



Nouveaux Matériaux pour des structures routières «Vertes» et durables – Résultats des mélanges terre-pierres

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 (AquaFin & Voetgangsbeweging, 2022).

Dans le cadre du projet de recherche prénormatif NoMaVert (CCN/NBN/PN 19A01 et PN 19B01), 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. Le premier matériau est utilisé comme revêtement routier pour trafic léger (pistes cyclables, trottoirs, places, etc.) (Steppe & Verhanneman, 2017). Le second matériau est utilisé comme fondation ou sous-fondation pour des revêtements autour d'arbres et/ou avec des revêtements tels que des dalles-gazon en béton ou des pavages avec joints «verts». Le squelette granulaire donne une stabilité au mélange et la composante meuble constitue une base pour la croissance des racines d'arbres (réserve de nutriments, capacité de rétention d'eau et milieu adapté pour le développement des racines).

Au cours de cette recherche, nous avons étudié les performances de ces matériaux tant au niveau du laboratoire que 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 de la recherche relatifs aux mélanges terre-pierres. Les résultats des revêtements semi-durs ont déjà été partiellement publiés, ainsi que les premiers résultats des mélanges terre-pierres (Grégoire et al., 2021).

Essais de perméabilité

Pour ces essais en laboratoire, quatre mélanges terre-pierres ont été étudiés:

- B1: à base de granulat d'origine volcanique et de terre (16/32);
- B2: à base de moellons recyclés, d'argile, de matière organique et d'additifs (16/32);
- B3: à base de lave, d'argile cuite, de terre arable et de matière organique (0/40);
- B4: à base de lave et d'argile (0/32).

La perméabilité des mélanges terre-pierres a été mesurée à l'aide d'un essai en colonne (Figure 1). Un géotextile supplémentaire a été placé entre le matériau testé et le sable drainant pour éviter la contamination du sable. Le matériau a été compacté en six couches jusqu'à obtention de la densité souhaitée (97 % OPM, à teneur en eau = W_{OPM}) sur une hauteur de 30 cm. Le principe de l'essai est expliqué dans le Bulletin CRR n°114 (Van der Wielen & Grégoire, 2018). Il s'agit d'un essai à charge variable, réalisé avec 5 ou 10 litres d'eau selon la perméabilité du matériau. L'essai est scindé en deux phases: une mesure sur le matériau non saturé et une mesure (ou plus) sur le matériau saturé. Les résultats sont illustrés dans le Tableau 1 et à la Figure 2.



Figure 1 – Principe de l'essai en colonne pour déterminer la perméabilité (Van der Wielen & Grégoire, 2018)

Pour trois des quatre matériaux testés, l'essai saturé a été répété une seconde fois. Pour l'échantillon B4, l'essai a duré plusieurs jours et n'a donc été répété qu'une seule fois. C'est le matériau qui contient le plus de particules fines ($< 63 \mu\text{m}$).

La perméabilité du mélange terre-pierres B1 est plus élevée que celle des autres matériaux, ce qui s'explique par sa granulométrie. Une variation de la perméabilité est observée entre les différents essais. À première vue, le géotextile ne semblait pas obstrué. Lors du démontage du dispositif, il était difficile d'observer une quelconque migration vers le bas des particules fines. La diminution de la perméabilité est donc difficile à expliquer.

La perméabilité des matériaux testés est relativement faible.

	B1	B2	B3	B4
	16/32	16/32	0/40	0/32
Non saturé	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$5,77 \cdot 10^{-5}$	$6,90 \cdot 10^{-5}$	$2,01 \cdot 10^{-6}$
Saturé	$1,70 \cdot 10^{-5}$	$6,73 \cdot 10^{-6}$	$8,36 \cdot 10^{-6}$	$2,25 \cdot 10^{-7}$
Saturé (2 ^e fois)	$6,11 \cdot 10^{-6}$	$3,62 \cdot 10^{-6}$	$4,83 \cdot 10^{-6}$	
Quantité d'eau	10 l	10 l	5 l	5 l
Durée de l'essai	< 12 h	< 12 h	< 12 h	3 j

