



Nouveaux Matériaux pour structures routières «Vertes» et durables – Premiers résultats de la recherche

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 revêtements 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 & Infopunt Publieke Ruimte, s.d.).

Dans le cadre du projet de recherche prénormatif NoMaVert (CCN/NBN/PN 19A01), le CRR s'intéresse 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 des 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).

Pour ces deux matériaux, aucune exigence performantielle n'a été établie à ce jour en Belgique. Certains pays tels que les Pays-Bas ou l'Allemagne ont publié quelques exigences

performantielles. Les mélanges terre-pierres sont repris dans le cahier des charges type de la Région flamande (*Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer [AWV]*, 2019) avec quelques exigences concernant les paramètres intrinsèques. Celles-ci seront complétées dans les prochains errata dont la publication est prévue pour fin 2021.

Au cours de cette recherche, nous étudions 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 belges et éventuellement dans les normes européennes futures.

“ Au cours de cette recherche, nous étudions les performances de ces matériaux, tant au niveau du laboratoire que sur site ”

Sélection des matériaux

En ce qui concerne les revêtements semi-durs, cinq matériaux ont été caractérisés en laboratoire. Ils proviennent de trois fournisseurs 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 : le liant est d'origine végétale;
- F_3 - M_2 : le liant est d'origine végétale.

Pour les matériaux des fournisseurs F_1 et F_3 , les granulats ont aussi été livrés séparément.

En ce qui concerne les mélanges terre-pierres, quatre mélanges ont été étudiés:

- B1: à base de granulats d'origine volcanique et de terre;
- B2: à base de moellons recyclés, d'argile, de matière organique et d'additifs;
- B3: à base de lave, d'argile cuite, de terre arable et de matière organique;
- B4: à base de lave et d'argile.

Revêtements semi-durs

Essais en laboratoire

Caractérisation des mélanges et/ou des granulats

Des analyses granulométriques des cinq mélanges et des granulats disponibles (F_1 , F_3 - M_1 et F_3 - M_2) ont été effectuées.

Les granulats du mélange F_1 ont été caractérisés en termes de résistance au gel, d'absorption d'eau, de coefficient d'aplatissement, de résistance aux chocs LA et de résistance à l'usure M_{DE} . Les résultats (tableau 1) sont conformes aux prescriptions du CCT Qualiroutes (Service Public de Wallonie [SPW], 2021) pour les gravillons des fondations en empierrement. Les essais de caractérisation de granulats n'ont pu être réalisés sur les granulats de F_3 vu le calibre limité de ceux-ci.

	Caractéristique	CRR	Exigences du CCT Qualiroutes pour les gravillons des fondations en empierrement
Granulats - (fraction 0/32 mm)	Essai au sulfate de magnésium (NBN EN 1367-2)	1,68 %	≤ 35
	Résistance au gel/dégel (NBN EN 1367-1)	0,12 %	≤ 4 (ou 10 sous conditions)
	Absorption d'eau sur 0/4 (NBN EN 1097-6)	0,7 %	-
	Absorption d'eau sur 0/32 (NBN EN 1097-6)	1 %	≤ 1
	Coefficient d'aplatissement (NBN EN 933-3)	15 %	≤ 35
	Teneur en fines (NBN EN 933-1)	3,6 %	4 %
	LA (NBN EN 1097-2)	14 %	≤ 30
	M _{DE} (NBN EN 1097-1)	8 %	≤ 25
Mélange F₁	Teneur en fines (NBN EN 933-1)	8,9 %	-
	Teneur en éléments < 4 mm (EN 933-1)	82,5 %	-
	Teneur en éléments < 8 mm (EN 933-1)	99,3 %	-

Tableau 1 – Résultats des essais de caractérisation du mélange F₁ et du granulats correspondant

Indices de portance Californien différés des mélanges

Les matériaux ont été compactés à la densité optimale déterminée par l'essai Proctor modifié (Bureau de Normalisation [NBN], 2005, 2010-2012). Les mélanges de F₁ et F₂ ont été préparés à la teneur en eau optimale. Les mélanges de F₃ ont été testés à la teneur en eau de réception.

Des mesures de l'indice de portance Californien (Indice CBR, NBN, 2012) ont été réalisées directement après compactage, après 3, 7 et 28 jours de conservation en chambre climatique (60 % humidité relative 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 utilisation en revêtement, une valeur de CBR suffisante (estimé à 100 %) doit être atteinte. Directement après le compactage, tous les mélanges, à l'exception du F₃-M₁, atteignent cette valeur. Pour trois mélanges, une augmentation de la portance est observée après trois jours. Un durcissement important du mélange F₁ est observé après 28 jours. Les portances après immersion diminuent légèrement pour F₁ et F₃-M₂ et diminuent de manière plus marquée pour le mélange F₂ mais restent

néanmoins suffisantes. En ce qui concerne le mélange F_3-M_1 , des essais supplémentaires vont être réalisés sur un nouveau prélèvement pour vérifier ces premiers résultats.

