



Utilisation de granulats de caoutchouc recyclés dans le béton: premiers résultats du projet Rubost

Partant du constat que le développement et l'innovation sont insuffisants dans notre pays au sein du marché du recyclage des pneus usagés, le fonds Green.er (www.greener.fund) a été créé en 2017 pour soutenir des projets locaux qui contribuent à un traitement écologique et durable des pneus usagés et qui encouragent leur utilisation potentielle en tant que ressources secondaires dans des applications bien définies.



Figure 1 - Matériaux disponibles provenant de pneus usagés de Belgique (RRO) [R0-0,8 mm - R0,8-2,5 mm - R1,6-2,5 mm - R2,5-4,5 mm - «Cowhouse» 3/7 mm - fibres d'acier recyclées]

En outre, des recherches menées à l'étranger ont montré que l'utilisation de granulats de caoutchouc dans le béton est susceptible d'apporter une valeur ajoutée en termes d'amélioration de la résistance aux chocs, d'augmentation de la ductilité, de réduction du poids, de diminution du retrait et d'amélioration de la résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage, entre autres (Alam et al., 2015; Guo et al., 2014; Kew et al., 2004; Research Information Digest, 2005). D'autre part, ces mêmes références (Mohammadi et al., 2016; Pilakoutas, 2009) démontrent aussi clairement l'impact négatif sur les propriétés mécaniques du «béton de caoutchouc».

Dans ce contexte, le **projet Rubost** a été lancé en 2019 dans le but d'évaluer l'applicabilité des granulats de caoutchouc recyclés – provenant de pneus usagés – dans des barrières de sécurité en béton en vue d'améliorer la sécurité en construction routière. Cela pourrait signifier le remplacement d'une partie des granulats naturels fins (sable) et grossiers (pierre concassée) dans le béton.

Cette étude se concentre principalement sur les éléments coulés sur place afin d'améliorer la résistance aux chocs du béton et l'absorption d'énergie en cas d'impact (*impact severity*) tout en préservant au moins les autres exigences performantielles selon la série de normes européenne EN 1317 «Dispositifs de retenue routiers» (*Bureau de Normalisation (NBN), 2002-2012*).

Ce projet Green.er, réalisé en collaboration avec l'entrepreneur routier Colas Belgium et avec [Rubber Recycling Overpelt](#) en tant que fournisseur des granulats de caoutchouc, est scindé en plusieurs phases: caractérisation et sélection des granulats de caoutchouc, impact sur les propriétés du béton frais, impact sur les propriétés du béton durci, optimisation de la composition du béton pour barrières de sécurité, et développement d'un prototype.

Cet article explique cette recherche et l'état d'avancement actuel.

Caractérisation et sélection des granulats de caoutchouc

L'objectif de cette tâche était de caractériser les déchets disponibles sur le marché belge (par exemple, la fraction fine et broyée = «*crumb rubber*», la fraction grossière = «*tire chips*», les fibres d'acier recyclées, etc.) et, à partir de là, de sélectionner les matériaux pouvant être utilisés dans le béton.

Notre partenaire RRO a fourni plusieurs matériaux à cet effet (figure 1). Pour vérifier que ces matériaux peuvent être utilisés dans le béton conformément à la norme européenne NBN EN 12620 (NBN, 2002+2008) et à la PTV 411 belge (Be-CERT, 2019), plusieurs essais ont été effectués sur les différentes fractions granulaires (et lots de production).

Les résultats sont présentés au tableau 1 et comparés aux exigences du SB 250, le cahier des charges type flamand (Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer (AWV), 2021) et aux exigences relatives aux granulats recyclés conformément à l'annexe E de la NBN EN 206 (NBN, 2013+2021) (tableau 1, dernière ligne). **Il en ressort que tous les matériaux testés – à l'exception du produit hautement contaminé «Cowhouse» – répondent aux exigences du SB 250 version 4.1a (Vlaamse Overheid, AWV, 2021) et seraient donc utilisables en tant que tels dans le béton.** Certains paramètres – comme l'absorption d'eau – sont difficiles ou impossibles à mesurer sur toutes les fractions de caoutchouc, et une certaine variation est également possible sur différents lots de la même classe granulaire (par exemple, la fraction 1,6/2,5 au tableau 1).

Toutefois, outre les exigences techniques, la qualité environnementale (par exemple en ce qui concerne la lixiviation de substances dangereuses) des granulats de caoutchouc doit également

être vérifiée, car il s'agit de déchets qui seront réutilisés dans un matériau de construction moulé. À cette fin, des tests de détection ont été effectués conformément à la législation flamande Vlarema (Vlaamse Overheid, 2012). Ceux-ci ont montré que les paramètres environnementaux étaient tous satisfaisants, à l'exception de la concentration de zinc (dans le caoutchouc non lié), qui est utilisé dans la réaction de vulcanisation lors de la production. C'est pourquoi, à un stade ultérieur, des essais de lixiviation ont également été effectués sur des éprouvettes de «béton de caoutchouc» (voir infra).

Sur la base de tous ces résultats, il a donc été décidé de sélectionner les trois fractions de caoutchouc [0,0/0,8 (=0,5/2 mm); 0,8/2,5 (= 1,6/2,5 mm); 2,5/4,5 (= 2/4 mm)] pour la suite de l'étude.

Fraction	Granulométrie selon l'EN 12620	MB [g/kg]	Masse volumique absolue ρ_a [kg/m ³]	WA [%] Masse volumique sèche ρ_{rd} [kg/m ³] - *estimation	Ecs [s]	FI [-]	Cl- [%]	SO ₄ ²⁻ [%]
0,0/0,8	0/2 (0,5/2) GF 85 f3	< 0,33 (a)	931	- 890*	Non mesurable	-	0,0029	0,0029
0,8/2,5 Colas	1,6/2,5 GC 85/20 f0,5	-	1115	- 1056*	Non mesurable	-	0,0040	0,0070
1,6/2,5 Colas	1,6/3,15 GC 85/20	-	985	- 939*	-	-	-	-
1,6/2,5 CRR	f0,5	-	1148	5,1 1085	-	-	-	-
2,5/4,5	2/4 GC 85/20 f0,5	-	-	-	-	-	-	-
«Cowhouse»	4/12,5 GC 90/15 f0,5	-	-	-	-	19	-	-
Exigence SB 250 version 4.1	GF 85 [D≤4] f3 GC 85/20 [d>0] f4 [D≤8mm]	a (MB≤1,5)	-	Débris de béton de haute qualité: WA ₁₀ $\rho_{rd} \geq$ 2200	-	FI ₂₅ [8<D≤16 mm]	CB (< 0,06%)	SS _{0,2}