Tableau 1 – Mesures de perméabilité à l'eau sur des mélanges terre-pierres (K [m/s])

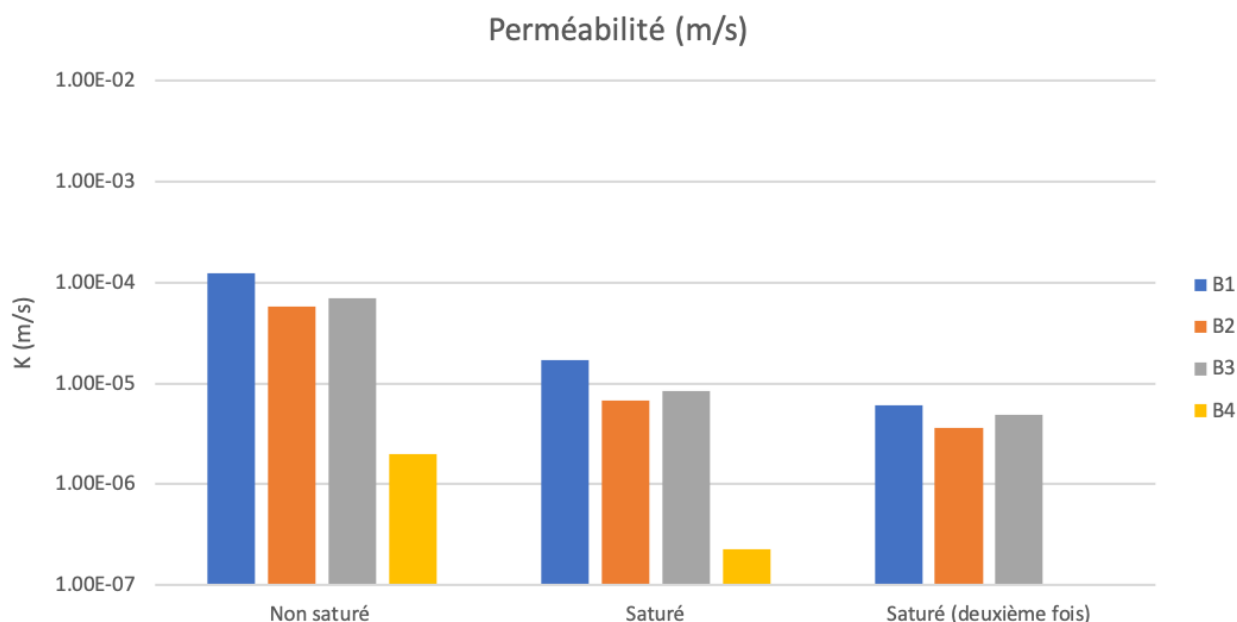


Figure 2 – Résultats de la perméabilité mesurée avec l'essai en colonne

Mesures de capacité de rétention d'eau

Des essais de mesure de capacité de rétention d'eau ont été réalisés dans un bac de 1 m³ avec évacuation d'eau, fabriqué dans le cadre de ce projet de recherche.



Figure 3 – Bac pour les essais de capacité de rétention d'eau

Les mélanges étudiés sont les suivants:

- B3bis
- B5
- B6 (0/32, composé de lave basaltique et de matières premières disponibles dans la région)
- B4bis
- B2bis
- B1bis
- B7 (0/16, composé de lave, de roches volcaniques et de plusieurs types d'argile)

Certains matériaux ont été livrés à différents moments (suffixe BIS). Il a été constaté que les caractéristiques ne sont pas nécessairement constantes entre les différents lots d'un même matériau.

Des essais Proctor ont été effectués sur les matériaux à leur réception afin de définir les densités de référence.