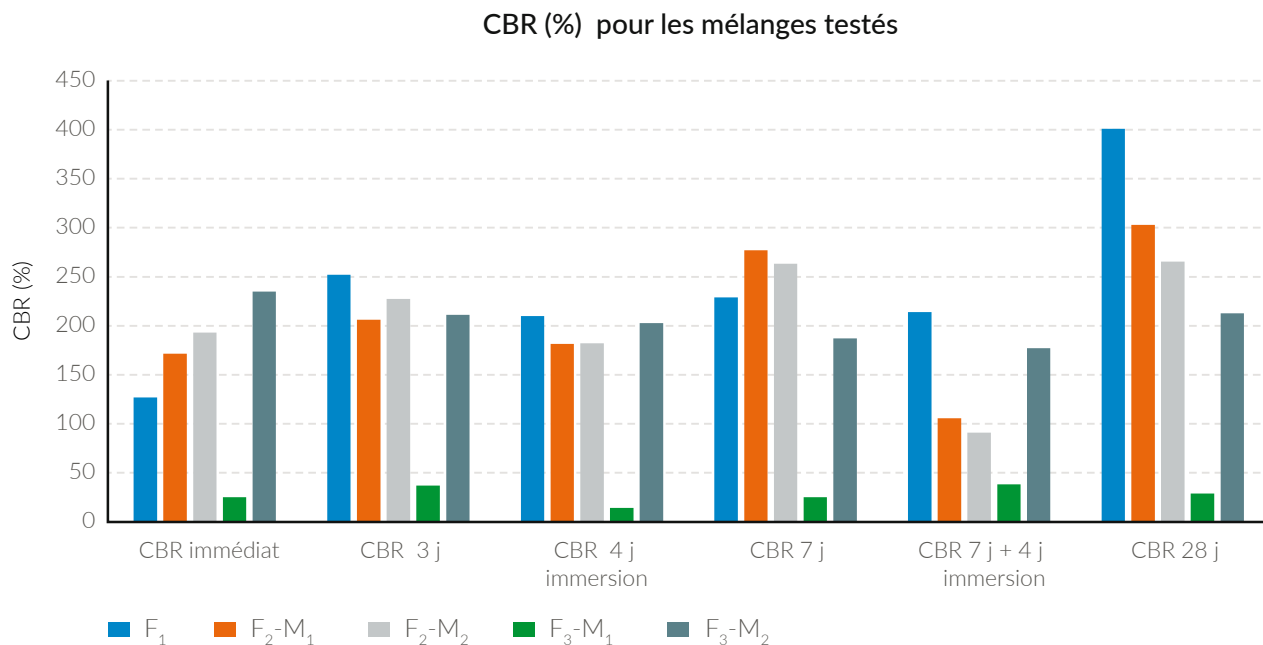


Figure 1 – Résultat des indices de portance Californien pour les mélanges de revêtements semi-durs testés

Essais in situ

Suivi de chantiers existants

Entre juillet et septembre 2020, des mesures de perméabilité avec l'essai double anneau (suivant l'Annexe A de la PTV 827 [COPRO, 2010]) ont été réalisées sur des chantiers existants. Après une saturation d'environ vingt minutes au minimum, le niveau d'eau est maintenu constant dans l'anneau intérieur du dispositif. La saturation du sol entre l'anneau intérieur et extérieur permet d'éviter un écoulement latéral de l'eau injectée. En principe, l'essai dure au moins vingt minutes. Ces temps sont indicatifs et peuvent être adaptés en fonction de la perméabilité de la surface à tester.



Figure 2 – Essai double anneau du CRR

Le tableau 2 reprend la liste des sites où des mesures de perméabilité ont été réalisées. Comme le montrent les résultats, seules quelques valeurs de perméabilité ont pu être déduites, les autres perméabilités in situ étant trop faibles pour être mesurées avec le dispositif du CRR. A Sledderlo, la perméabilité a diminué entre 2016 et 2020.