MB = valeur au bleu de méthylène; WA = absorption d'eau; Ecs = coefficient d'écoulement; FI = coefficient d'aplatissement; «-» = non mesuré

Tableau 1 – Résumé des résultats des essais physiques et mécaniques sur granulats de caoutchouc

Influence sur les propriétés du béton frais

Pour étudier l'effet de l'incorporation de granulats de caoutchouc sur les propriétés du béton frais, la composition de béton certifiée pour les barrières de sécurité de notre partenaire Colas a servi de base à cette phase. Les spécifications de la composition du béton sont les suivantes:

- classe environnementale/d'exposition: gel avec sels de déverglaçage;
- calibre maximal $D_{max} = 20$ mm;
- facteur eau-ciment maximal $E/C_{max} = 0,50$;

- teneur minimale en ciment $C_{\min} = 350 \text{ kg/m}^3$ CEM III/A 42.5 LA;
- résistance moyenne à la compression $W_m \geq 50 \text{ MPa}$ après 90 jours (SB 250);
- classe de consistance: S1 (affaissement $< 40 \text{ mm}$ pour coffrage glissant);
- teneur en air: 4-6 % (utilisation d'un entraîneur d'air = AEA);
- des granulats calcaires et deux types de sable naturel;
- type d'élément linéaire: barrières de sécurité.

Pour garantir l'ouvrabilité (dans une machine à coffrage glissant) du mélange, les courbes granulométriques ont été optimisées pour se rapprocher le plus possible du squelette inerte du mélange de référence (sans caoutchouc), une partie du volume de sable naturel ou de fraction calcaire 4/6 étant remplacée par des granulats de caoutchouc. À cette fin, plusieurs méthodes d'essai conformes à la série de normes NBN EN 12350 «Essais pour béton frais» (NBN, 2010-2022) ont été utilisées pour évaluer le comportement du béton frais (figure 2a) tout en vérifiant simultanément la résistance à la compression des cubes après 28 jours pour une perte acceptable.

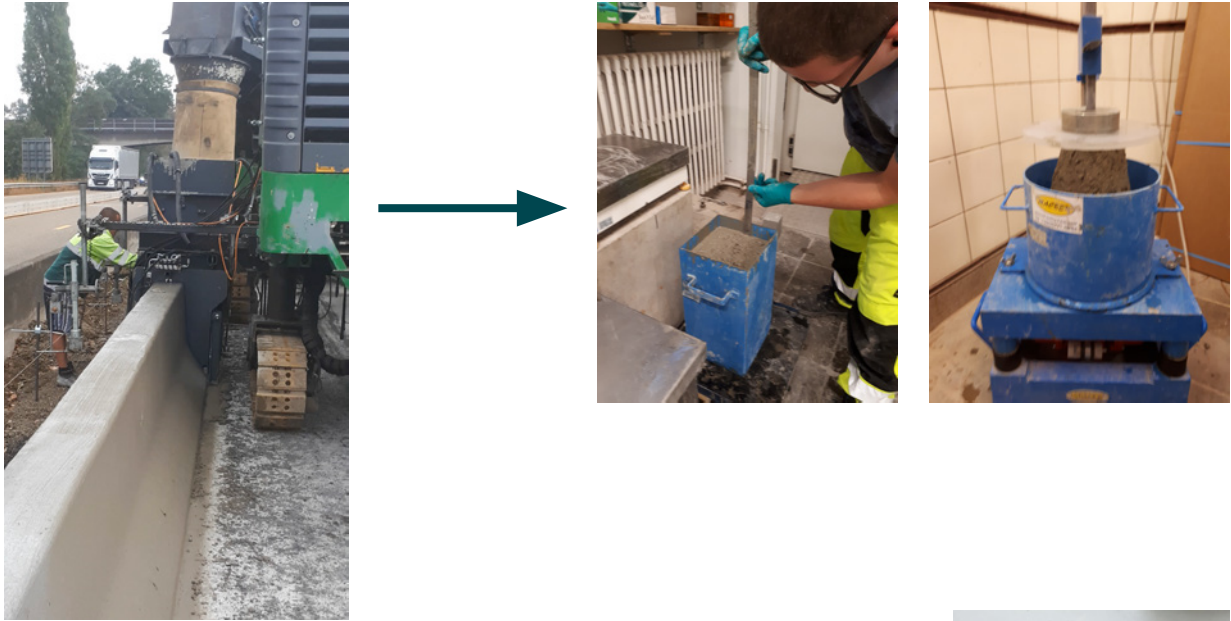
Différentes «compositions de béton de caoutchouc» avec une fraction et une teneur variables en caoutchouc ont ensuite été préparées avec le même dosage d'adjuvants que le béton de référence. Cela a clairement montré l'augmentation systématique de la maniabilité et de la teneur en air des mélanges de béton résultants, conformément à d'autres études, p. ex. (Atahan & Sevim, 2008). Cet effet semble également être plus prononcé pour les fractions de caoutchouc plus fines (0/0,8 et 0,8/2,5) dans lesquelles le béton est généralement trop fluide et où la teneur en air peut être trop élevée.

Contrairement à l'augmentation de la fluidité et de la teneur en air, l'impact négatif sur la résistance à la compression est évident (figure 2b). On constate une perte nette en fonction de la teneur en sable (S) ou en pierre concassée (P) remplacée par des granulats de caoutchouc, presque indépendamment du type ou de la granulométrie de la fraction de caoutchouc dans la fourchette testée. Il n'est possible de remplacer **que jusqu'à 20 % en volume de sable ou de granulats grossiers** pour maintenir la valeur limite de 35 MPa à 28 jours, également par analogie avec des études antérieures, p. ex. (Turatsinze et al., 2018). D'autre part, un comportement plus ductile a pu être observé pour les mélanges de béton de caoutchouc, et une bonne répartition des particules de caoutchouc dans la matrice du béton a été obtenue (figure 2b, photo).

Dans cette phase, l'incorporation de fibres d'acier de pneu (RSTF) recyclées et purifiées de la société Twincon (Koutselas et al., 2010; Pilakoutas, 2017) a aussi été étudiée (figure 2b). Dans ce cas, cependant, la fraction de fibres d'acier recyclées (dosée à 15 kg/m^3) n'a présenté aucune valeur ajoutée en termes de résistance à la compression ou à la flexion des mélanges de béton, qu'elle soit combinée ou non avec les granulats de caoutchouc. Cette piste a donc été abandonnée pour la suite de l'étude.