- Les objectifs des essais à réaliser sont les suivants:
- compacter les mélanges terre-pierres par couches avec différents taux de compactage;
- déterminer le taux de compactage réalisable (et la densité sèche);
- déterminer la portance par un essai à la plaque dynamique;
- déterminer le volume de pores/vides «rapidement» disponible pour le stockage de l'eau, sans nécessairement inclure tous les pores des grains du squelette.

Pour le premier matériau testé (B3bis), les premières séries de compactage ont été effectuées avec une plaque vibrante et un marteau vibrant de 70 kg afin d'obtenir un taux de compactage élevé (par rapport à l'optimum Proctor modifié). Comme il s'est avéré difficile de contrôler ce lourd marteau vibrant dans l'espace restreint du bac et que les granulats se sont brisés, un compactage a été effectué a posteriori avec un marteau plus léger (30 kg, Figure 4).



Figure 4 – Compactage des mélanges terre-pierres (marteau vibrant de 30 kg)

Pour les deux premiers matériaux testés, trois bacs ont été remplis pour obtenir différents degrés de compactage. Pour le premier matériau testé, différentes épaisseurs de couche ont été utilisées pour obtenir le compactage souhaité (25 cm sur les deux premiers bacs et 15 cm sur le troisième bac). Pour les matériaux suivants, l'épaisseur a été maintenue par défaut à 20 cm.

Il s'est avéré impossible de compacter ces matériaux à 98 % de l'Optimum Proctor Modifié, comme l'exige le SB 250, sans rompre complètement les grains. Il faut plutôt viser un compactage d'**environ 95-97 % de l'Optimum Proctor Normal**.

Les essais ont été réalisés comme suit (Figures 5 à 8):

- remplir le bac d'eau jusqu'à saturation du matériau (le niveau d'eau atteint le haut du matériau);
- évacuer l'eau et mesurer la quantité d'eau récupérée en fonction du temps;
- remplir à nouveau le bac jusqu'à ce que le niveau d'eau atteigne le haut du matériau;
- laisser l'eau s'écouler et mesurer la quantité d'eau écoulée en fonction du temps.

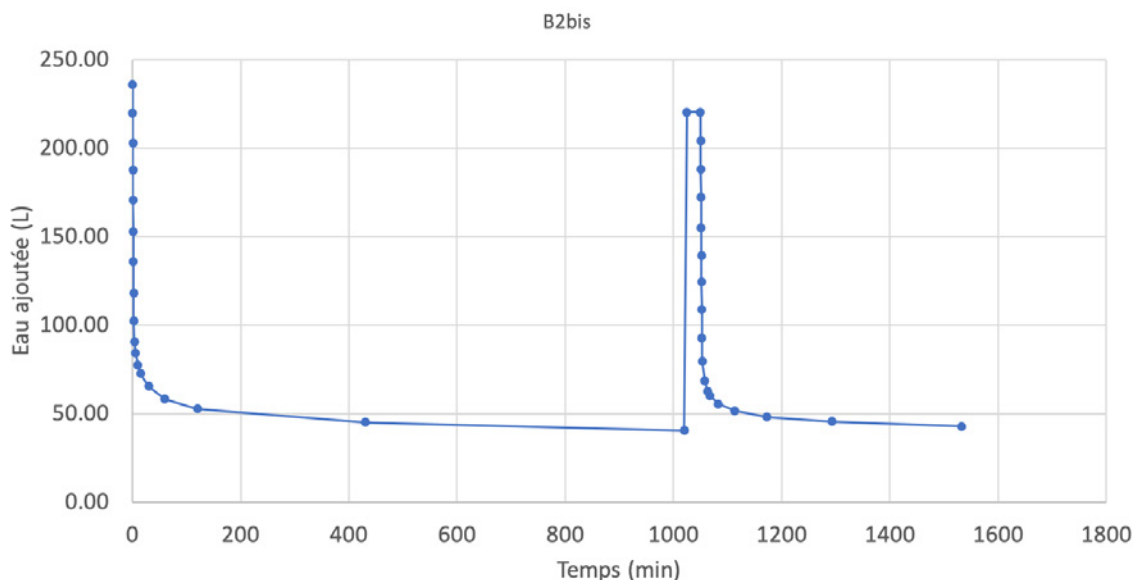


Figure 5 – Exemple de résultat de mesure de la capacité de rétention d'eau sur le matériau B2bis

