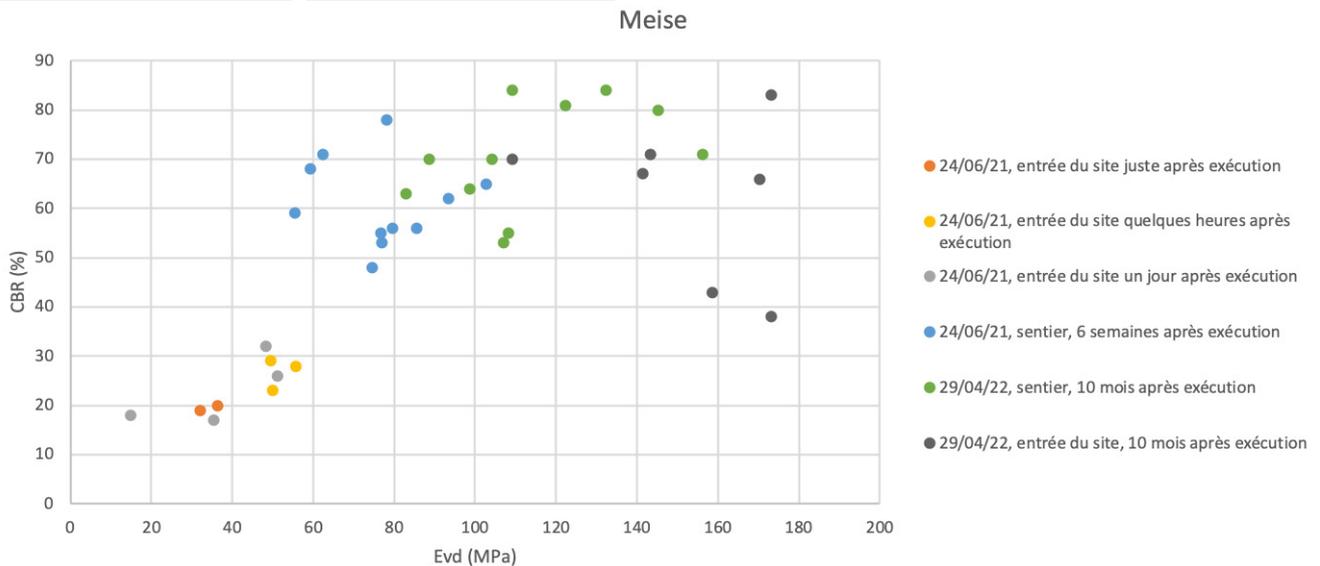


Figure 8 – CBR et modules dynamiques mesurés pour revêtements semi-durs à Meise

	F_1
CBR laboratoire - OPM (matériau livré au laboratoire)	191 %
CBR laboratoire - OPN (matériau livré au laboratoire)	99 %
CBR échantillon prélevé sur site - OPN	111 %
Densité sèche OPN	1,939 g/cm ³
Teneur en eau sur site	9,49 %
EVD jour 0 ou jour +1	42 MPa +/- 12,9
EVD sur partie mise en œuvre 6 sem. plus tôt	75 MPa +/- 14,2
EVD après 10-11 mois (tous)	137 MPa +/- 29,3
CBR in situ jour 0	24 % +/- 5,1
CBR in situ sur le sentier (6 semaines après mise en œuvre)	61 % +/- 8,8
CBR 10-11 mois (tous)	66 % +/- 6,9
Densité jour 0 ou jour+1	91,7 % OPN
Densité sur le sentier (6 semaines après mise en œuvre)	90,1 % OPN

Tableau 4 – Résumé des résultats obtenus sur le site de Meise

Chantier de Tervuren

Le matériau F₄ a été mis en œuvre en juillet 2022 à Tervuren pour une application piétonne ou cyclable (figure 9). Des mesures au gammadensimètre et à la plaque dynamique allemande ont été effectuées en une dizaine de points quelques jours après la mise en œuvre. Le taux de compactage moyen est de 97,8 % (en considérant une densité sèche optimale de 2,03 g/cm³). La valeur moyenne des modules dynamiques est de 82 MPa. Une inspection visuelle a été effectuée en juillet 2023 et le matériau ne présentait pas de défaut important.



