



Le CRR étudie les possibilités de valorisation pour les sables secondaires

Dans notre Newsletter CRR 15, nous évoquons déjà le projet RESANDAS (*Recycled Sands for Asphalt Mixtures*), dans le cadre duquel le CRR a mené une étude de faisabilité sur l'utilisation potentielle de différents types de sables recyclés ou secondaires dans les enrobés (Vansteenkiste & De Bock, 2024). Plusieurs autres études sur la réutilisation des sables recyclés et/ou artificiels dans la construction routière sont par ailleurs en cours, tant pour les applications géotechniques que pour le béton routier.

Introduction

Depuis plusieurs années déjà, le Centre de recherches routières est fortement impliqué dans la transition vers une économie plus circulaire, notamment avec l'utilisation de produits recyclés dans la construction de routes (en béton). A cet égard, des recherches approfondies ont déjà été menées par le passé sur l'application de granulats de béton et/ou de granulats mixtes dans un nouveau béton routier (Le recyclage dans la construction routière en béton, s.d.).

Plus récemment, l'accent est également mis sur l'utilisation potentielle de **sables recyclés**, issus notamment du concassage de granulats de béton, pour laquelle le CRR a déjà suivi des projets individuels et a lancé de nouvelles recherches en 2023:

- la recherche prénormative **Recysand** sur «l'utilisation de sable de concassage de haute qualité dans du béton prêt à l'emploi»;
- la recherche collective au niveau wallon **SARE4BE** sur la «valorisation des sables issus du recyclage du béton dans le béton»;

- le projet antenne-normes **ValoSaGe** relatif à la «valorisation des sables recyclés et artificiels en géotechnique routière ».

Ceci s'inscrit dans le cadre de la transition globale vers une économie circulaire qui constitue une priorité tant au niveau belge (Services Publics Fédéraux belges, 2024) qu'au niveau européen (European Commission, s.d.). En outre, le sable de construction naturel et de haute qualité est considéré comme un matériau de construction rare par les Nations unies dans leur rapport de 2022 (Peduzzi et al., 2022). L'Union européenne déclare également dans ses ambitions pour 2030 viser l'autosuffisance en matériaux de construction (Jiménez Beltrán & Requejo-Liberal, 2018).

Dans les lignes qui suivent, nous présentons les différents projets et donnons un bref état des lieux de ces recherches sur les possibilités d'application des sables secondaires dans la construction routière.

Recherche Recysand

Cette recherche prénormative (avec le soutien du NBN et du SPF Économie) vise à élargir le cadre normatif pour l'**application de sable de concassage de béton (de qualité supérieure)¹ dans le béton prêt à l'emploi**, en collaboration avec les partenaires de recherche Buildwise et CRIC-OCCN.



Figure 1 – Sable de concassage de béton «de qualité supérieure» provenant de la production de gravillons de béton de qualité supérieure A+

Le cadre normatif belge pour le béton, la NBN EN 206 (Bureau de Normalisation [NBN], 2013+2021) et la NBN B 15-001 (NBN, 2024), et les cahiers des charges types pour la construction routière (Bruxelles Mobilité, 2016; Service Public de Wallonie [SPW], Qualité & Construction, 2021 ; Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer [AWV], 2021) n'autorisent actuellement pas l'utilisation de sable secondaire dans le béton (routier), mais autorisent les gravillons recyclés (dits de type A+ et B+) sous certaines conditions (Centre de Recherches Routières et al. 2023).

¹ Le sable de concassage de béton est défini comme la fraction fine (sable de concassage) résultant du criblage, après le concassage de débris de béton de haute qualité et après le criblage préalable du sable de concassage.

La Flandre et la Wallonie produisent une quantité importante de granulats de béton², dont une partie³ est constituée d'une fraction de granulats fins (0-4 mm), qui ne trouvent pas pour le moment d'application à haute valeur ajoutée. Cependant, des projets individuels et des études ont démontré qu'il était possible de composer un béton de qualité avec du sable de concassage (BHE, 2023 ; Bouwprojecten met circulair beton, s.d.; Geschiktheid van secundaire inerte toestlagmaterialen, 2024; Vrijders et al., 2019). Depuis 2022, la norme NBN B15-105 (NBN, 2022a) permet aux producteurs d'évaluer l'aptitude à l'emploi de ces granulats, bien que cela implique des coûts et des délais considérables.

Etant donné que le sable de concassage de béton est la principale source de sable secondaire, et que sa production est décentralisée (> 260 unités de production [Van Schelvergem, 2024]), on peut affirmer que l'aptitude à l'emploi du sable de concassage de béton devrait être mieux étudiée au niveau collectif.

L'étude prénormative «Recysand» a donc pour objectif générique de réaliser une évaluation détaillée et pratique de l'utilisation du sable de concassage de béton de qualité dans le béton prêt à l'emploi (c'est-à-dire une «étude d'aptitude à l'emploi») afin d'élargir le cadre normatif belge existant pour le béton et les cahiers des charges types régionaux pour le béton routier.

La recherche est organisée en différentes étapes et phases, comme l'illustre également la figure 2:

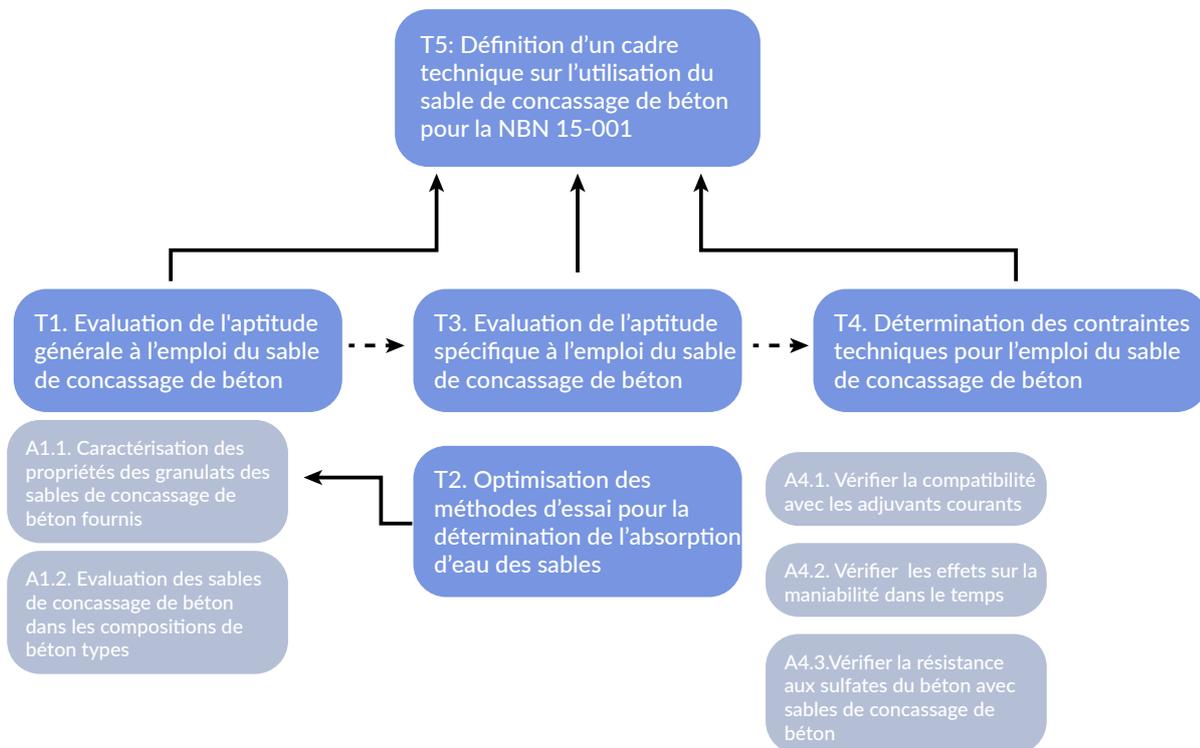


Figure 2 – Programme de recherche du projet Recysand (Source: Buildwise)

2 Rien qu'en Flandre, 6 670 kt de granulats de béton ont été produites à partir de déchets de construction et de démolition en 2018 = Données du Data Monitoringsysteem Duurzaam Oppervlaktedelfstoffenbeleid (MDO) (Vlaamse Overheid, Departement Omgeving, s.d.)

3 Environ 10 à 15 % concernent la fraction fine des granulats (< 4 mm ou < 6,3 mm) ou ce que l'on appelle le sable de concassage de béton (GroenBetonVert vzw, communication personnelle, 2023).

Dans une première phase, 11 sables de concassage de béton belges représentatifs ont été caractérisés en termes de propriétés géométriques, physiques et chimiques, avec une certaine répartition géographique. Sur la base des expériences à l'étranger (Bodet et al., 2018; van der Wegen, 2021), les propriétés critiques suivantes des granulats ont été déterminées sur les sables de concassage de béton:

- granulométrie (NBN, 2012);
- masse volumique et absorption d'eau (NBN, 2022b);
- valeur au bleu de méthylène (NBN, 2008);
- teneur en sulfates (sulfates solubles dans l'acide [NBN, 2013, §12]; sulfates solubles dans l'eau: [NBN, 2013, §10]);
- chlorures solubles dans l'eau (NBN, 2013, §7);
- impact sur la prise (NBN, 2007);
- réactivité potentielle Alkali-Silice (RAS; essai d'Oberholster sur mortier selon ASTM International, 2023).

Globalement, les résultats montrent (voir par exemple Tableau 1) qu'il existe une belle palette de sables de concassage de béton disponibles en Belgique (principalement en Flandre) avec une certaine variation des propriétés, la plupart des sables satisfaisant aux classes suivantes selon NBN, 2008:

- $D_{max} \leq 4 \text{ mm}$ & GF85 pour la granulométrie;
- $\rho_{rd} \geq 2 \text{ 100 kg/m}^3$ & WA24h $\leq 10 \%$
- teneur en fines = f10;
- MB $\leq 1,5$ (catégorie a selon BE-CERT, 2024);
- SS0.2 & CB pour la teneur en sulfates et en chlorures;
- A40 (impact sur la prise).

Sur la base des paramètres les plus critiques (granulométrie, finesse, masse volumique et absorption d'eau, voir tableau 1b), une **sélection de quatre sables de concassage de béton** (n° 3, 4, 5 et 6), deux sables «de qualité» et deux sables «de moindre qualité», a été effectuée pour des essais complémentaires au niveau du béton.

Dans un premier temps, les partenaires Buildwise et CRIC-OCCN vérifient l'aptitude **générale** à l'emploi dans les compositions de béton types avec 30 % de substitution volumique de sable selon les règles de la NBN B15-105 (NBN, 2022a). Ensuite, l'**aptitude spécifique à l'emploi** dans différents groupes de compositions de béton est également étudiée. Des premiers essais sont par exemple en cours au CRR avec l'intégration dans les compositions de béton routier des quatre sables de concassage de béton sélectionnés à trois taux de substitution différents (10, 20 et 30 %).