Ces mesures ont permis de calculer le volume de pores disponible (quantité d'eau récupérée/volume de matériau compacté). Ce pourcentage tient compte uniquement des vides entre les grains qui sont rapidement accessibles pour le stockage de l'eau. Il s'agit du volume de pores «rapidement» disponible.

Des essais à la plaque dynamique allemande (Figure 7) ont été réalisés sur certaines des couches compactées. Le Tableau 2 donne leurs valeurs moyennes et résume tous les résultats.

	ρ_d, OPN (kg/m ³)	ρ_d, OPM (kg/m ³)	Compact. (% OPN)	Compact. (% OPM)	w (%)	Vol. pores disp. (%)	Vol. pores disp. – Deuxième mesure (%)	Evd (MPa)
B3bis		1816		79	13,5	22	18	23,5
				85	13,5	18	17	38,8
				90	13,5	15	12	29,1
B5	2000		96,5		8	12	11	35,6
			95,1			11	9	23,7
			93,4			13	11	33,3
B6	2014		96,5		9	10	9	34,2
B4bis		1843		84,5	15,5			34,7
B2bis	1882	2090	95,3	85	8,3	20	18	31,8
B1bis	1377	1610	98,6	84,3	14,6	16	16	13,4
B7	1798		91,1		9	12	11	22,1

Tableau 2 – Résultats des matériaux testés dans le bac de 1 m³



Figure 6 – Application de la quatrième couche de B5



Figure 7 – Essai à la plaque dynamique (B3bis) – premier essai



Figure 8 – Compactage et essai à la plaque dynamique (0/40 B3bis) – deuxième essai

Analyse des résultats

Le volume de vides «rapidement disponible» pour le stockage de l'eau est lié au degré de compactage et à la rupture des pierres pendant le compactage, malgré l'utilisation d'un marteau vibrant léger.

Il diffère d'un matériau à l'autre et varie de 9 à 18 % (pour des taux de compactage d'environ 91-98 % OPN). Les valeurs pour les mélanges terre-pierres «B2bis» et «B1bis» sont particulièrement élevées (18-16 %). Les teneurs en eau mesurées varient de 8 à 15 %.

Aux Pays-Bas, les spécifications relatives au volume d'eau disponible (**capacité maximale disponible**) sont d'au moins 30 ou 35 % (Normeninstituut Bomen, 2018). En Allemagne, il s'agit d'au moins 25 ou 35 %, selon le type de mélange terre-pierres (Heidger & Kurkowski, 2019).

Il s'agit de la **capacité maximale disponible**, qui tient compte des volumes d'eau dans les vides entre les grains et dans tous les pores des grains accessibles pour le stockage de l'eau de pluie. Il est donc logique que ces exigences soient plus élevées que les valeurs mesurées dans le cadre du projet.

NB: RWA Baumstandorte/Standortsanierung, 2010 prend en compte la masse sèche du matériau (et donc la teneur en eau) lors du calcul de la capacité maximale disponible.

Ces essais montrent que la portance des mélanges terre-pierres est limitée ($E_{vd} < 40$ MPa).

Essais dans la tranchée expérimentale du CRR

En plus des essais «à l'échelle du laboratoire», deux matériaux (B1bis et B7) ont également été testés dans la tranchée expérimentale du CRR à Sterrebeek (Figure 9). La tranchée expérimentale mesure 7 m de long, sur 2,1 m de large et 2 m de profondeur, ce qui permet de simuler une exécution à plus grande échelle qu'en laboratoire.