Sur la base de ces premiers résultats, une optimisation supplémentaire des mélanges de béton de caoutchouc (sans AEA) a ensuite été réalisée, permettant un meilleur contrôle de la fluidité et de la teneur en air, avec **une valeur d'affaissement d'environ 20 mm et une teneur en air de $4 \pm 0,5 \%$** .

A)



B)

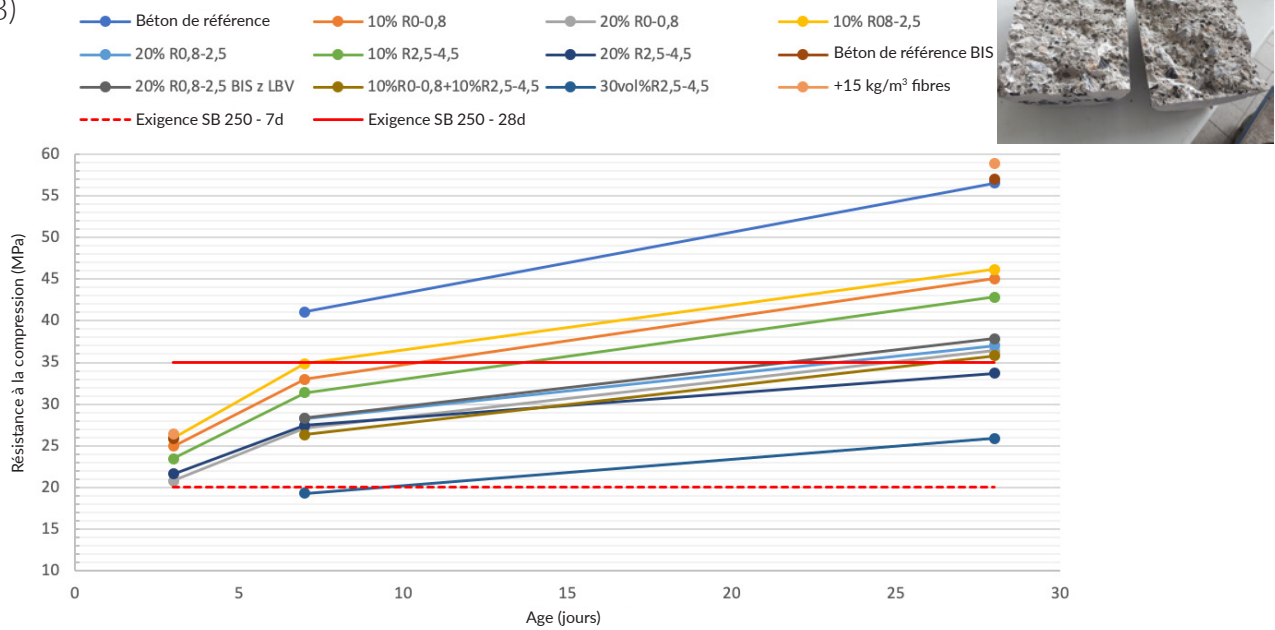


Figure 2 – (a) Évaluation des propriétés du béton frais par différentes méthodes pour assurer l'extrudabilité du mélange de béton pour barrières de sécurité; (b) Influence de l'incorporation de granulats de caoutchouc (R0-0,8; R0,8-2,5 et R2,5-4,5) sur le développement de la résistance à la compression (3, 7 et 28 jours). En haut: photo de la répartition des granulats de caoutchouc dans la matrice du béton

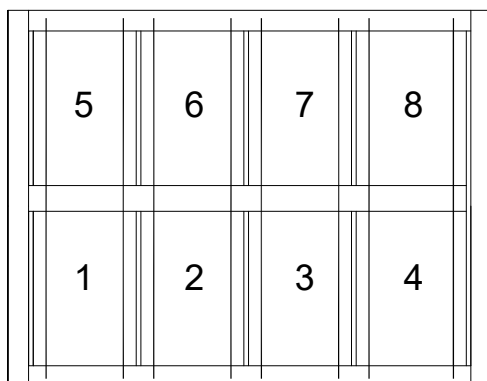
En outre, des combinaisons de différentes fractions de caoutchouc ont également été testées dans cette phase, où **à la fois une partie du sable et de la pierre concassée** a été remplacée (par exemple 10 % R0-0,8 + 10 % 2,5-4,5 et [5 % R0-0,8 + 5 % R0,8-2,5] + 10 % 2,5-4,5). Les huit mélanges testés ont donc tous satisfait à l'exigence de 35 MPa à ce stade.

Impact sur les propriétés du béton durci

À la suite de la phase précédente, **plusieurs «compositions de béton de caoutchouc» ont été mises au point en termes d'ouvrabilité et de perte acceptable de résistance à la compression**. Afin d'affiner la sélection avant de se lancer dans une étude plus complète des propriétés du béton durci, une sorte de tri a d'abord été effectué. Cette sélection concernait la valeur ajoutée potentielle des granulats de caoutchouc en termes d'absorption d'énergie lors d'une charge d'impact, comme indiqué dans la littérature, p. ex. (Atahan & Yücel, 2012).

Sélection de l'absorption d'énergie à l'impact

Pour cette phase, des essais ont été réalisés à l'aide de l'essai allemand à la plaque dynamique (*Light-weight deflectometer – LWD*) sur huit dalles de béton différentes, en utilisant différentes compositions de béton, comme illustré à la figure 3. Normalement, cet essai est uniquement appliqué aux matériaux de fondation pour déterminer le module de déformation dynamique $E_{v,d}$ (Kudla et al., 2012). Dans ce cas, cependant, la courbe de déflexion de la dalle peut être utilisée pour calculer la quantité d'énergie absorbée pendant la force d'impact dynamique due à la masse tombante (environ 7,07 kN).



← Hall d'essai

1. Mélange de référence
2. 10% R0,8-2,5 sans AEA
3. 10% R2,5-4,5 sans AEA
4. 15% R0,8-2,5 sans AEA
5. 15% R2,5-4,5 sans AEA
6. (5% R0-0,8+5% R0,8-2,5)+10% R2,5-4,5 sans AEA
7. 20% R0-0,8 sans AEA
8. 10% R0-0,8 + 10% R2,5-4,5 sans AEA

Figure 3 – Essais dynamiques à la plaque sur huit dalles de béton différentes pour évaluer le potentiel d'absorption d'énergie à l'impact

Sur la base de ces essais, cinq mélanges de béton ont été sélectionnés pour être testés dans une phase ultérieure:

- M1 = Béton de référence (sans caoutchouc);
- M2 = 10 % R0-0,8 + 10% R2,5-4,5 sans AEA;
- M3 = 15 % R2,5-4,5 sans AEA;
- M4 = 15 % R0,8-2,5 sans AEA;
- M5 = (5 % R0-0,8 + 5 % R0,8-2,5)+10 % R2,5-4,5; sans AEA.

