

PROJET INTERREG ENO

L'expérience wallonne de béton préfabriqué avec granulats recyclés

En Belgique où le statut de sortie de déchet est autorisé pour les granulats, différents acteurs se sont mobilisés dans le projet de recherche européen Seramco. Ils présentent ici les résultats obtenus avec des granulats recyclés de haute qualité utilisés dans la fabrication de béton préfabriqué.



© Tradecovall

En Belgique, un citoyen consomme 11 tonnes de matières par an, dont près de 5 tonnes de matières minérales (hors minerais métallifères), estime un rapport de l'OCDE (2021, [1]). En Europe, selon la Direction générale du marché intérieur, de l'industrie, de l'entrepreneuriat et des PME de la Commission européenne, le secteur de la construction consomme près de 50 % des matières extraites du sous-sol ([2]). Et selon Eurostat, les déchets du secteur de la construction/démolition représentent 37,1 % des 2 151 Mt de déchets d'activités économiques et ménagers soit 4,808 t par habitant (2020, [3]). Les chiffres concernant les pays du nord-ouest de l'Europe, parmi lesquels l'Allemagne, la Belgique, la France, le Luxembourg et les Pays-Bas, figurent dans le Tableau 1.

LA VALORISATION ET SES LIMITES

Bien qu'il existe un grand potentiel pour l'utilisation de matières premières secondaires provenant des

déchets de construction et de démolition, cette pratique présente encore des marges de progrès au niveau européen (objectif de 70 % en 2020 [4]). Les pays du nord-ouest de l'Europe sont à la pointe du recyclage de ces flux. Selon les pays, ces taux peuvent atteindre 95 %, là où le recyclage des déchets inertes - et non pas seulement la valorisation - est obligatoire.

Cependant, les opérateurs du secteur de la construction rencontrent aujourd'hui encore certaines difficultés pour valoriser les granulats recyclés. Cela est principalement dû au fait que le marché de ces granulats a tendance à se concentrer sur des applications de type "fondations" ou "sous-fondations" mais assez peu sur d'autres applications à plus haute valeur ajoutée. À ce titre, les "produits en béton" fabriqués à partir de matériaux recyclés restent à la marge. Le cadre législatif et les cahiers des charges n'étant pas toujours en ligne avec les objectifs d'une économie qui se veut de plus en plus circulaire, les

Granulats mixtes recyclés (4/20) en sortie de l'installation de lavage de Recymex Saint-Ghislain.

Tableau 1

	Mines et carrières	Industrie manufacturière	Énergie ¹	Eau ²	Construction et démolition	Autres activités économiques	Ménages
Allemagne	1,3	13,7	2	12,0	56,3	5,1	9,5
Belgique	0	20,9	1,5	31,4	30,5	7,9	7,8
France	0,1	7,1	0,4	8	67,6	6,3	10,7
Luxembourg	1,1	6,5	0,3	3,5	82,1	4,2	2,2
Pays-Bas	0,1	10,5	0,4	7,4	65,4	8,7	7,4

1. Électricité, gaz, vapeur, air conditionné (production, transport, distribution). 2. Captage, traitement et distribution d'eau, collecte et traitement des eaux usées, collecte, traitement et élimination des déchets, dépollution et autres services de gestion des déchets.

Déchets générés par les activités économiques et des ménages en 2020 dans les pays concernés pas le projet Seramco (en % du total des déchets produits) ([2]).

domaines d'application pour ce type de pratique restent relativement rares.

À des fins d'illustration des difficultés rencontrées, la dynamique de "sortie du statut de déchet" n'est pas harmonisée entre États membres. Comment envisager un usage "circulaire" dès lors que les cadres légaux des États voire des régions diffèrent ? Aussi, un travail de fond, technique et scientifique doit accompagner une telle démarche. Les qualités intrinsèques des ressources primaires présentent généralement l'avantage d'une faible hétérogénéité, contrairement aux granulats recyclés. Malgré cette contrainte, quel procédé envisager pour tirer le meilleur profit des ressources secondaires ? Pour autant que le contexte s'y prête, comment baliser techniquement et normativement l'usage de ces ressources avec comme ambition une maîtrise qualitative pour un usage plus diversifié ? On ne peut pas tout faire avec des granulats recyclés alors, quelles en sont les limites ?