a

Numéro de sable	Valeur MB (g/kg)	SO ₄ dans l'eau (%)	SO ₄ dans l'acide	C ⁻ dans l'eau (%)	Impact sur la prise A
1	0,29	0,12	0,97	0,024	20
2	0,67	0,10	0,66	0,018	5
3	0,26	0,15	0,58	0,016	15
4	1,14	0,10	0,57	0,001	10
5	0,27	0,21	0,61	0,020	5
6	0,17	0,12	0,58	0,005	10
7	0,18	0,12	0,73	0,035	5
8	0,71	0,15	0,59	0,007	5
10	0,48	0,10	0,46	0,010	15
11	0,28	0,22	0,62	0,004	10
Moyenne	0,45	0,14	0,64	0,014	10
Ecart type	0,31	0,05	0,13	0,011	5
Critère	≤ 1,50	≤ 0,7	/	≤ 0,06	< ±40

b

Numéro de sable	Granulométrie	Fines (%)	prd (g/cm ³)	WA 24h (%)
1	0/4 GF 85	4,1	2,184	8,5
2	0/4 GF 85	8,2	2,197	8,3
3	0/4 GF 85	4,8	2,107	10,0
4	0/4 GF 85	9,0	2,249	7,0
5	0/4 GF 85	7,8	2,117	9,9
6	0/4 GF 85	3,1	2,117	7,6
7	0/4 GF 80	5,2	2,147	9,3
8	0/6,3 GF 85	5,1	2,231	7,1
10	0/2 GF 85	2,5	2,303	5,9
11	0/4 GF 85	6,4	2,134	9,1
Moyenne	NA	5,6	2,189	8,3
Ecart type	NA	2,2	0,063	1,4
Critère	0/4 GF 85	≤ 10	> 2,100	≤ 10

Tableau 1 – (a) Résultats des propriétés chimiques des sables de concassage testés dans Recysand; (b) Sélection des sables de concassage pour des essais ultérieurs au niveau du béton sur base des paramètres les plus critiques.

Parallèlement, dans la tâche 2, des méthodes d'essai alternatives sont recherchées pour déterminer l'absorption d'eau des sables recyclés; la méthode de la norme pour les sables naturels (NBN, 2022b, § 9) n'étant pas toujours fiable pour les sables contenant de très nombreuses particules fines (< 63 µm) et/ou des grains plus anguleux (Yacoub et al. 2018). Le CRR étudie dans ce cadre une technique basée sur la pesée hydrostatique (figure 3).

À un stade ultérieur (tâche 4, figure 2), l'interaction avec des adjuvants couramment utilisés (p. ex. entraîneur d'air, plastifiant) ainsi que l'influence sur l'ouvrabilité du béton seront également étudiées. En fin de parcours, l'objectif est donc de pouvoir adapter les normes et les cahiers des charges types pour l'utilisation de sable de concassage de haute qualité dans un nouveau béton (routier) sur la base de cette recherche prénormative (tâche 5).



Figure 3 – Méthode d'essai alternative pour déterminer l'absorption d'eau sur la base de la pesée hydrostatique

Projet SARE4BE

Cette recherche collective vise à accroître la valorisation des sables de recyclage en Wallonie dans des applications à haute valeur ajoutée («*upcycling*»), comme les revêtements routiers en béton et les bétons de structure. Elle est menée en partenariat avec Buildwise et l'Université de Liège (ULiège) avec le soutien financier du SPW (WIN4Collective).

Dans une première phase du projet, les sables recyclés disponibles en Wallonie ont été recensés et cartographiés sur le géoportail du CRR (figure 4).

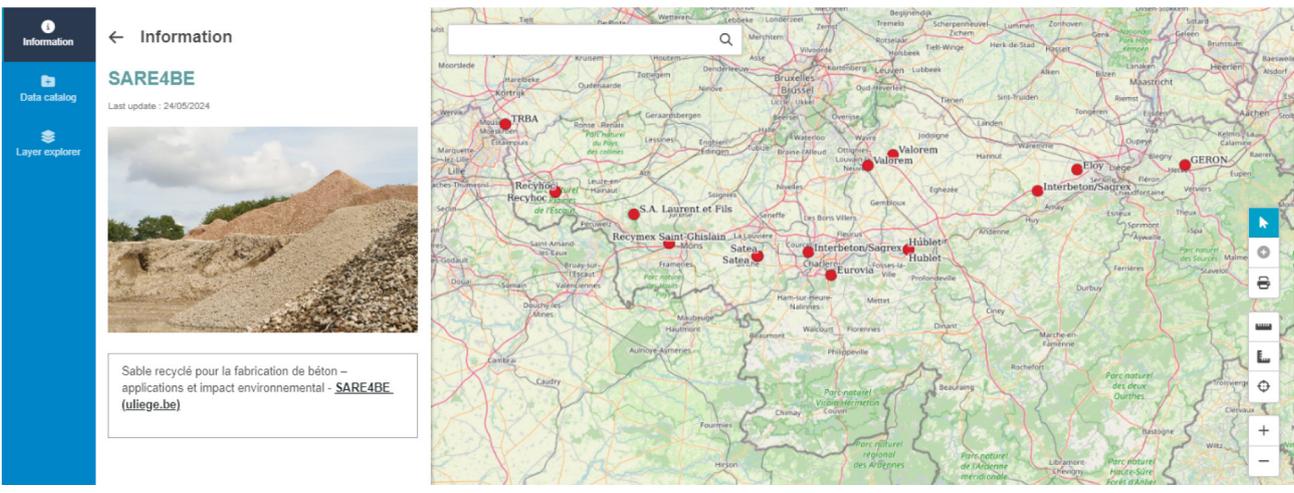


Figure 4 – Cartographie interactive des sables recyclés disponibles en Wallonie (Centre de recherches routières [CRR], 2024)

Parmi les sables recyclés ainsi recensés, plusieurs ont été prélevés afin d'évaluer leurs propriétés et leur variabilité. Bien que le projet soit principalement dédié aux **sables** de recyclage de **béton** (notés **B** dans les figures ci-dessous, par exemple figure 5), des sables issus du recyclage de matériaux **mixtes (M)** ou de mélanges **terre-cailloux (TC)** lavés ont également été intégrés à l'étude, la disponibilité en recyclés de béton étant limitée en Wallonie. En plus de ces sables issus de centres de recyclage wallons, d'autres sables de béton ont également été collectés: des sables provenant de déchets d'une usine de **préfabrication (BP)**, des sables d'une centrale à béton produisant déjà des gravillons à partir de **bétons de retour (BR)** ainsi que le sable d'un centre de recyclage en Flandre produisant des granulats de béton de haute qualité (**BA+**).