Influence sur les propriétés du béton durci

Pour les compositions de béton sélectionnées, on a ensuite d'abord vérifié si les exigences concernant l'étude préliminaire pour le béton routier certifié selon le SB 250 (Vlaamse Overheid, AWV, 2021) pouvaient être satisfaites (tableau 2). En outre, l'impact du caoutchouc sur le module d'élasticité sous pression, la résistance à la flexion et à la traction par fendage, et le comportement de retrait ont également été étudiés.

	D _{max}	Teneur en ciment min.	Facteur E/C max	Résistance à la traction par flexion 28j	Résistance à la compression 28 j	Résistance à la compression 7 j	Résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage
Éléments linéaires	31,5 mm	≥ 350 kg/m ²	0,5	- (4 MPa pour BF)	40 MPa (air < 3 %) 35 MPa (air ≥ 3 %)	25 MPa (air < 3 %) 20 MPa (air ≥ 3 %)	Écaillage ≤ 3,00 kg/m ²

Tableau 2 – Exigences relatives au béton routier dans les barrières de sécurité (éléments linéaires) en Flandre (Vlaamse Overheid, AWV, 2021)

Tous les mélanges répondent aux exigences du tableau 2, sauf pour la résistance au gel-dégel pour M3: avec un écaillage moyen de 3,52 kg/m³, elle est légèrement supérieure à la limite. En outre, les résultats concernant la résistance à la flexion (perte moyenne de 20 % par rapport au béton de référence, mais toujours > 4 MPa), la résistance à la traction par fendage (pertes allant jusqu'à 40 % en fonction de la teneur en caoutchouc) et le module E (environ 30 GPa pour le béton de caoutchouc) présentent des valeurs acceptables. Ces observations sont également conformes à une étude antérieure (Aslani, 2016).

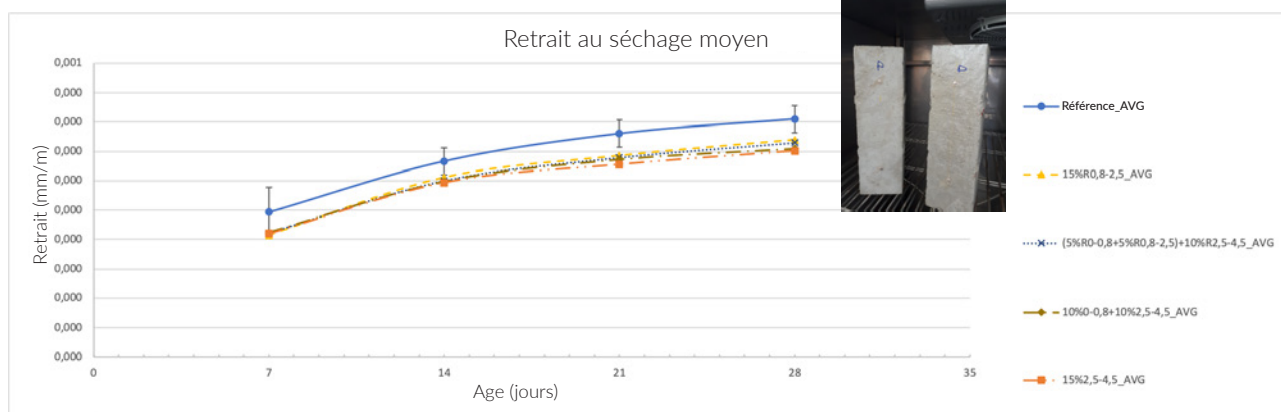


Figure 4 – Résultats du retrait au séchage en fonction du temps (résultats moyens pour trois prismes d'essai) de différents mélanges de béton de caoutchouc (ligne pleine = référence, lignes pointillées = béton de caoutchouc)

Enfin, un impact clair des granulats de caoutchouc sur le retrait au séchage est également visible, comme l'illustre la figure 4; **en moyenne, une réduction de 10-15 % est visible dans les valeurs de retrait** (en mm/m) à 28 jours, ce qui signifie qu'aucun problème spécifique n'est attendu ici non plus pour les compositions de béton de caoutchouc testées.

Charge d'impact et absorption d'énergie

Sur la base des essais mécaniques tels que décrits ci-dessus, les cinq mélanges ont également été testés pour leur comportement par rapport à la charge d'impact et leur valeur ajoutée potentielle pour l'absorption d'énergie. À cette fin, des essais d'impact ont d'abord été effectués sur des cubes d'essai de 15 cm de côté selon la procédure de (Snoeck et al., 2018)(figure 5).

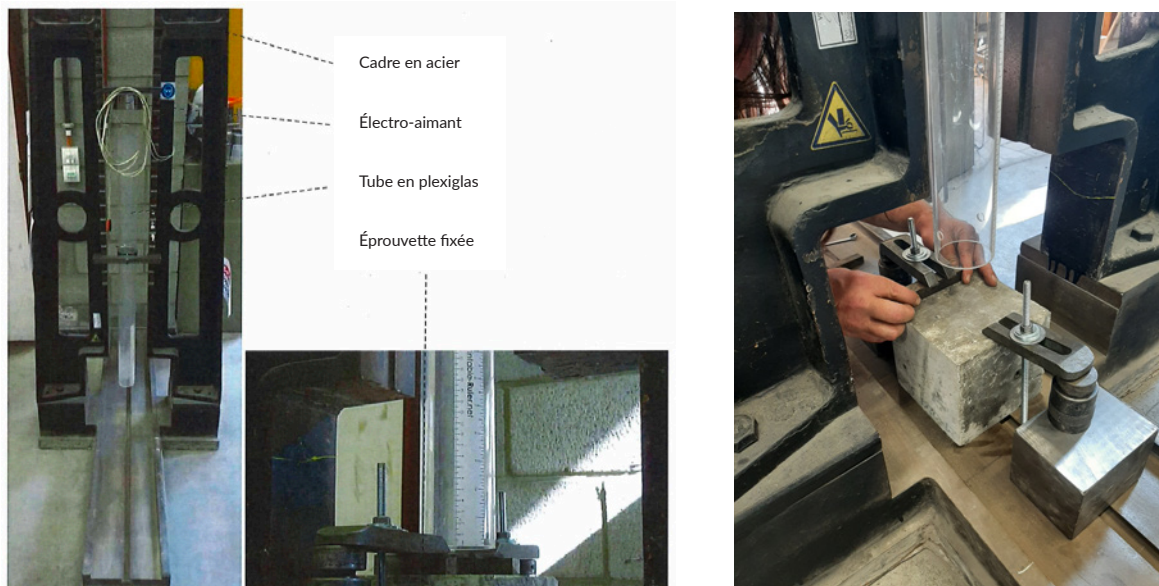


Figure 5 – Essais d'impacts sur des cubes de 15 cm de côté selon (Snoeck et al., 2018)