Lieu/Fournisseur	Mise en œuvre	Mesure	Nombre de mesures	Valeur essai double anneau
Sledderlo - F ₄	Mai 2016	10/07/2020	2	Perméabilité non mesurable
		22/9/2016	3	k1 = 4,1 E-5 m/s k2 = 1,7 E-5 m/s k3 = 4,0 E-6 m/s
Tirlemont - F ₁	2017 (ph. 1) - 2019 (ph. 2)	10/08/2020	2 (phase 1)	Perméabilité non mesurable
Genk - F ₁	2018 (ph. 1) - 2019 (ph. 2)	10/08/2020	2	Perméabilité non mesurable
Anvers - F ₁	2015	12/08/2020	2	Perméabilité non mesurable
Borgerhout - F ₁	Fin 2019	12/08/2020	2	Perméabilité non mesurable
Tervuren - F ₃	2017	10/09/2020	2	Perméabilité non mesurable
			1	3,79E-6 m/s
Erps-Kwerps - F ₃	Septembre 2015	10/09/2020	1	3,56E-4 m/s
			2	Perméabilité non mesurable

Tableau 2 – Mesures de perméabilité avec l'essai double anneau sur site existant de revêtements semi-durs

Des essais de perméabilité en laboratoire sont en cours actuellement pour vérifier ces résultats in situ.



Figure 3 – Chantier de mise en œuvre de revêtement semi-dur à Wavre (octobre 2020)

Nouveau chantier

Le matériau F₃-M₂ a été mis en œuvre en octobre 2020 dans un quartier résidentiel à Wavre pour une application piétonne. La structure est:

- 20 cm de recyclés mixtes 20/56;
- 4 cm de recyclés mixtes 4/20;
- couche de lave +/- 1 cm après compactage;
- revêtement semi-dur de 5 cm après compactage.

Des mesures ont été faites avec la plaque dynamique allemande (Kudla, 2012) sur la fondation, sur la couche de lave et sur le revêtement. Les mesures ont été répétées sur le revêtement 32 jours après mise en œuvre. Vu le diamètre de la plaque dynamique (30 cm), la mesure sur le revêtement de 5 cm est fortement influencée par les couches sous-jacentes.

Les modules sur les différentes couches ne sont pas très élevés, mais sont suffisants pour une application piétonne exclusive. Une mesure sur le revêtement après 32 jours montre une augmentation de la portance et se rapproche ou atteint les valeurs qui seront exigées par le SB 250 (Vlaamse Overheid, AWV, 2019) pour les fondations de pistes cyclables et fondations drainantes (Errata 2021, module dynamique $E_{vd} \geq 60$ MPa). Après 32 jours, le chantier ne

présentait pas de dégâts apparents. Une inspection en mars 2021 confirme l'absence de dégâts apparents.

Juste après l'exécution, des essais au gammadensimètre (ASTM International, 2017) ont été réalisés en sept points. La valeur moyenne de la densité humide est de 2,20 g/cm³, correspondant à la valeur de densité humide mesurée en laboratoire sur le matériau prélevé et compacté à l'énergie Proctor Normal. La teneur en eau naturelle est de 8,32 % et l'indice CBR mesuré est de 75 %.

N°	Distance (m)	Jour 0				Après 32 jours
		Plaque dynamique sur la fondation (MPa)	Plaque dynamique sur la couche de lave (MPa)	Plaque dynamique sur le revêtement (MPa)	Mesures au gammadensimètre Densité humide (g/cm ³)	Plaque dynamique sur le revêtement (moy. de deux mesures)
10	10	32,33	40,54	34,99	2,203	62,54
11	35	22,12	31,65	31,51	2,185	50,235
12	60	28,34	44,73	55,01	2,223	62,24
13	85	40,61	86,54	38,66	2,217	55,79
14	110	43,69	41,13	37,01	2,221	64,475
15	135	24,46	39,27	29,37	2,17	56,61
16	160	19,96	42,13	25,57	2,184	65,205

Tableau 3 – Essais sur le chantier de Wavre avec le produit F₃-M₂ (plaque dynamique allemande et mesures au gammadensimètre)

Mesure de perméabilité

En mars 2021, trois mesures de perméabilité avec l'essai double anneau ont été réalisées à différents endroits du site: deux mesures sur la partie mise en œuvre en octobre 2020 et une mesure sur la partie du chantier réalisée en 2018. Comme pour les chantiers précédents, la perméabilité in situ était trop faible pour pouvoir être mesurée par l'essai double anneau.



Figure 4 – Mesures de perméabilité sur le chantier de Wavre (produit F₃-M₂)

Mélanges terre-pierres

Essais en laboratoire

Pour chacun des mélanges, une analyse granulométrique a été effectuée, ainsi qu'une courbe Proctor modifié (cinq points) (NBN, 2010-2012) avec mesure de l'indice CBR directement après compactage et de l'indice CBR quatre jours après immersion (NBN, 2012). Les résultats sont présentés ci-après.