Les teneurs en fines et les absorptions d'eau mesurées sont représentées à la figure 6. On observe que les teneurs en fines sont limitées, en particulier pour certains matériaux lavés. Les absorptions d'eau mesurées sont assez variables, avec des valeurs s'étendant de moins de 2 % pour certains mixtes lavés à plus de 14 % pour le béton de retour.

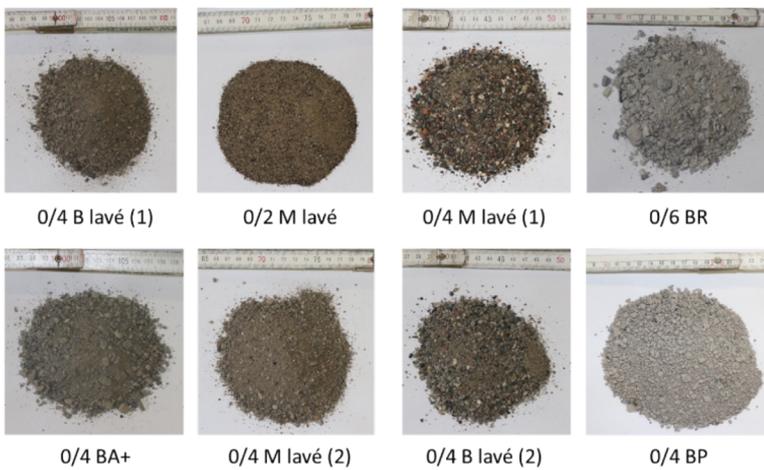


Figure 5 – Sables recyclés étudiés dans le cadre du projet SARE4BE

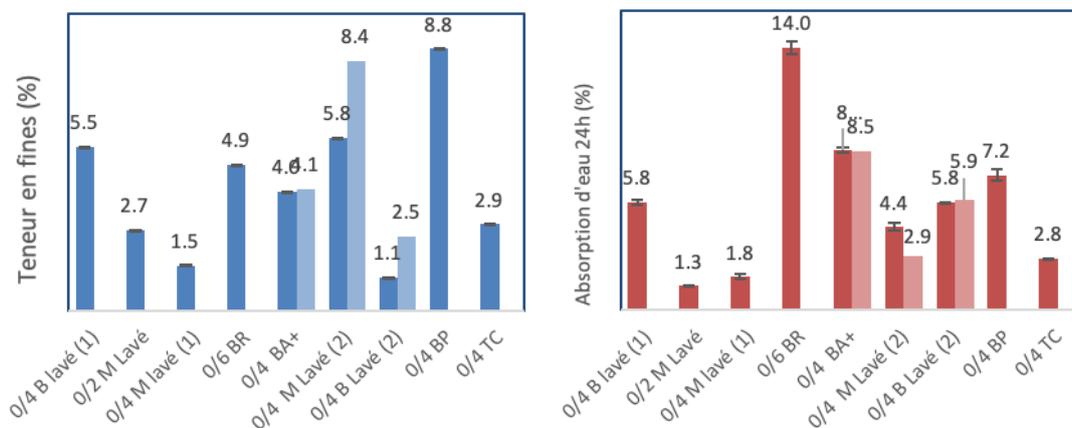


Figure 6 – Teneurs en fines et absorptions d'eau mesurées sur les sables recyclés

La troisième tâche du projet SARE4BE vise à tester en laboratoire les propriétés de bétons intégrant des sables recyclés, afin de déterminer des taux de substitution acceptables en fonction des propriétés du sable et du type de béton. Toutes les compositions ont été réalisées avec des granulats naturels, en veillant à conserver une courbe granulométrique globale proche de celle du béton d'origine et en ajustant la quantité d'eau de gâchage pour tenir compte de l'absorption d'eau plus élevée des sables recyclés.

Les essais sur les bétons routiers ont été réalisés au CRR, avec des mélanges conformes aux bétons pour réseaux I, II et III selon le CCT Qualiroutes. Les taux de substitution envisagés sont de 0 % (référence), 30 %, 50 %, 76/79 % et 100 % (en volume) de la fraction sableuse (0/4 mm). Le taux de substitution de 76/79 % correspond au remplacement total de la fraction du sable 0/4 (le sable fin 0/1 naturel étant alors maintenu dans la composition).

A titre d'exemple, la figure 7 montre les résultats obtenus en termes de résistance à la compression et résistance au gel/dégel en présence de sels de déverglaçage (slab test: CEN/TS 12390-9 (Comité Européen de Normalisation [CEN], 2016) sur un béton du réseau II (avec 375 kg/m³ de ciment, un E/C de 0,475 et l'utilisation d'un entraîneur d'air).