Figure 9 – Chemin avec revêtement F₄ à Tervuren (juillet 2023, un an après la mise en œuvre)

Mesures de perméabilité

Des mesures ont été réalisées sur les quatre sites (les trois sites présentés ci-dessus et Linkebeek), avec l'essai double anneau du CRR (SB 250 version 4.1a, H14, §4.19), voir figure 10. Sur le site de Linkebeek, deux mesures de l'ordre de 10⁻⁴ m/s ont été établies. A Wavre, aucune mesure n'a été possible (perméabilité insuffisante), ni sur la partie de 2020, ni sur la partie de 2018. A Meise, aucune mesure n'a été possible sur la partie mise en œuvre en 2021. Une seule mesure a été établie dans une zone mise en œuvre quelques années auparavant. A Tervuren, deux essais ont été effectués, sans mesure possible (contrairement à ce qui avait été observé en laboratoire). Cela pourrait s'expliquer par l'imperméabilité du matériau sous-jacent.

Ces mesures, combinées à celles réalisées sur des sites existants (Grégoire et al., 2021), n'ont pas pu mettre en évidence le caractère perméable de ces matériaux.



Figure 10 – Mesures de perméabilité avec l'essai double anneau du CRR sur le site de Wavre.

Conclusion

Les revêtements semi-durs étudiés dans la recherche NoMaVert montrent de bonnes performances en laboratoire (portance, résistance aux cycles d'immersions, résistance aux cycles gel-dégel). Néanmoins, le caractère perméable n'a pas été mis en évidence sur les matériaux liés.

Seul le matériau F₄ non lié a montré une bonne perméabilité en laboratoire mais résiste moins bien aux cycles d'immersion. Ce matériau présente néanmoins un certain durcissement après le compactage, une portance à 28 jours élevée et un bon comportement au gel.

Les mesures sur chantier ont montré:

- une grande disparité dans les CBR in situ et les modules dynamiques (Evd), avec une tendance à augmenter dans le temps suivi d'une stabilisation pour le CBR;
- que le taux de compactage varie entre 90 et 99 % OPN;
- qu'il n'y avait pas de dégâts sur les chantiers (à l'exception de ravinement sur le chantier 2018 à Wavre sur la pente) – ceci reste à confirmer par d'autres suivis dans le temps;
- que les mesures de perméabilité à l'essai double anneau ne sont pas concluantes.

Ce type de revêtement convient pour une application piétonne ou cyclable.

Pour les nouveaux produits, **une pré-étude en laboratoire est recommandée**. Nous préconisons les spécifications suivantes **pour les matériaux liés**:

- CBR immédiat à l'OPN ≥ 75 %;
- CBR à 28 jours à l'OPN ≥ 125 %;
- CBR 7j + 4 j immersion ≥ 100 %;
- Ratio [CBR après cycles en conditions sèches et humides / CBR28j] $\geq 0,5$ ou CBR après cycles en conditions sèches et humides minimum 100 % (avec une période de cure 14 jours à 20 °C et 4 jours immersion avant les cycles);
- Ratio [CBR après cycles gel-dégel / CBR 28j] $\geq 0,80$ ou CBR après cycles gel-dégel minimum 100 % (*cure 14 jours à 20 °C et 2 jours immersion avant les cycles).

Sur site, nous recommandons un **contrôle** de la densité (95 % OPN minimum) au gammadensimètre et a posteriori un contrôle avec la plaque dynamique allemande (valeur de minimum 60 MPa à atteindre à 90 jours). Cela implique que l'on a obtenu un module dynamique de minimum 60 MPa sur la fondation avant la mise en œuvre du revêtement semi-dur.

NB: Evd ≥ 60 MPa et M₁ ≥ 80 MPa sont les exigences du SB 250 (Vlaamse Overheid, AWV, 2021) pour les fondations en empièchement de voies piétonnes ou voies cyclables. Bien qu'il n'y ait pas de critère en Evd pour les fondations drainantes, le critère M₁ ≥ 80 MPa pourrait correspondre par analogie à un Evd ≥ 60 MPa.

Remerciements

Le CRR remercie le SPF Economie et le NBN pour le financement du projet, ainsi que les producteurs pour les échanges, la fourniture des matériaux étudiés et l'accès aux sites de mise en œuvre.