L'essai consiste à laisser tomber une bille d'acier de 1 kg d'une hauteur de 1 m sur la surface du cube. La hauteur de rebond est ensuite mesurée à l'aide d'une caméra pour mesurer le «coefficient de restitution» r_c :

$$r_c = \sqrt{h_r/h_i} \quad (1)$$

Avec: h_r = hauteur de rebond et h_i = hauteur initiale.

Plus la valeur de r_c est élevée, plus l'énergie est absorbée, et cette valeur a été déterminée lors d'impacts successifs sur les cubes d'essai. L'impact des granulats de caoutchouc était visible en moyenne, mais peu significatif et difficile à distinguer entre les différents mélanges de béton de caoutchouc.

Par conséquent, d'autres essais ont été réalisés avec un autre dispositif expérimental, comme le montre la figure 6 [adaptée de (Memon et al., 2020)]. Ici, des essais de chute avec une hauteur de chute ajustée de 20 cm sont effectués sur des éprouvettes prismatiques (75 x 75 mm² et une longueur de 50 cm) fixées au niveau des points d'appui. Cela a permis de déterminer différents paramètres dans une tentative d'évaluer la valeur ajoutée potentielle du béton de caoutchouc en termes de charge d'impact:

- déplacement maximal à chaque impact;
- nombre d'impacts jusqu'à la rupture de l'éprouvette;
- force de réaction maximale aux points d'appui;
- largeurs des fissures.

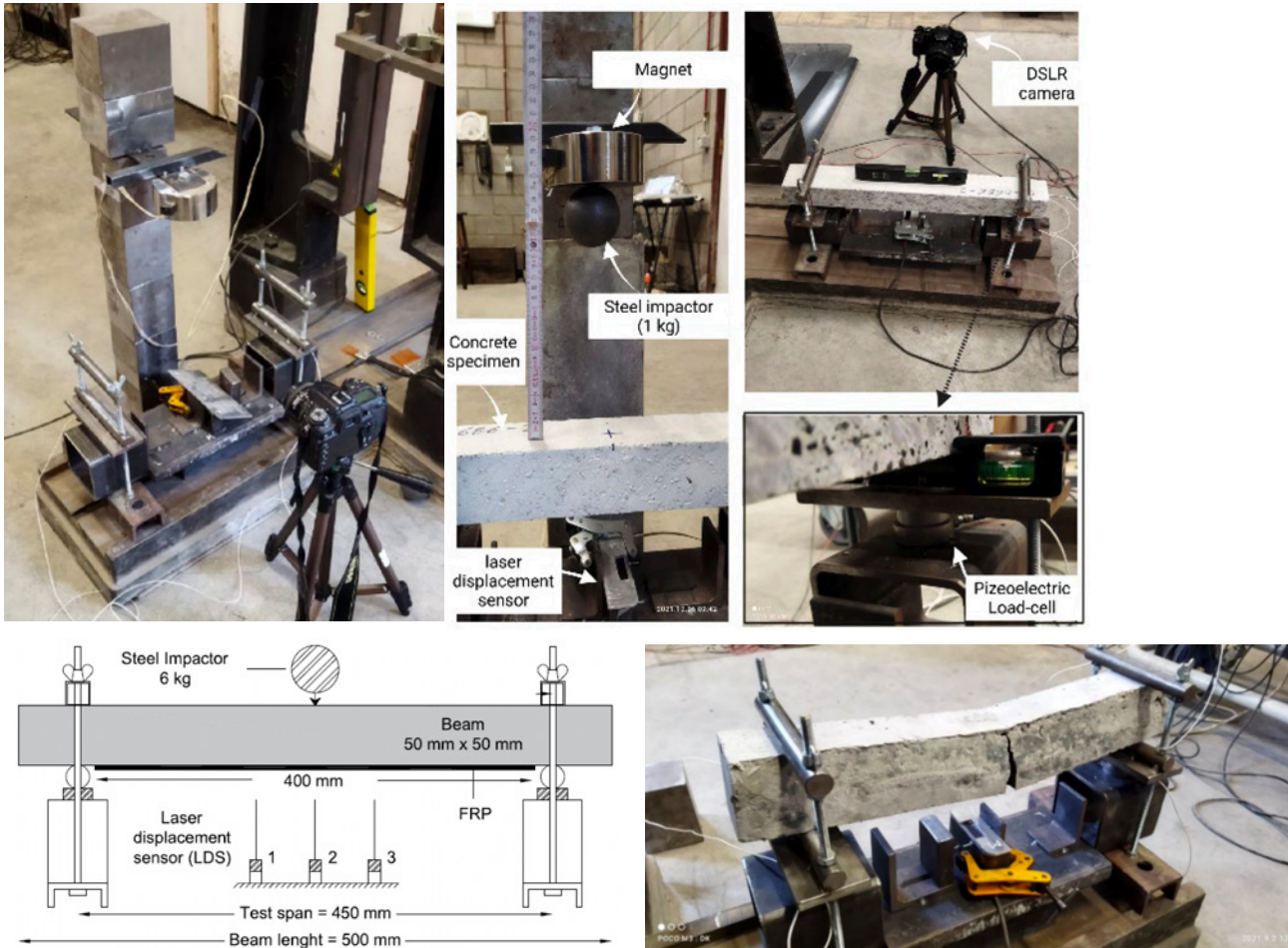


Figure 6 – Dispositif expérimental et instruments utilisés pour les essais d'impact sur des prismes de béton de $75 \times 75 \text{ mm}^2 \times 50 \text{ cm}$ (@Universitéit Gent)