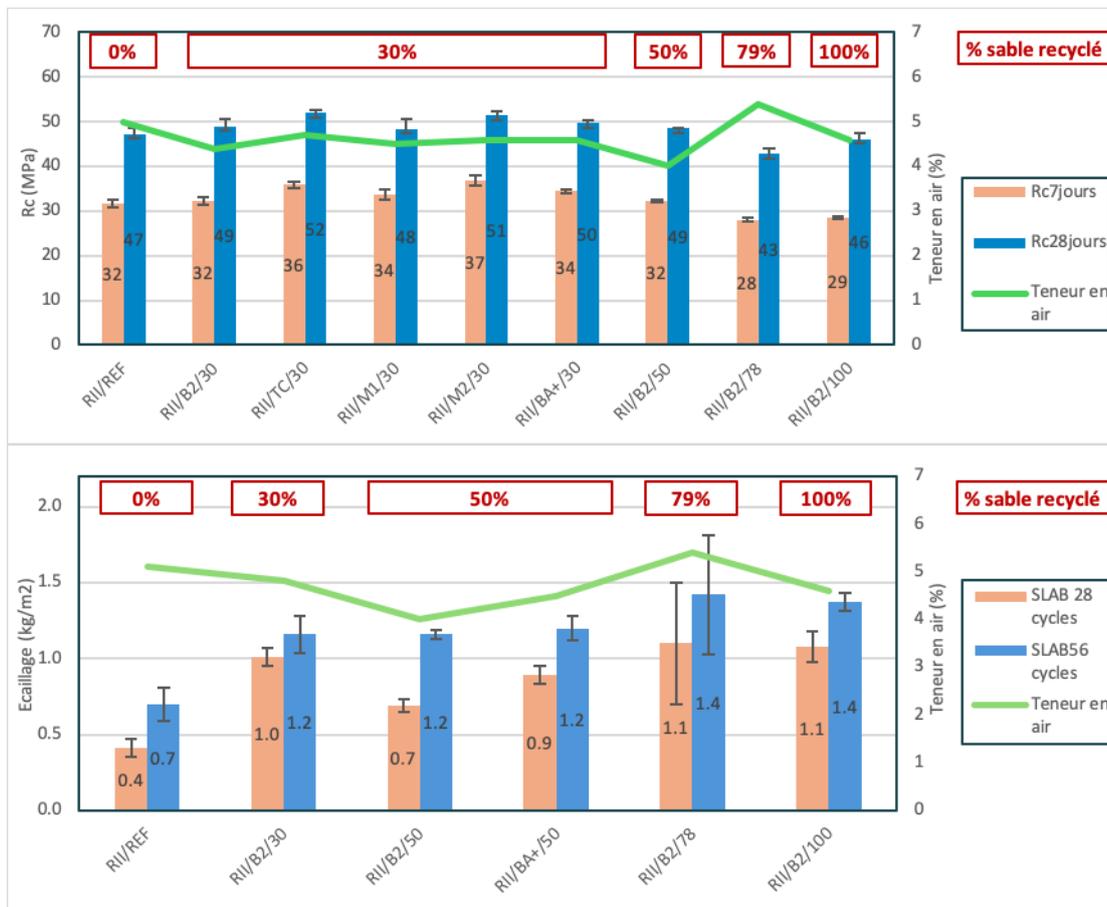


Figure 7 – Résistance à la compression à 7 et 28 jours et pertes de masse après l'essai slab test (gel-dégel) en présence de sels de déverglaçage selon la NBN B15-100 [NBN, 2018, §7.4.2.4] pour les bétons routiers réalisés avec les sables recyclés

Les résultats sur cubes laissent présager que la résistance à la compression des bétons sera globalement satisfaisante par rapport à l'objectif pour un réseau II qui est de 40 MPa à 90 jours sur éprouvette prélevée. Globalement, même à pourcentage élevé de substitution, on observe de faibles pertes de résistance. En ce qui concerne la résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage (slab test), on observe une diminution des performances à la suite de l'introduction de sables recyclés, mais les pertes demeurent largement inférieures aux 3 kg/m² à 28 cycles requis dans la version 4.1a du SB 250 (Vlaamse Overheid, AWW, 2021, §14 5.4.1.3) pour les bétons du réseau secondaire (« bouwklassen B6 à B10 »).

Les essais sur les bétons de structure ont quant à eux été réalisés chez Buildwise, avec des mélanges conformes aux classes d'environnement EE1 (pas de gel) et EE4 (gel et sels de déverglaçage). Comme pour les bétons routiers, les premiers résultats s'avèrent très prometteurs.

Les essais sur les bétons réalisés jusqu'ici dans le cadre du projet SARE4BE montrent qu'il est tout à fait possible de remplacer une fraction du sable naturel par du sable de recyclage de béton ou même potentiellement de mixte en produisant un béton conforme aux exigences techniques. Les bétons ainsi réalisés peuvent néanmoins présenter une diminution de certaines caractéristiques, qu'il faudra prendre en compte dans le choix des pourcentages de substitution autorisés en fonction de l'application.

Dans la dernière phase du projet, les observations faites en laboratoire seront validées sur le terrain, grâce à la mise en œuvre de planches d'essais réalisées avec des partenaires industriels. Celles-ci nous permettront également d'observer l'éventuel impact des sables recyclés sur la mise en œuvre des bétons. Pour finir, la pertinence écologique des solutions proposées sera étudiée en détail grâce à une analyse du cycle de vie réalisée à l'ULiège.

Projet ValoSaGe (Valorisation des sables recyclés et artificiels en géotechnique routière)

Ce **projet antenne-normes** d'une durée de 15 mois (jusqu'au 31 décembre 2024) a pour objectif de vérifier la faisabilité technique de la substitution partielle du sable naturel par des sables recyclés ou artificiels pour certaines **applications géotechniques routières** (fondations et drainage) en respectant des critères techniques, économiques et environnementaux. En complémentarité des projets Recysand et SARE4BE, le projet ValoSaGe ne considère pas les sables issus du béton. Initialement, il était prévu de se limiter aux sables recyclés mixtes et aux sables de mâchefers mais le projet s'est étendu à d'autres sables secondaires.

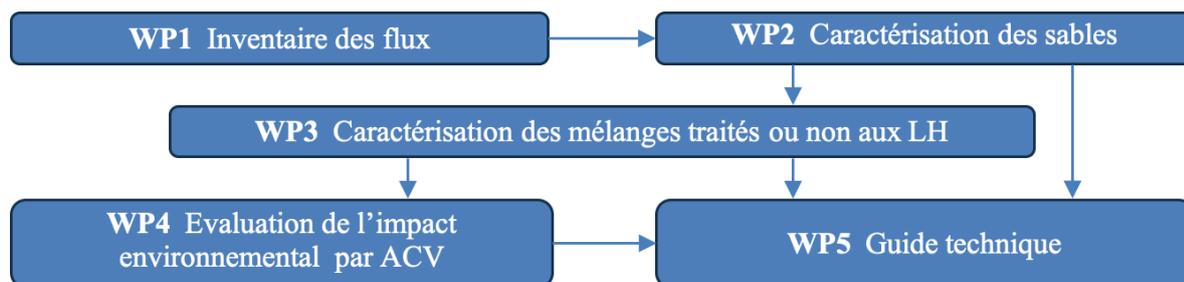


Figure 8 – Programme de recherche du projet ValoSaGe

Au cours des WP1 et WP2, 14 sables d'origines diverses ont été sélectionnés et caractérisés. Il s'agit de quatre **sables recyclés mixtes** lavés et non lavés, quatre **sables de mâchefers** issus de traitements différents, trois **sables physico-chimiques** dont un sable issu de sols pollués. Un **sable de verre**, issu des résidus de tris optiques et ne pouvant être recyclé dans l'industrie du verre, a également été caractérisé. Deux **sables de scories** ont été récemment fournis: un 0/2 et un mélange 60 % 0/6 et 40 % 0/2. Ils sont en cours d'analyse. Le tableau 2 reprend les quantités annuelles disponibles de ces différents sables. A l'échelle des producteurs, ces quantités restent limitées.