Figure 9 – Tranchée expérimentale à Sterrebeek

Chaque matériau a été mis en œuvre en quatre couches de 25 cm d'épaisseur. Le côté gauche de la tranchée expérimentale a été compacté avec un marteau vibrant de 70 kg et le côté droit avec une plaque vibrante de 154 kg, en quatre passages à chaque fois (Figure 10).



Figure 10 – Compactage à l'aide d'un marteau vibrant (à gauche) et d'une plaque vibrante (à droite)

Des mesures au gammadensimètre ont été effectuées sur chaque couche à différentes profondeurs et à intervalle de 5 cm. Le module dynamique Evd a été mesuré à l'aide de l'essai à la plaque dynamique allemande à la surface de chaque couche (Figure 11).



Figure 11 – Mesures au gammadensimètre (à gauche) et essai à la plaque dynamique allemande (à droite) dans la tranchée expérimentale

Pour le matériau B1bis, les densités optimales du Proctor Normal (OPN) et du Proctor Modifié (OPM) ont été déterminées comme «références»; elles sont respectivement de 1,3370 et 1,610 t/m³. Pour le matériau B7, seule la densité Optimal Proctor Normal (OPN) a été déterminée, soit 1,800 t/m³. Il faut noter qu'il s'agit de matériaux très hétérogènes qui se brisent facilement et dont la granulométrie peut varier fortement en fonction du lot fourni. Ces densités de référence peuvent donc également être très variables.

Les modules dynamiques Evd ont été mesurés à l'aide de la plaque dynamique allemande sur chaque couche. Le Tableau 3 présente les valeurs moyennes pour toutes les couches.

Des densités de 98 % OPN et de 91 % OPN sont obtenues respectivement sur les matériaux B1bis et B7. Le taux de compactage avec la plaque vibrante est plus faible qu'avec le marteau vibrant. Un compactage plus intense aurait entraîné la rupture des grains des matériaux.

Les valeurs de module dynamique obtenues sont du même ordre de grandeur pour les deux matériaux (15 MPa) et sont largement inférieures au critère de 85 MPa exigé par le SB 250 pour les fondations.

	Méthode de compactage	OPN	OPM	Module E _{vd} (MPa)
B1bis	Marteau vibrant	98 %	81,4 %	16,8+/-1,7
B1bis	Plaque vibrante	93,6 %	77,8 %	15,7+/-1,95
B7	Marteau vibrant	91 %		15,4 +/- 1,2
B7	Plaque vibrante	87,3 %		14,6 +/- 2,0

Tableau 3 – Résultats des mesures au gammadensimètre et des essais à la plaque dynamique allemande (moyenne sur toutes les couches testées) dans la tranchée expérimentale

Des essais à la plaque statique belge ont également été effectués sur la dernière couche:

- deux essais par méthode de compactage avec la grande plaque statique de 750 cm² (1 cycle de charge);
- un essai par méthode de compactage avec la petite plaque statique de 200 cm² (2 cycles de charge).



Figure 12 – Mesure avec l'essai à la plaque statique sur le matériau B1bis

Les modules de compressibilité M_1 (Tableau 4) obtenus sont largement inférieurs au critère de 35 MPa exigé par le SB 250 pour la sous-fondation. Ils sont plus élevés dans la partie compactée avec le marteau vibrant. Le deuxième cycle, réalisé avec la petite plaque, montre que le compactage aurait pu être amélioré ($M_2/M_1 \geq 3$), mais cela aurait conduit à la rupture des grains (voir ci-dessus).

		M_1 (grande plaque) - MPa	M_1 (petite plaque) - MPa	M_2 (petite plaque) - MPa
B1bis	Marteau vibrant	31,5	16,5	66,5
		20,9		
	Plaque vibrante	10	15,5	51,5
		20,3		
B7	Marteau vibrant	22,9	18,6	63,8
		23,2		
	Plaque vibrante	15,6	16,3	57
		14,6		

Tableau 4 – Résultats des mesures avec l'essai à la plaque statique belge (couche de surface)

Des mesures de perméabilité à l'eau ont également été réalisées sur les deux matériaux avec l'essai double anneau.