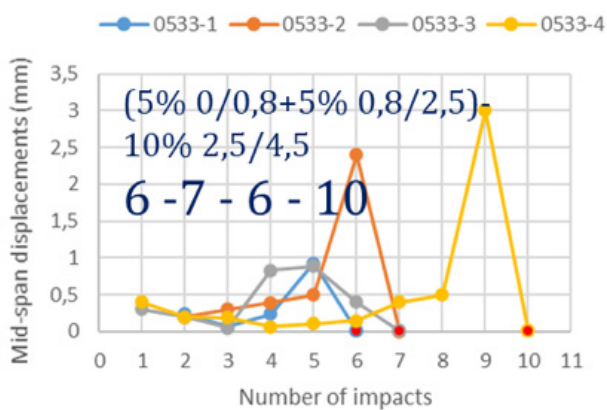
En résumé, plusieurs choses ont été observées pour ces essais d'impact (figure 7):

- une grande variation est visible dans les résultats;
- un nombre non uniforme d'impacts jusqu'à la rupture est mesuré pour chaque mélange de béton;
- les compositions de béton de caoutchouc présentent un déplacement plus important et donc un comportement plus ductile;
- une réduction progressive de la force de réaction est visible avec l'augmentation du nombre d'impacts, indiquant une plus grande absorption de l'énergie, et généralement une plus grande réduction est obtenue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc;
- la valeur initiale de la force de réaction varie légèrement en fonction du mélange de béton et de l'échantillon d'essai;
- des microfissures sont observées dans les mélanges de béton de caoutchouc et les déplacements maximaux peuvent être liés à l'initiation des fissures;
- les microfissures sont plus importantes dans le béton de caoutchouc M3 par rapport au M2.

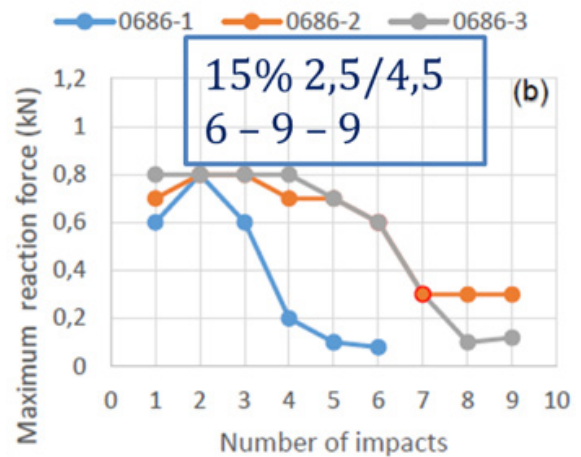
Il est donc nécessaire de procéder à une **interprétation plus globale** des résultats des essais, en utilisant trois paramètres clés:

- 1.+2. différence moyenne de la force de réaction maximale par impact par rapport à la valeur au premier impact: différence absolue (en kN) et relative (en %);
3. nombre moyen d'impacts jusqu'à ce que les différents échantillons d'essai cèdent (rupture).

A)



B)



C)

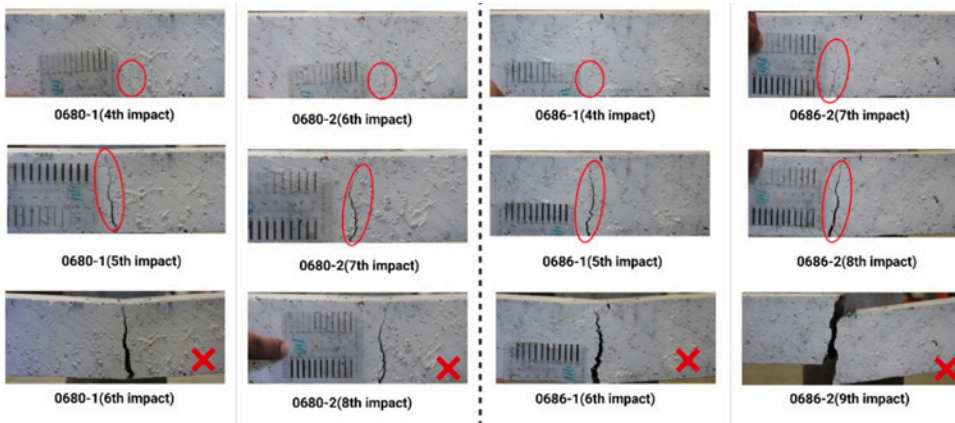
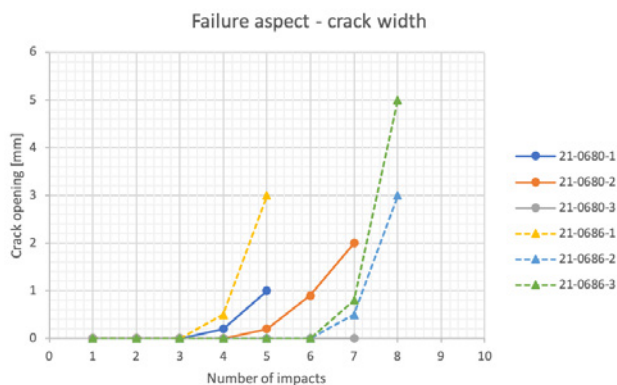


Figure 7 – Exemples de résultats obtenus à partir des essais de la figure 6: (a) déplacement central maximal en fonction du nombre d'impacts [mélange M5]; (b) force de réaction maximale aux points d'appui en fonction du nombre d'impacts [M3]; (c) évolution de la largeur de la fissure et mode de rupture [M2 & M3]

Sur la base de ce critère combiné de la plus grande réduction de la force de réaction avec un nombre plus élevé d'impacts jusqu'à la rupture, les compositions de béton de caoutchouc M3 (15 % R2,5-4,5) et M5 ([5 % 0-0,8 + 5 % 0,8-2,5] + 10 % 2,5-4,5) ont finalement été sélectionnées pour la phase finale de l'étude, avec le béton de référence M1. Le tableau 3 résume leurs performances mécaniques, utilisées comme données d'entrée pour les simulations (voir ci-dessous).