Ces questions étaient au cœur du projet Seramco (*Secondary raw materials for concrete precast products*), ([5]), l'un des projets du programme de coopération Interreg Europe du nord-ouest (ENO).

LE PROJET SERAMCO

Initié en 2017, le projet de recherche Seramco avait pour objectif de substituer à des ressources primaires des matériaux recyclés issus de déconstructions. L'usage de ressources issues de l'économie circulaire permet en effet de limiter substantiellement les mises en décharge et de réduire l'impact carbone du secteur du BTP par une économie des ressources primaires et par un usage en circuits courts. La volonté était d'évaluer s'il est possible de valoriser des granulats recyclés de haute qualité issus de processus de déconstruction pour produire des bétons préfabriqués. Cette qualification de "haute qualité" est liée au processus de traitement choisi pour la production des granulats.

Pour atteindre ces objectifs, le projet Seramco avait pour mission :

- d'améliorer le tri des déchets de déconstruction et de démolition, une condition préalable à un recyclage réussi ;
- d'améliorer le processus de recyclage des granulats recyclés (constitués de déchets de béton et de déchets mixtes) ;
- de produire du ciment à base de sable recyclé ;
- de développer et tester de nouveaux mélanges de béton pour la production de produits préfabriqués en béton à partir de granulats recyclés ;
- de générer un cadre pour des opportunités commerciales maîtrisées pour la fabrication de produits préfabriqués en béton à partir de granulats recyclés.

Les livrables attendus du projet Seramco étaient la production de ciment et de produits préfabriqués en béton issus de granulats recyclés comparables aux produits conventionnels en termes de coûts et de qualité, et prêts à être commercialisés dans la partie nord-ouest de l'Europe. Cet exercice devait permettre d'évaluer la pratique en poussant la limite au plus haut degré de substitution pour en évaluer le potentiel réel.

La ville de Seraing, en région wallonne, fut l'un des sites pilotes de test des produits-finis. Et c'est à Mons, lors d'une journée technique organisée par la Société de l'industrie minérale (Sim), qu'ont été présentés les résultats du projet Seramco obtenus dans ce territoire de l'Europe de l'ouest.

CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

En matière de valorisation des déchets, les législations nationales et/ou régionales sont dérivées de la directive cadre européenne 2008/1998/CE relative aux déchets. Les autorités compétentes déclinent, en fonction de leurs ambitions respectives et de leur propre contexte, un cadre normatif qui précise les conditions de valorisation des déchets.

Le secteur du BTP, vu le volume conséquent de déchets qu'il génère, est soumis à de fortes contraintes pour assurer une meilleure circularité de ses "déchets-ressources". Dans le cas de la Belgique et plus précisément de la Wallonie, l'Arrêté du Gouvernement Wallon (AGW) "Sortie du statut de déchet" du 28 février 2019 précise notamment les conditions de valorisation des granulats recyclés issus du BTP. L'objectif premier de la mise en place d'une telle législation est de favoriser la valorisation et le recyclage de qualité dans un contexte d'économie circulaire.

Les conditions d'application de l'AGW "Sortie du statut de déchet" sont conditionnées par une application stricte et obligatoire des aspects normatifs techniques (CE2+) et environnementaux, contrôlés par un laboratoire accrédité.

Tous les déchets inertes du BTP sont concernés par cette obligation de l'AGW. Que ces déchets proviennent de centres de traitement autorisés ou directement de chantiers, cette obligation couvre tous les champs d'application dès lors que les déchets quittent le chantier de déconstruction/démolition. À ce titre, des granulats recyclés traités sur chantier et utilisés sur un autre chantier doivent obligatoirement répondre à cette double exigence normative (CE2+ et environnementale). D'où l'intérêt des centres de traitement qui sont accompagnés d'audits externes et de contrôles "qualité et environnement" réalisés par des acteurs accrédités.