En Flandre et en 2023, les quantités de sables certifiés par COPRO sont de:

- 225 000 t de sables physico-chimiques (Desmet, 2024);
- 165 000 t de sables de concassage;
- 2 600 000 t de sables de criblage (Van Schelvergem, 2024).

Matériau	Quantité disponible	
Sable de matériaux pierreux 0/8	15 000 t/an	
Sable de concassage lavé mixte 0/4	10 000 t/an	
Sable recyclé mixte 0/8	5 000 t/an	
Sable lavé	400 t/jour	
Sable de mâchefers 1	30 000 t/an	
Sable de mâchefers 2	10 000 t/an	
Sable de mâchefers 3	5 à 15 000 t/an	
Sable de mâchefers 4	3 500 t/an	
Sable traité physico-chimique 0/2	-	
Sable traité physico-chimique 2/8	20 000 t/an	
Sable traité physico-chimique 0/2 (2)	35 000 t/an	
Sable de verre	10 000 t/an	
Sables de scories inox	100 000 t/an	

Tableau 2 – Sables recyclés étudiés dans le cadre du projet ValoSaGe

Les essais de caractérisation sont quasiment les mêmes que ceux des projets Recysand et SARE4BE, à l'exception des essais propres aux applications dans les bétons. Quelques perméabilités (à l'eau) ont aussi été mesurées suivant (Van Ganse, 1968).

Les résultats ont été comparés aux exigences du CCT Qualiroutes (SPW, Qualité & Construction, 2021) et du SB 250 (Vlaamse Overheid, AWW, 2021), voir tableau 3. Les couleurs du tableau 3 définissent si les exigences sont satisfaites (vert) ou pas (rouge). Les cases en jaune signifient que les spécifications sont respectées, à l'exception de la granulométrie (calibre maximum). Les cases blanches signifient qu'il manque certains paramètres pour évaluer l'acceptation (notamment la perméabilité).

	Sable ciment		Béton maigre		Sable de drainage	
	CCT Q	SB 250	CCT Q	SB 250	CCT Q	SB 250
Recyclé 0/8	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge
Recyclé M 0/4 L	vert	vert	rouge	vert	rouge	rouge
Recyclé M	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge
Recyclé M 0/4 L (2)	vert	vert	vert	vert	vert	jaune
Mâchefer 1	rouge	jaune	rouge	rouge	rouge	rouge
Mâchefer 2	rouge	vert	rouge	rouge	rouge	rouge
Mâchefer 3	rouge	vert	rouge	rouge	rouge	rouge
Mâchefer 4	rouge	vert	rouge	rouge	rouge	rouge
Sable traité phys.-chim 0/2	vert	vert	rouge	vert	blanc	rouge
Sable traité phys.-chim 2/8	vert	rouge	jaune	rouge	vert	rouge
Sable traité phys.-chim 0/2 (2)	vert	vert	vert	rouge	blanc	rouge
Sable de verre	jaune	rouge	jaune	rouge	jaune	jaune

Tableau 3 – Acceptation des sables recyclés basée sur les critères des CCT pour les applications géotechniques envisagées selon SPW, Qualité & Construction, 2021; Vlaamse Overheid, AWW, 2021

Pour l'application **sable-ciment**, les sables recyclés 0/8 et recyclés M ne satisfont pas aux exigences des CCT (teneur en fines et valeur au bleu trop élevées). Les sables de mâchefer ne satisfont pas au critère de la teneur en chlorures du CCT Qualiroutes. Cette exigence n'est pas requise dans le SB 250.

Pour l'application **béton maigre**, le sable recyclé M 0/4 L (2) satisfait aux exigences des CCT. Le recyclé M 0/4L et le sable traité physico-chimiquement 0/2 montrent une teneur en sulfates plus élevée que les exigences du CCT Qualiroutes mais ce critère n'est pas requis dans le SB 250. Le sable traité physico-chimiquement 0/2 (2) ne satisfait pas au critère granulométrique du SB 250.

Pour l'application **sable de drainage**, le sable recyclé M 0/4 L (2) et le sable physico-chimique 2/8 satisfont aux critères du CCT Qualiroutes mais pas aux critères granulométriques du SB 250. La perméabilité du sable physico-chimique 2/8 est de $1,07 \cdot 10^{-3}$ m/s et répond à l'exigence du CCT Qualiroutes ($5 \cdot 10^{-5}$ m/s). La courbe granulométrique du sable de verre ne répond pas aux exigences des CCT (calibre maximum trop élevé) mais sa perméabilité est néanmoins satisfaisante ($1,31 \cdot 10^{-3}$ m/s). Pour les sables physico-chimiques 0/2 et 0/2 (2), la perméabilité doit être mesurée afin de vérifier s'ils sont conformes aux exigences du CCT Qualiroutes.

Des formulations sable-ciment ont été effectuées sur plusieurs sables et deux mélanges de sables. Les éprouvettes ont été confectionnées à la teneur en eau optimale OPN, au préalable mesurée via l'essai Proctor (NBN, 2021). Chaque résultat constitue une moyenne obtenue sur trois éprouvettes (tableau 4). Le sable de verre ne contenant pas de fines, il n'a pas été possible de confectionner des éprouvettes.