Mélange	Rc 28j [MPa]	Rt,fl 28j [MPa]	Densité [kg/m ³]	E _{C,s} [GPa]	Rt,sp 28j [MPa]
M1 (référence)	56,4 ± 1,6	6,26 ± 0,51	2382	41,2 ± 4,1	4,39 ± 0,21
M3	39,0 ± 1,6	5,00 ± 0,34	2316	32,2 ± 1,3	2,54 ± 0,26
M5	37,5 ± 1,4	5,02 ± 0,32	2268	34,5 ± 0,4	2,49 ± 0,25
remarque	sur cubes	flexion quatre-points	apparente	module d'élasticité	résistance au fendage

Tableau 3 – Propriétés du béton durci pour trois compositions de béton sélectionnées pour la phase finale (et encore en cours) du projet Rubost

Recyclabilité et aspects environnementaux

Outre les exigences performantielles du béton de caoutchouc étudiées dans le cadre de cette étude, la recyclabilité et la qualité environnementale sont également importantes dans le contexte d'une économie circulaire. Par conséquent, la deuxième (ou troisième en fonction de la perspective) vie du béton de caoutchouc broyé a également été étudiée en ce qui concerne la séparation entre le caoutchouc et le béton s'il était réutilisé comme granulats recyclés dans des applications d'ingénierie. En outre, les paramètres environnementaux, tant pour les matériaux de construction moulés que non moulés, doivent également être contrôlés selon le Vlarema (Vlaamse Overheid, 2012).

Recyclabilité du «béton de caoutchouc»

À cette fin, des essais à l'échelle du laboratoire ont été réalisés par le CRR en coopération avec notre partenaire Colas (figure 8) ainsi qu'un essai de classification normalisé selon l'Annexe I de la PTV 406 (COPRO, 2020) sur du béton de caoutchouc concassé et en utilisant le concasseur de laboratoire de Colas (figure 8a).



Figure 8 – Essais à l'échelle du laboratoire pour vérifier la recyclabilité du béton de caoutchouc: a) concasseur de laboratoire disponible chez Colas avec le béton de caoutchouc concassé obtenu; b) essais au CRR pour déterminer la proportion de particules de caoutchouc «libres» et «liées»

Tous ces essais montrent que le **granulat de béton recyclé (grossier) (> 4 mm) peut être utilisé en construction routière**, vu que la teneur en constituants non flottants est de 0,0 % (classe X1- selon la norme EN 933-11) (NBN, 2009)) et que la proportion de particules flottantes est inférieure à 3 cm³/kg de masse sèche (classe FL5-). Par conséquent, **l'application des granulats de caoutchouc dans le béton ne devrait pas poser problème si la valeur ajoutée peut au moins être démontrée**¹, et certainement en tenant compte des pourcentages de caoutchouc utilisés (< 5 % en masse dans notre cas). Cependant, des essais de lixiviation sur cubes d'essai ont également dû être effectués, comme mentionné ci-dessous.

Qualité environnementale

Pour vérifier «la deuxième et la troisième vie» des déchets de caoutchouc dans le béton, d'autres essais ont également été effectués sur des lots de mélange de béton M2 et M5:

- Disponibilité maximale et essai de diffusion sur cubes d'essai en béton selon CMA/2/II/A.9.3 en 9.2 = deuxième vie sur matériau de construction moulé (Vlaamse Overheid, Energie- en Milieuinformatiesysteem voor het Vlaamse Gewest [emis], 2020).
- Un essai en colonne sur matériau concassé selon CMA/2/II/A.9.1 = troisième vie sur matériau de construction non moulé.

Premièrement, les essais ont démontré que pour tous les métaux lourds testés, les **valeurs d'immission (en mg/m³.100 ans)** étaient **inférieures aux valeurs limites** selon l'Annexe 2.3.2.C du Vlarema flamand (Vlaamse Overheid, 2012) pour une utilisation dans les matériaux de construction moulés, même pour le zinc, qui posait encore des problèmes pour le matériau en caoutchouc pur (voir supra).

¹ Après discussion et concertation également avec l'Openbare Afvalstoffenmaatschappij (OVAM) en Flandre

Deuxièmement, les résultats de l'essai en colonne sur «béton de caoutchouc» concassé ont montré que tous les paramètres de lixiviation sont bien inférieurs aux limites indiquées à l'Annexe 2.3.2B de Vlarema (Vlaamse Overheid, 2012) pour la réutilisation en tant que granulats recyclés (matériau de construction non moulu), et également beaucoup plus faibles que le granulats de caoutchouc pur 2,5-4,5 mm.

Par conséquent, la **qualité environnementale du béton de caoutchouc est aussi parfaitement conforme à la réglementation en vigueur**, en raison de l'intégration dans la matrice du ciment et de l'effet de dilution, et convient donc à une application de ce point de vue.

Conclusions et perspectives

Dans le cadre du projet Green.er Rubost, le CRR étudie l'**utilisation potentielle et la valeur ajoutée des granulats de caoutchouc provenant des pneus usagés dans le béton coulé sur place pour barrières de sécurité**. L'étude est organisée en plusieurs phases. Ces phases concernent l'évaluation du matériau en caoutchouc pour une application dans du béton, l'impact sur les propriétés du béton frais, l'impact sur le béton durci et les avantages en termes d'absorption d'énergie sous charge d'impact et, pour terminer, la qualité environnementale des mélanges de béton résultants.

Jusqu'à présent, **divers mélanges de béton de caoutchouc ont été mis au point** pour répondre aux exigences conventionnelles (principalement mécaniques) selon les cahiers des charges types pour la construction routière, notamment la résistance à la traction et à la flexion, le module d'élasticité et le comportement au retrait. De surcroît, les aspects environnementaux et la recyclabilité ont également été examinés dans le contexte d'une économie plus circulaire, et la valeur ajoutée potentielle du caoutchouc lors des essais d'impact à l'échelle du laboratoire a également été clairement identifiée.

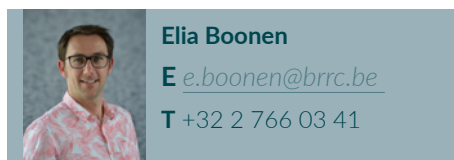
Dans la phase finale (et toujours en cours) du projet, nous visons à développer un **prototype de «barrière de sécurité en béton de caoutchouc»** à partir des deux compositions de béton de caoutchouc restantes. Sur la base de simulations numériques en plusieurs étapes et de la combinaison avec des essais d'impact physiques sur des «murets en béton de caoutchouc» (créés par le partenaire Colas), on tente d'obtenir plus d'informations sur le comportement des deux compositions de béton de caoutchouc. L'objectif n'est pas de réaliser des «essais d'impact réels» sur de véritables barrières de sécurité (selon la série de normes EN 1317 (NBN, 2002-2012)), mais plutôt des essais à plus petite échelle avec une voiture particulière afin de démontrer la valeur ajoutée du caoutchouc et de calibrer le modèle numérique pour simuler des essais d'impact standardisés. Par conséquent, si les résultats s'avèrent positifs, cette solution pourrait être commercialisée à l'avenir.