Mélange B4



Mélange B1

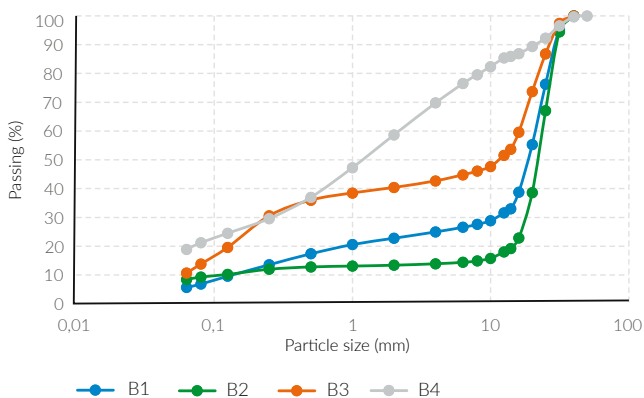


Figure 5 – Courbes granulométriques des quatre mélanges terre-pierres testés

Les valeurs des indices de portance Californien sont suffisantes (valeur visée 50 %) dans une plage de teneur en eau de quelques pour cent autour de la teneur en eau optimale (voir figure 6 pour deux mélanges). Les portances après immersion restent suffisantes (valeur visée 35 %) dans une plage de teneur en eau de quelques pour cent autour de la teneur en eau optimale.

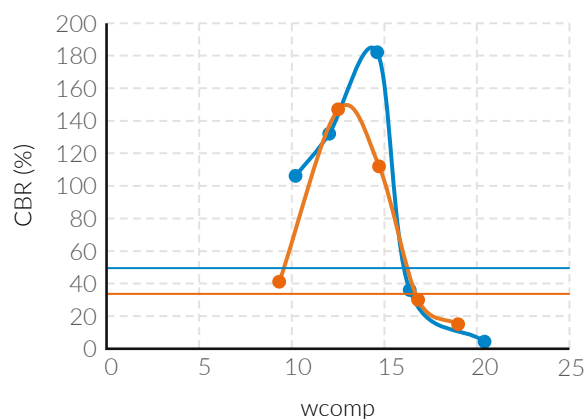
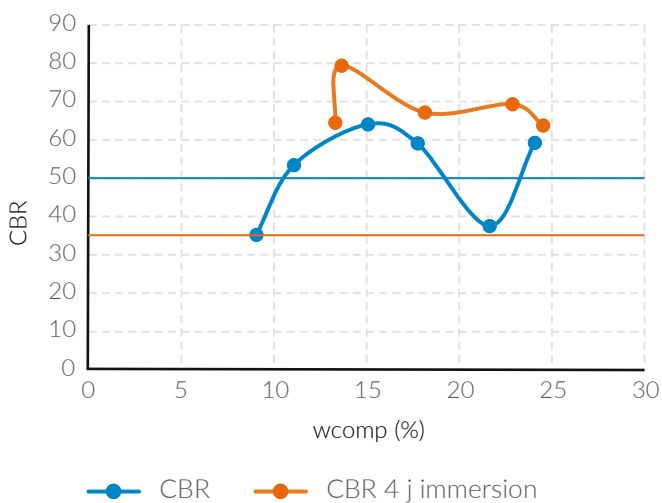


Figure 6 – Courbes CBR immédiat et CBR après quatre jours d'immersion des mélanges terre-pierres B1 et B4

Des essais de caractérisation (résistance à la fragmentation LA, résistance à l'usure M_{DE} , absorption d'eau, résistance au gel-dégel) ont été réalisés sur les mélanges B3 et B4 et sur les granulats des mélanges B1 et B2.

Le tableau 4 reprend les résultats de ces essais. Les valeurs sont comparées avec les exigences des CCT pour une application en **sous-fondation (vu qu'il n'y a pas d'exigence spécifique pour les mélanges terre-pierres actuellement ¹, à l'exception de quelques paramètres intrinsèques dans Vlaamse Overheid, AWW, 2019, H3§77.2)**. A l'exception du B3 qui montre une valeur limite pour la résistance aux chocs Los Angeles (LA 41 au lieu de 40), les performances sont acceptables, principalement pour des applications à trafic limité.