Pour le sable de mâchefers 1,9 % de ciment CEM I ont été requis pour obtenir une résistance satisfaisante. Cela s'explique probablement par la présence de certains éléments chimiques (aluminium, zinc) limitant la prise du ciment. Les autres sables de mâchefers ont donné des résistances suffisantes avec 6 % de ciment CEM III.

Malgré leur non-conformité par rapport aux CCT, les sables recyclés 0/8 et M développent des résistances suffisantes avec 6 % de ciment.

Des mélanges ont été effectués à partir de sables recyclés et de sables physico-chimiques afin d'obtenir des courbes granulométriques conformes aux CCT. Les résultats des résistances pour le sable-ciment avec ces mélanges de sables, sont satisfaisants.

Dans le cadre du projet, une ou deux formulations de béton maigre vont encore être testées (WP3). L'analyse ACV est en cours de réalisation (WP4). Le rapport final reprendra non seulement les résultats techniques mais aussi les données environnementales.

	Conformité CCT	Rc7j OPN (MPa)	Rc28j OPN (MPa)
Sable recyclé M 0/4L	Oui	3,6	7,5
Sable recyclé 0/8	Non	5,3	9,0
Sable recyclé M	Non	5,4	9,3
Sable recyclé M 0/4L (2)	Oui	Pas mesuré	Pas mesuré
Mélange 50 % sable recyclé M 0/4L - 50 % sable recyclé M	Oui	5,4	9,9
Mélange sable phys. chim. 80 % 0/2 et 20 % 0/8	Oui	3,3	5,4
Sable de mâchefers 1 + 6 % CEM III	Non pour CCT Qualiroutes	0,29	-
Sable de mâchefers 1+ 6 % CEM I		0,59	-
Sable de mâchefers 1 + 9 % CEM I		2,9	7,0
Sable de mâchefers 2 + 6 % CEM III		6,3	9,3
Sable de mâchefers 3 + 6 % CEM III		5,2	7,5
Sable de mâchefers 4 + 6 % CEM III		4,3	6,4
Critère CCT (études préliminaires)			$R_{c,moy} \geq 3$ MPa (SB 250)

Tableau 4 - Résultats des résistances à la compression (Rc) sur éprouvettes sable-ciment

Suite et perspectives

Les trois projets réalisés au CRR visent à étendre l'utilisation des sables recyclés dans la structure routière. Les premiers résultats sont déjà très prometteurs pour développer des solutions qui:

1. permettent de limiter l'impact d'éventuelles pénuries de sable de construction naturelle;
2. réduisent l'empreinte carbone des chantiers routiers, surtout si l'utilisation de matériaux de qualité et recyclés peut contribuer à réduire les distances de transport (pour l'évacuation des déchets de construction et/ou l'acheminement de matériaux naturels).

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier les différentes parties pour leur soutien (financier) aux projets Recysand, SARE4BE et ValoSaGe, en particulier le Bureau de Normalisation (NBN), le Service public fédéral Économie (SPF Économie) et l'administration wallonne SPW - Direction Recherche (WIN4Collective). Nous remercions également nos partenaires de recherche dans les différents projets, les différentes parties prenantes des groupes de pilotage pour leur feedback utile, ainsi que les fournisseurs de matériaux.



Références

Aptitude à l'emploi des granulats inertes secondaires dans le béton: GRANISEC. (2024). Buildwise. [https://www.buildwise.be/fr/recherche-innovation/showroom-des-projets/aptitude-a-l-emploi-des-granulats-inertes-secondaires-dans-le-beton-granisec/](https://www.buildwise.be/fr/recherche-innovation/showroom-des-projets/aptitude-a-l-emploi-des-granulats-inertes-secondaires-dans-le-beton-granise/)

ASTM International. (2023). *Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (Mortar-bar method) (ASTM C126-23)*. <https://www.astm.org/c1260-23.html>

- BE-CERT. (2024). *Codification des granulats conformes aux normes NBN EN 12620, NBN EN 13043, NBN EN 13139 et NBN EN 13242* (Prescriptions Techniques BE-CERT No. PTV 411, édition 2.7). <https://extranet-materials.procetus.be/#/searchpage?tab=Documents>
- BHE. (2023, mars 24). *Les granulats de béton*. Beton. <https://beton.febe.be/fr/2023/03/24/les-granulats-de-beton/>
- Bodet, R., Colina, H., De Larrard, F., Delaporte, B., Ghorbel, E., Mansoutre, S. & Roudier, J. (Eds.). (2018). *Comment recycler le béton dans le béton: Recommandations du projet national RECYBETON*. Institut pour la Recherche Appliquée et l'expérimentation en Génie Civil (IREX). <https://www.pnrecybeton.fr/rapports/recommandations-recybeton/>
- Bruxelles Mobilité. (2016). *CCT 2015: Cahier des charges type relatif aux voiries en Région de Bruxelles-Capitale*. <https://mobilite-mobiliteit.brussels/sites/default/files/cct2015fr.pdf>
- Bureau de Normalisation (NBN). (2007). *Essais relatifs aux propriétés chimiques des granulats. Partie 6: Détermination de l'influence d'un extrait de granulats recyclés sur le temps de prise initial du ciment* (NBN EN 1744-6). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=172160&p40_language_code=fr&p40_detail_id=36228&session=21244690926627
- Bureau de Normalisation (NBN). (2008). *Granulats pour béton* (NBN EN 12620+A1). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=254386&p40_language_code=nl&p40_detail_id=52798&session=21244690926627
- Bureau de Normalisation (NBN). (2012). *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité: Analyse granulométrique par tamisage* (NBN EN 933-1). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=247088&p40_language_code=fr&p40_detail_id=65429&session=21244690926627
- Bureau de Normalisation (NBN). (2013). *Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats. Partie 1: Analyse chimique* (NBN EN 1744-1+A1). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=219550&p40_language_code=fr&p40_detail_id=68504&session=21244690926627
- Bureau de Normalisation (NBN). (2013+2021). *Béton: Spécification, performances, production et conformité* (NBN EN 206+A2). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=204035&p40_language_code=fr&p40_detail_id=120795&session=21244690926627
- Bureau de Normalisation (NBN). (2018). *Béton: Méthodologie pour l'évaluation et l'attestation de l'aptitude à l'emploi de ciments et d'additions destinés au béton* (NBN B 15-100). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=350216&p40_language_code=fr&p40_detail_id=113220&session=56964140425
- 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=56964140425