Matériau B7

- Mesure 1 (côté droit, plaque vibrante): $4,13 \cdot 10^{-4}$ m/s
- Mesure 2 (côté gauche, marteau vibrant): $2,80 \cdot 10^{-4}$ m/s

Matériau B1bis: la perméabilité du matériau est trop élevée pour être mesurée avec l'essai double anneau.

Les deux matériaux testés sont donc bien perméables.

Suivi d'un chantier

Enfin, un chantier a également fait l'objet d'un suivi avec application de mélanges terre-pierres au niveau d'une piste cyclable le long de laquelle des arbres seront plantés (Figure 13). La structure est la suivante:

- sous-fondation en mélanges terre-pierres environ 50 cm;
- empierrement lié au ciment environ 20 cm;
- revêtement bitumineux.

La sous-fondation en mélanges terre-pierres est plus large que la future piste cyclable afin de laisser suffisamment d'espace pour la croissance des racines.

Les mélanges terre-pierres ont été compactés en deux couches à l'aide d'un rouleau léger, la première couche étant plus épaisse (30-35 cm) que la deuxième.



Figure 13 – Réalisation de mélanges terre-pierres sur le chantier

Des essais à la plaque statique avec la grande plaque et des essais à la plaque dynamique ont été réalisés (Figure 14). Les modules respectifs sont indiqués dans le Tableau 5.

Plaque statique, M_1	27 MPa		
Plaque dynamique, E _{vd}	13 MPa	11 MPa	13 MPa

Tableau 5 – Résultats des essais à la plaque statique et dynamique sur le chantier

Les résultats des mesures à la plaque dynamique sont similaires à ceux obtenus dans la tranchée expérimentale. Le module de compressibilité mesuré avec l'essai à la plaque statique est du même ordre de grandeur que celui mesuré dans la tranchée expérimentale pour la partie compactée au marteau vibrant. Cependant, il reste inférieur à 35 MPa, ce qui correspond à l'exigence du SB 250 (Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer [AWV], 2021) pour une sous-fondation.



Figure 14 – Réalisation de mélanges terre-pierres sur le chantier – essais à la plaque statique

Conclusion

La perméabilité de ces matériaux, mesurée en laboratoire sur des échantillons compactés à 97 % OPM, varie de 10^{-5} à 10^{-7} m/s, en fonction de la granulométrie du matériau. Ils sont donc relativement peu perméables.

Les essais dans le bac de 1 m^3 ont montré que les grains de ces matériaux se brisent complètement lorsqu'ils sont compactés à un taux de compactage de 95-100 % OPM. Pour éviter cela, les **taux de compactage doivent être limités à 95 % - 97 % OPN**. Cela explique les perméabilités plutôt limitées mesurées en laboratoire à des taux de compactage de 97 % OPM. Cela signifie également que les portances mesurées précédemment (Grégoire et al., 2021) sur ces granulats qui ont été davantage compactés ne sont plus d'application.

Les essais dans le bac avec ce taux de compactage limité ont montré que le volume de pores disponible variait en fonction du matériau testé et du taux de compactage utilisé (valeurs comprises entre 9 % et 18 % pour le volume de pores). Ces valeurs obtenues sont inférieures à celles définies dans les spécifications allemandes ou néerlandaises. Pour ces dernières, il s'agit en fait de la capacité maximale disponible, qui tient compte des volumes d'eau dans les vides entre les grains et dans tous les pores des grains accessibles pour le stockage de l'eau de pluie. Il est donc logique que ces exigences soient plus élevées que les valeurs mesurées dans le cadre du projet actuel.

Ces essais démontrent que la portance des mélanges terre-pierres est limitée (Evd < 40 MPa).