MARCHÉ DES GRANULATS RECYCLÉS

Selon le plan Wallon des déchets [6], de 6 à 7 millions de tonnes de déchets inertes issus du BTP sont générées annuellement. Dans leur grande majorité ces flux sont actuellement valorisés en "fondations" et en "sous-fondations", tout en respectant les obligations de marquage CE2+ et de norme environnementale.

À ces exigences s'ajoutent celles pour les marchés publics. Il convient alors de se référer au cahier des charges de référence Qualiroutes ([7]). Il précise le pourcentage massique en différents types de granulats recyclés (voir Tableau 2 [8]), que l'on peut retrouver dans une catégorie définie de gravillons et débris de démolition et/ou de construction (voir Tableau 3).

La mise en œuvre du cadre normatif "Sortie du statut de déchet" fait que les techniques de production actuelles sont dopées pour tendre vers une valorisation plus qualitative et mieux maîtrisée et ce, malgré l'hétérogénéité des flux.

À l'inverse d'une carrière où le gisement est connu,

Tableau 3

Classification des granulats recyclés	Composants
Rc	Béton, produits et éléments en béton, mortier (c: <i>concrete</i>).
Ru	Granulats non liés, pierre naturelle, granulats traités aux liants hydrauliques (u: <i>unbound</i>).
Rb	Éléments en argile cuite (briques, tuiles, etc.), éléments en silicate de calcium, béton cellulaire non flottant (b: <i>brick</i>).
Ra	Matériaux bitumineux (a: <i>asphalt</i>).
Rg	Verre (g: <i>glass</i>).
X	Autres matériaux cohérents (argile, sol, etc.), divers métaux (ferreux et non ferreux), bois, matière plastique et caoutchouc non flottant, plâtre.
Fl	Matériaux flottants quels qu'ils soient, exprimés en cm ³ (Fl: <i>Flow</i>).

Nomenclature des granulats recyclés dans la réglementation belge selon leur composition (issue de [8] et reprise dans l'annexe NBN B 15-001 qui traite exclusivement du béton).

le recycleur doit en effet composer avec un flux de déchets relativement hétérogène. Ce flux est issu de la déconstruction de bâtiments, dont la nature évolue dans l'espace et le temps. Un bâtiment construit au début du XX^e siècle n'a pas la même composition qu'un bâtiment moderne. Tout comme un bâtiment construit et paré de briques rouges ne produira pas les mêmes déchets qu'un bâtiment produit en pierres de pays. Et si cette distinction est déjà possible à l'échelle wallonne, elle l'est encore plus à l'échelle européenne.

Toute la complexité du métier de recycleur réside dans la capacité à fournir en fin de processus un granulat répondant à un standard propre à l'utilisation souhaitée du granulat recyclé ([9]).

LES CATÉGORIES DE DÉCHETS DU BTP

En Wallonie, les déchets inertes de construction et de démolition sont composés en grande majorité de déchets mixtes de démolition et de déchets de béton (voir Graphique 1, [6]). Lorsqu'ils arrivent dans les centres de traitement de déchets inertes, ces déchets bruts peuvent être classés en différentes catégories sur la base d'un tri préalable effectué sur chantier lors de l'opération de démolition. Ces catégories sont :