- Bureau de Normalisation (NBN). (2022). *Béton: Méthodologie pour l'évaluation et l'attestation de l'aptitude à l'emploi de matières premières inertes destinées au béton* (NBN B 15-105). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=354021&p40_language_code=fr&p40_detail_id=117610&session=21244690926627
- Bureau de Normalisation (NBN). (2022b). *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6: Détermination de la masse volumique et du coefficient d'absorption d'eau* (NBN EN 1097-6). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=197939&p40_language_code=fr&p40_detail_id=98649&session=21244690926627
- Bureau de Normalisation (NBN). (2024). *Béton: Spécification, performances, production et conformité: Complément national à la NBN EN 206 :2013+A2 :2021* (NBN B 15-001). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=2462228&p40_language_code=fr&p40_detail_id=531944&session=12844890234753
- Centre de Recherches Routières (CRR), Buildwise, Service Public de Wallonie (SPW), Environnement, Fédération des Producteurs des Granulats Recyclés (FEREDECO). (2023). *Guide technique pour l'utilisation des granulats recyclés en Wallonie* (Version 2.0). <https://www.granulatsrecycles.be/fr/guide-technique-pour-lutilisation-des-granulats-recycles-en-wallonie>
- Centre de recherches routières (CRR). (2024). SARE4BE. <https://geoportal.brcc.be>
- Comité Européen de Normalisation (CEN). (2016). *Essais sur béton durci. Partie 9: Résistance au gel dégel-dégel en présence de sels de déverglaçage (écaillage)*(CEN/TS 12390-9). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=212805&p40_language_code=fr&p40_detail_id=79363&session=12844890234753
- Des chantiers avec du béton circulaire*. (S.d.). Circular Concrete Center. <https://circularconcretecenter.be/fr/cases>
- Desmet, D. (2024). *Granulats traités physico-chimiquement: Marquage CE; Certification COPRO*. COPRO. <https://rapportchiffre2023.copro.eu/certification/certification-de-produits/granulats-traites-physico-chimiquement>
- European Commission (EC). (S.d.). *Circular economy action plan: The EU's new circular action plan paves the way for a cleaner and more competitive Europe*. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en
- Jiménez Beltrán, D. & Requejo-Liberal, J. (2018, September 2018). *Connected self-sufficiency: A building block for EU 2030 scenario?* Institute for European Environmental Policy (IEEP). <https://ieep.eu/news/connected-self-sufficiency-a-building-block-for-eu-2030-scenario/>
- Le recyclage dans la construction routière en béton*. (S.d.). Centre de Recherches Routières (CRR). <https://brcc.be/fr/expertise/expertise-aperçu/recyclage-construction-routiere-beton>
- Peduzzi, P., Reimer Lynggaard, J. & Chuah, S. (Eds.). (2022). *Sand and sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis*. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/fr/resources/rapport/sable-et-durabilite-10-recommandations-strategiques-pour-eviter-une-crise>
- Service Public de Wallonie (SPW), Qualité & Construction. (2021). *Cahier des charges type qualiroutes* (Geconsolideerde versie van 2021 [en de daaropvolgende aanpassingen]). <http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualiroutes/index.html>

- Service Public Fédéral Belge. (2024). *Economie circulaire*. Belgium.be. https://www.belgium.be/fr/economie/developpement_durable/economie_durable/economie_circulaire
- van der Wegen, G. (2021). *Beton met betongranulaat als fijn en/of Grof toeslagmateriaal: Toelaatbare vervangingspercentages zonder aanpassing van de constructieve rekenregels* (CROW-CUR Aanbeveling No. 137). CROW. <https://www.cur-aanbevelingen.nl/artikelen/cur-aanbeveling-127>
- Van Ganse, M.R. (1968). *Mode opératoire pour la mesure en laboratoire du coefficient de perméabilité des sables à saturation complète* (Méthode de Mesure CRR No. 31/68). Centre de Recherches Routières (CRR)
- Van Schelvergem, M. (2024). *Granulats recyclés: Certification COPRO/BENOR*. COPRO. <https://rapportchiffre2023.copro.eu/certification/certification-de-produits/granulats-recycles>
- Vansteenkiste, S. & De Bock, L. (2024). *Projet RESANDAS (Recycled sands for asphalt mixtures)*. Newsletter CRR, (15).
- Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer (AWV). (2021). *Standaardbestek 250 voor de wegebouw* (Version 4.1a). https://wegenenverkeer.be/zakelijk/documenten?documents%5B0%5D=type_document%3AStandaardbestek
- Vlaamse Overheid. Departement Omgeving. (S.d.). *Samenvatting van de cijfers uit het MDO*. <https://omgeving.vlaanderen.be/nl/samenvatting-van-de-cijfers-uit-het-mdo>
- Vrijders, J., Dooms, B., Jacobs, K., Andries, J.-P., Van Acker, L., Props, F., De Brabandere, P., Vanpoucke, E., Robbrecht, C., Boehme, L. & Vandevyvere, B. (2019). *Sand2Sand: Hoogwaardige toepassingen voor gerecycleerde zanden in beton: Overzicht van de resultaten en perspectieven*. https://www.circular-concrete.be/wp-content/uploads/2019/10/sand2sand_overzichtsartikel-c2-versie-online.pdf
- Yacoub, A., Djerbi, A. & Fen-Chong, T. (2018). *Water absorption in recycled sand: New experimental methods to estimate the water saturation degree and kinetic filling during mortar mixing*. *Construction and building materials*, 158, 164-471. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.023>