Les essais réalisés dans la tranchée expérimentale de Sterrebeek (avec mise en œuvre à des taux de compactage limités) ont également montré une portance limitée (module dynamique allemand Evd de l'ordre de 15 MPa). Les modules statiques obtenus sont légèrement plus élevés pour la partie compactée avec un marteau vibrant, mais restent inférieurs à 35 MPa (exigence du SB 250 [Vlaamse Overheid, AWW, 2021] pour une sous-fondation). Ces résultats sont confirmés par les résultats du chantier suivi.

Les mesures double anneau effectuées dans la tranchée expérimentale ont démontré que les perméabilités étaient effectivement élevées à ces degrés de compactage limités.

Ces mélanges terre-pierres, qui sont principalement destinés à la bonne croissance et à l'entretien des plantations (arbres), ne sont certainement pas recommandés comme fondation d'une structure routière. L'utilisation comme sous-fondation d'une route soumise à un trafic plus lourd ne peut être recommandée que pour les mélanges terre-pierres qui peuvent être suffisamment compactés pour atteindre une portance suffisante (module statique > 35 MPa). La composition du matériau (nécessaire pour assurer la croissance des arbres et des plantations) complique en effet le compactage, ce qui se traduit par une portance généralement limitée. Toutefois, sur les routes à trafic limité (c'est-à-dire avec peu ou pas de camions), l'utilisation en sous-fondation pourrait éventuellement être envisagée.

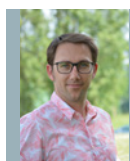
Remerciements: nous remercions le NBN et le SPF Économie pour le financement de ce projet de recherche, ainsi que les fournisseurs pour la mise à disposition de matériaux, de chantiers, et les échanges constructifs.



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

- Aquafin & Voetgangersbeweging. (2022). *Operatie perforatie*. <https://www.publiekeruimte.info/projectwerking/operatie-perforatie/>
- Gendera, F. (2017, octobre 4-6). *Waterdoorlatende bestratingen: Een ecologische en duurzame verharding binnen het integraal waterbeleid* [Presentatie]. In 23e Congrès belge de la route, Bruxelles. Association belge de la Route (ABR). http://www.cbr-bwc.be/wp-content/uploads/PDF/Presentation/S7.5_F.Gendera_PRES.pdf
- 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>
- Grégoire, C., Boonen, E. & Theys, F. (2022). Structures routières vertes et durables: Premiers résultats sur les revêtements semi-durs. *Revue générale des routes et de l'aménagement (RGRA)*, (987), 22-27.
- Heidger, C. & Kurkowski, H. (2019). Regelwerke der FGSV für Strassenbäume: Neupflanzung 2006/ Baumbestand M EVB 2019. Teil 1. *Strasse und Autobahn*, 70(7), 570-577.
- Norminstituut Bomen. (2018). *Handboek bomen 2018*.
- RWA Baumstandorte/Standortsanierung. (2010). *Empfehlungen für Baumpflanzungen. Teil 2: Standortvorbereitung für Neupflanzungen: Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate* (FLL Technische Regeln). Forschungsgesellschaft landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL). <https://www.fgsv-verlag.de/empfehlungen-fur-baumpflanzungen-teil-2>
- Steppe, P. & Verhanneman, K. (2017, octobre 4-6). *Halfverhardingen: Theoretische beschouwingen, praktijkervaringen, aanbevelingen voor een kwalitatief ontwerp en uitvoering* [Presentatie]. In 23ste Belgisch wegencongres, Brussel. Belgische Wegenvereniging (BWV). http://www.cbr-bwc.be/wp-content/uploads/PDF/Presentation/S2.3_P.Steppe_PRES.pdf
- Van der Wielen, A. & Grégoire, C. (2018). Le CRR étudie les empièvements de sous-fondation. *Bulletin CRR*, (114), 21-24.
- Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer (AWV). (2021). *Standaardbestek 250 voor de wegenbouw (Versie 4.1a)*. https://wegenenverkeer.be/zakelijk/documenten?search_api_fulltext_1=%22standaardbestek%20250%20versie%204.1a%22&documents%5B0%5D=type_document%3AStandaardbestek