Tableau 2

Composition (selon la norme NBN EN 3 242+A1: 2008)	Gravillons de débris de béton		Gravillons de débris mixtes		Gravillons de débris de maçonnerie		Gravillons de granulats recyclés d'enrobés hydro-carbonés	
	Teneur (% en masse)	Catégorie	Teneur (% en masse)	Catégorie	Teneur (% en masse)	Catégorie	Teneur (% en masse)	Catégorie
Rc	≥ 70	Rc ₇₀	≥ 50	Rc ₅₀	Non Requis (NR)	Rc _{NR}	NR	Rc _{NR}
Rcug (Rc + Ru + Rg)	≥ 90	Rcug ₉₀	≥ 70	Rcug ₇₀	< 30	Rcug Valeur déclarée	< 50	Rcug Valeur déclarée
Rb	≤ 10	Rb ₁₀₋	≤ 30	Rb ₃₀₋	> 70	Rb _{Déclarée}	≤ 10	Rb ₁₀
Ra	≤ 5	Ra ₅₋	≤ 5	Ra ₅₋	≤ 5	Ra ₅₋	≥ 50	Ra ₅₀₋
Rg	≤ 2	Rg ₂₋	≤ 2	Rg ₂₋	≤ 2	Rg ₂₋	≤ 2	Rg ₂₋
X	≤ 1	X ₁₋	≤ 1	X ₁₋	≤ 1	X ₁₋	≤ 1	X ₁₋
Fl	≤ 2	Fl ₂₋	≤ 2	Fl ₂₋	≤ 2	Fl ₂₋	≤ 2	Fl ₂₋

Différents types de granulats de débris de démolition et/ou de construction; extrait du cahier des charges type (CCT) Qualiroutes de la Région Wallonie (Réf.: [7]).

- les déchets de béton: ce flux est principalement composé de béton (armé ou non) et contient un maximum de 10 % de maçonneries;
- les déchets mixtes: ce flux provient des déchetteries, de recyparcs ou de travaux de démolition/déconstruction de bâtiments. Ces déchets mixtes sont composés d'un mélange de béton et de maçonneries. Ils peuvent contenir jusqu'à 50 % de matériaux < 10 mm;
- les déchets hydrocarbonés: ce flux provient essentiellement des travaux de raclage ou de démolition de surfaces asphaltées. Ce type de déchets ne présentait pas d'intérêt dans le cadre du projet Seramco car non valorisable dans ce contexte;
- les déchets inertes terreux: ce flux contient de 5 à 50 % de déchets inertes;
- le béton cellulaire: type de béton particulier actuellement peu ou pas recyclé en région wallonne, en raison de ses faibles propriétés mécaniques.

PRODUCTION DE GRANULATS RECYCLÉS

En Wallonie, chaque centre de traitement repose sur un procédé qui lui est propre. Ces procédés varient pour plusieurs raisons. La première est historique et dépendante de choix stratégiques. La seconde est liée aux adaptations mises en place pour répondre notamment aux demandes spécifiques de marchés locaux (par exemple des granulométries spécifiques).

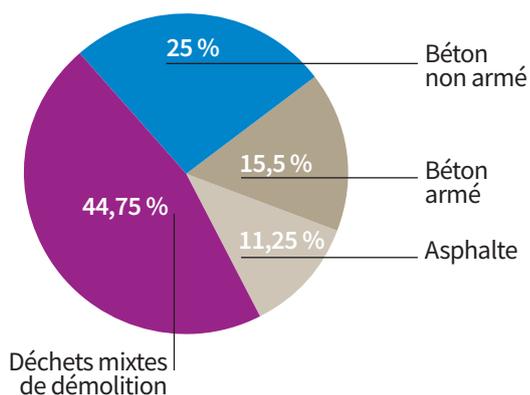
Ces traitements peuvent cependant être classés en deux grandes catégories: "par voie sèche" et "par voie humide".

Sur les sites de l'entreprise de traitement des déchets de construction en Wallonie Tradecowall (Recymex, Recynam et Valorem), il s'agit d'un procédé "par voie sèche". Il consiste en un criblage/concassage avec traitement des "légers" par soufflerie, tri manuel en cabine de tri, overband. Et, dans certains cas, en un traitement sous eau des fractions 20/63 mm pour aboutir à des fractions légères ou encore en un traitement à la chaux pour agréger les fractions fines argileuses et nettoyer les fractions supérieures à 10 mm.

Les flux issus de ce chaulage offrent un produit qualitatif pour un usage de "remblais".