Figure 9 – Création de «dalles en béton de caoutchouc» à la centrale à béton de Colas à Zolder, qui seront utilisées pour les essais d'impact physiques avec une voiture particulière

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier notre partenaire Rubber Recycling Overpelt pour avoir fourni les matériaux en caoutchouc et d'autres informations utiles au cours de l'étude, ainsi que notre partenaire Colas pour sa collaboration pratique et son soutien pendant le projet. Nous adressons également nos remerciements au Fonds Green.er et à la Fondation Roi Baudouin pour leur soutien financier.



Elia Boonen

E e.boonen@brrc.be

T +32 2 766 03 41



Wietze Claesen

E w.claesen@brrc.be

T +32 2 766 03 44



Kris Redant

E k.redant@brrc.be

T +32 10 23 65 38

Bibliographie

Alam, I., Mahmood, U. A., & Khattak, N. (2015). Use of rubber as aggregate in concrete: A review. *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering (IJASGE)*, 4(2), 92–96.

Aslani, F. (2016). Mechanical properties of waste tire rubber concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering (JMCEE7)*, 28(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001429](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001429)

Atahan, A. O., & Sevim, U. K. (2008). Testing and comparison of concrete barriers containing shredded waste tire chips. *Materials Letters*, 62(21-22), 3754–3757. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.04.068>

Atahan, A. O., & Yücel, A. Ö. (2012). Crumb rubber in concrete: Static and dynamic evaluation. *Construction and Building Materials*, 36, 617–622. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.068>

Be-CERT. (2019). Codification des granulats conformes aux normes NBN EN 12620, NBN EN 13043, NBN EN 13139 et NBN EN 13242 (*Prescription Technique [PTV] No. 411, édition 2.5*). http://www.be-cert.be/documents/reglements-benor/granulats/ptv-411_nl_uitgave-2-4_bcg-21062018.pdf

- Bureau de Normalisation (2002-2012). *Dispositifs de retenue routiers* (NBN EN 1317-[1-5]).
- Bureau de Normalisation (2002+2008). *Granulats pour béton* (NBN EN 12620+A1). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12620-a1-2008_23722/
- Bureau de Normalisation (2009). *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques de granulats. Partie 11: Essai de classification des constituants de gravillons recyclés* (NBN EN 933-11+AC). <https://www.nbn.be/shop/fr/chercher/?src=t&k=933-11>
- Bureau de Normalisation (2010-2022). *Essais pour béton frais* (NBN EN 12350-[1-12]). <https://www.nbn.be/shop/fr/chercher/?src=t&k=12350>
- Bureau de Normalisation (2013+2021). *Béton: Spécification, performances, production et conformité* (NBN EN 206+A2). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-206-2013-a2-2021_28874/
- COPRO. (2020). *Prescriptions techniques pour granulats recyclés* (Prescriptions Techniques [PTV] No. 406, Version 9.0). <https://www.copro.eu/fr/ptv-406>
- Guo, Y., Zhang, J., Chen, G., & Xie, Z. (2014). Compressive behaviour of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fibre, subjected to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 72, 193–203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.036>
- Kew, H. Y., Cairns, R., & Kenny, M. J. (2004, September 14-15). The use of recycled rubber tyres in concrete. In M. C. Limbachiya & J. J. Roberts (Eds.), *Proceedings of the international conference on sustainable waste management and recycling: Used/post-consumer tyres*, London, UK (pp. 135–142). ICE Publishing. <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/upct.32866.0015>
- Koutselas, K., Neocleous, K., Angelakopoulos, H., & Pilakoutas, K. (2010, October 13-15). Specifications for the construction of steel fibre-reinforced roller compacted concrete roads. In *11th international symposium on concrete roads: The answer to new challenges*, Sevilla, Spain. European Concrete Paving Association (EUPAVE).
- 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). <https://www.fgsv-verlag.de/tp-bf-stb-part-b-8-3-e-pdf>
- Memon, D., Matthys, S., & Lecompte, D. (2020, November 22-24). Numerical analysis of small-scale concrete beams strengthened with CFRP under impact loading. In B. Zhao & X. Lu (Eds.), *Concrete structures for resilient society: 17th Proceedings of the FIB symposium 2020, Shanghai, China*. International Federation for Structural Concrete (FIB). <https://biblio.ugent.be/publication/8681747/file/8686576>

- Mohammadi, I., Khabbaz, H., & Vessalas, K. (2016). Enhancing mechanical performance of rubberised concrete pavements with sodium hydroxide treatment. *Materials and Structures (M&S)*, 49(3), 813–827. <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-015-0540-7>
- Pilakoutas, K. (Ed.). (2009). *EcoLanes: Economical and sustainable pavement infrastructure for surface transport: Publishable final activity report*. https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20120315_100620_30751_Publishable_Final_Activity_report-EcoLanes.pdf
- Pilakoutas, K. (2017). *Anagennisi: Innovative reuse of all tyre components in concrete* (Rapport final, version 1.7). <https://cordis.europa.eu/docs/results/603/603722/final1-final-report-v1-7.pdf>
- Research information digest 5: Granulated rubber. (2005). *Concrete*, 39(10), 6–8.
- Snoeck, D., de Schryver, T., & de Belie, N. (2018). Enhanced impact energy absorption in self-healing strain-hardening cementitious materials with superabsorbent polymers. *Construction and Building Materials*, 191, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.015>
- Turatsinze, A., Measson, M., & Faure, J. P. (2018). Rubberised concrete: From laboratory findings to field experiment validation. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(10), 883–892. <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1215688>
- Vlaamse Overheid. (2012). *VLAREMA: Besluit van de Vlaamse Regering tot vaststelling van het Vlaams reglement betreffende het duurzaam beheer van materiaalkringlopen en afvalstoffen* (Version 01/07/2022). <https://navigator.emis.vito.be/mijn-navigator?wold=43991>
- Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer. (2021). *Standaardbestek 250 voor de wegenbouw* (Version 4.1a). <https://wegenenverkeer.be/zakelijk/documenten/standaardbestek#250>
- Vlaamse Overheid, Energie- en Milieuinformatiesysteem voor het Vlaamse Gewest. (2020). *Compendium voor monsterneming en analyses van afvalstoffen en bodem (CMA)* (Partialement mis à jour). <https://emis.vito.be/nl/erkende-laboratoria/bodem-en-afvalstoffen-ovam/compendium-cma>