	Absorption d'eau (NBN EN 1097-6)	LA (NBN EN 1097-2)	M_{DE} (NBN EN 1097-1)	$M_{DE}+LA$	Gel/Dégel (NBN EN 1367-1)
B1 – essais sur granulats	Élevée	OK OK SB 250	IIb et III (max. 1 000 poids lourds par jour)	OK	OK
B2 – essais sur granulats	OK	OK OK SB 250	OK	OK	OK
B3 – essais sur mélange	Élevée	CCT Qualiroutes et SB 250: valeur limite	IIb et III (max. 1 000 poids lourds par jour)	Uniquement IIIb (pas de poids lourd)	OK
B4 – essais sur mélange	Élevée	OK OK SB 250	OK	OK	Tous les réseaux au Nord du Sillon Sambre et Meuse; IIIb ailleurs (pas de poids lourd) OK SB 250

Tableau 4 – Résultats des essais de caractérisation-comparaison des mélanges terre-pierres testés avec les exigences des CCT (SB 250 + CCT Qualiroutes) pour les sous-fondations

1 Les errata du cahier des charges type flamand SB 250 (Vlaamse Overheid, AWW, 2019) comprendront désormais un certain nombre d'exigences, notamment sur la base des essais réalisés.

Conclusion

Revêtements semi-durs

Les matériaux testés montrent de bonnes performances en termes de portance (à l'exception d'un mélange qui sera à nouveau testé). L'immersion produit une diminution plus ou moins marquée de la portance, mais les valeurs restent néanmoins suffisantes.

Le chantier suivi montre des modules dynamiques acceptables pour une application exclusivement piétonne. Une augmentation des modules est observée après un mois.

Les essais in situ réalisés sur différents chantiers ne semblent pas confirmer le caractère drainant des matériaux. Les perméabilités in situ mesurées sont très faibles, voire non mesurables avec l'essai double anneau. Des essais de perméabilité sont en cours en laboratoire pour vérifier cette caractéristique.

Des essais supplémentaires sont également prévus pour mesurer les résistances aux cycles secs-humides et la résistance au gel.

Mélanges terre-pierres

Les matériaux testés ont des performances suffisantes pour une utilisation en sous-fondation, principalement pour des applications à trafic limité. Les mesures de perméabilité en laboratoire sont en cours.

Des essais de mesure de capacité de rétention d'eau en laboratoire sont prévus au planning de 2021, ainsi que des suivis de chantiers.



Colette Grégoire

E c.gregoire@brrc.be

T 02 766 03 19

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.



Elia Boonen

E e.boonen@brrc.be

T 02 766 03 41



Frank Theys

E fr.theys@brrc.be

T 02 766 03 20

Références

- Aquafin & Infopunt Publieke Ruimte. (s.d.). Operatie perforatie. <https://www.operatieperforatie.be/>
- ASTM International. (2017). *Standard test methods for in-place density and water content of soil and soil-aggregate by nuclear methods (shallow depth)* (ASTM D6938-17a). <https://www.astm.org/Standards/D6938.htm>
- Bureau de Normalisation. (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://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-13286-50-2005~261947/>
- Bureau de Normalisation. (2010-2012). *Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques. Partie 2: Méthodes d'essai de détermination en laboratoire de la masse volumique de référence et de la teneur en eau: Compactage Proctor* (NBN EN 13286-2+AC). <https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-13286-2-2010~360482/>
- Bureau de Normalisation. (2012). *Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques. Partie 47: Méthode d'essai pour la détermination de l'indice portant Californien (CBR), de l'indice de portance immédiate (IPI) et du gonflement linéaire* (NBN EN 13286-47). <https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-13286-47-2012~451351/>
- COPRO. (2010). *Waterdoorlatende bestratingen: Systeem-, product- en plaatsingseisen* (Prescriptions Techniques No PTV 827, version 1.0). <https://www.copro.eu/sites/default/files/document/file/Download/Reglementen/Hemelwater/Geldige%20versie/WEB%20PTV%20827%20v%201-0.pdf>
- Gendera, F. (2017, octobre 4-6). *Waterdoorlatende bestratingen, een ecologische en duurzame verharding binnen het integraal waterbeleid* [Presentation]. 23^{ième} congrès belge de la route, Bruxelles.
- 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. (2012). *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). Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV).
- Service Public de Wallonie. (2021). *CCT Qualiroutes: Cahier des charges-type* (version 2021 consolidée). http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualiroutes/frame.jsp?index_cctquali.html
- Steppe, P. & Verhanneman, K. (2017, octobre 4-6). *Halfverhardingen: Theoretische beschouwingen, praktijkervaringen, aanbevelingen voor een kwalitatief ontwerp en uitvoering* [presentation]. 23^{ième} congrès belge de la route, Bruxelles.
- Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer. (2019). *Standaardbestek 250 voor de wegenbouw* (version 4.1). <https://wegenenverkeer.be/zakelijk/documenten?search=standaardbestek+4.1>