Colette Grégoire

E c.gregoire@brrc.be

T 02 766 03 19



Elia Boonen

E e.boonen@brrc.be

T 02 766 03 41



Frank Theys

E fr.theys@brrc.be

T 02 766 03 20

Bibliographie

11 onthardingsprojecten krijgen financieel duwtje van Aquafin. (2023). *Aquafin*. <https://www.aquafin.be/nl-be/gemeenten-en-steden/hemelwater/11-onthardingsprojecten-krijgen-financieel-duwtje-van-aquafin>

ASTM International. (2023). Standard test methods for in-place density and water content of soil and soil-aggregate by nuclear methods (shallow depth) (ASTM D6938-23). <https://www.astm.org/d6938-23.html>

Bureau de Normalisation (NBN). (2005). *Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques. Partie 50: Méthode de confection par compactage avec un appareillage Proctor ou une table vibrante des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques* (NBN EN 13286-50). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=203888&p40_language_code=fr&p40_detail_id=29630&session=4662998503161

Bureau de Normalisation (NBN). (2021). *Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques. Partie 47: Méthodes d'essai pour la détermination de l'indice portant californien (CBR), de l'indice portant immédiat (IPI) et du gonflement linéaire* (NBN EN 13286-47). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=205542&p40_language_code=fr&p40_detail_id=123054&session=4662998503161

Comité Européen de Normalisation (CEN). (2014). *Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques. Partie 54: Méthode d'essai pour la détermination de la sensibilité au gel: Résistance au gel et au dégel des mélanges traités aux liants hydrauliques* (CEN/TS 13286-54). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=210571&p40_language_code=fr&p40_detail_id=74414&session=4662998503161

- Gendera, F. (2017, octobre 4-6). *Waterdoorlatende bestratingen: Een ecologische en duurzame verharding binnen het integraal waterbeleid* [Présentation]. In 23ème congrès belge de la route, Bruxelles. Association Belge de la Route (ABR).
- Grégoire, C., Boonen, E. & Theys, F. (2021). Nouveaux matériaux pour structures routières « vertes » et durables: Premiers résultats de la recherche. *Newsletter CRR*, (02). <https://brrc.be/fr/expertise/expertise-apercu/nouveaux-materiaux-structures-routieres-vertes-durables-premiers>
- Grégoire, C., Boonen, E. & Theys, F. (2022). Structures routières vertes et durables: Premiers résultats sur les revêtements semi-durs. *Revue générale de la route et de l'aménagement* (RGRA), (987), 22-27.
- Kudla, W., Bumiller, B., Cejka, A., Deutler, T., Diehl, U., Franzen, K.-H., Jansen, D., Kliesch, K., Kloubert, H.-J., Kratzer, B., Lammen, H., Lange, W., Neuhaus, M., Nickol, R., Paulsen, A., Schlögl, F., von Soos, P., Straussberger, D. & Weingart, W. (2018). Technical testing regulations for soil and rock in road construction: TP BF-StB. Part B 8.3: Dynamic plate load testing with the light drop-weight tester (FGSV R1 No. 591/B 8.3 E, traduction de l'édition allemande 2012). Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV). https://www.fgsv-verlag.de/pub/media/pdf/591_B_8_3_E.v.pdf
- Schulze, C., Aubrecht, W., Böhm, S., Chakar, L., Dinkgraeve, D., Ehlert, S., Eicher, J., Freiberg, N., Geipel, H., Golkowski, G., Haas, S., Janssen, S., Jumpertz, M., Martick, S., Meyer, G., Nguyen, U., Platzek, W., Rohrig, S., Röthlisberger, F.,... Zimmermann, M. (2008, mise à jour 2023). *Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Strassenbau: TP Gestein-StB* (FGSV R1 No. 610). Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV). <https://www.fgsv-verlag.de/tp-gestein-stb>
- Van der Wielen, A. & Grégoire, C. (2018). Le CRR étudie les empièvements de sous-fondation. *Bulletin CRR*, (114), 21-24. <https://brrc.be/sites/default/files/2019-10/bulletin114.pdf>
- Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer (AWV). (2021). *Standaardbestek 250 voor de wegenbouw* (version 4.1a). https://wegenenverkeer.be/zakelijk/documenten?search_api_fulltext_1=%22standaardbestek%20250%20versie%204.1a%22&documents%5B0%5D=type_document%3Astandaardbestek