Ce procédé "par voie sèche" génère une fraction de fines d'une granulométrie inférieure à 8 ou 10 mm selon le processus employé. Ces fines ont servi de substitution à l'argile naturelle dans le cru du cimentier Vicat, partenaire français du projet Seramco.

Graphique 1: Composition des déchets inertes issus de la construction et de la démolition en Wallonie ([6]).





© Ali Kheffi



© Julien Hubert

Installations de traitement par voie sèche (à g.) et par voie humide (à d.) dite "Seramco recycling plant" ; site Recymex Saint-Ghislain.

Dans le cadre de ce projet, un procédé de traitement "par voie humide" plus complet a également été mis en œuvre sur le site industriel de Recymex à Saint-Ghislain près de Mons (voir Graphique 2). Son objectif principal est de permettre une meilleure élimination des éléments indésirables (bois, plastique, particules fines, etc.) en utilisant de l'eau en circuit fermé.

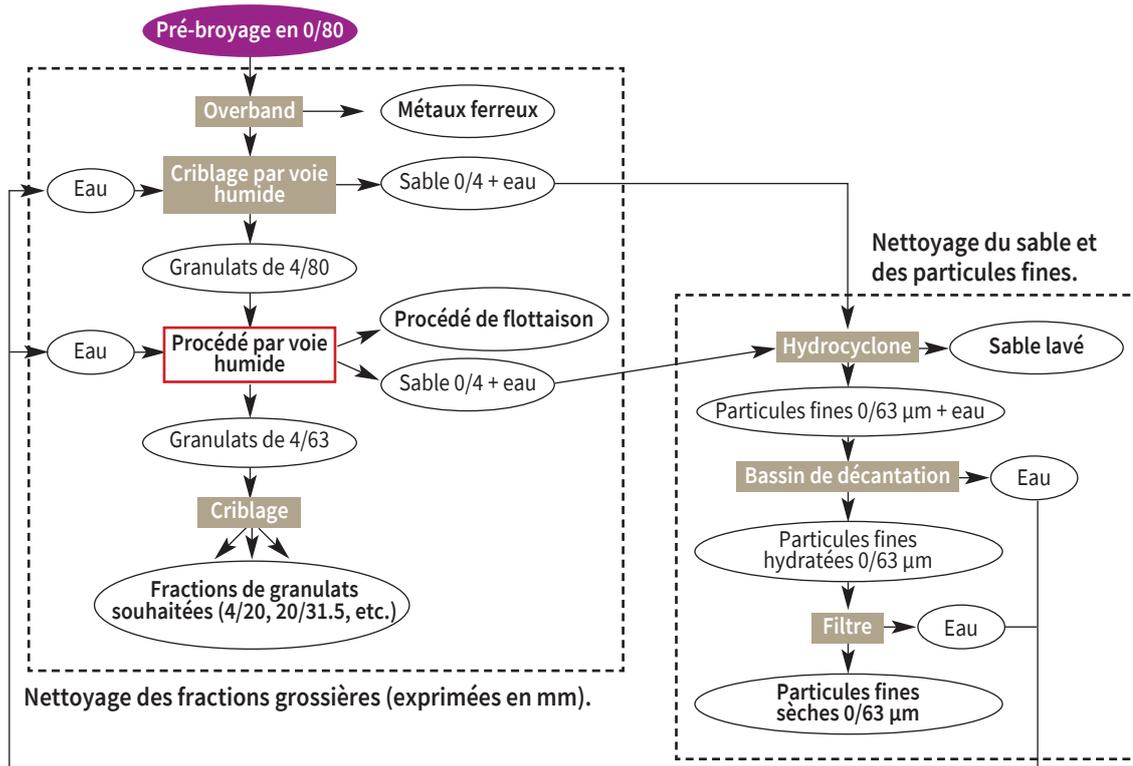
À leur sortie, ces deux types de procédés de traitement fournissent des granulats recyclés aux courbes granulométriques maîtrisées ainsi que divers sous-produits parfois moins évidents à valoriser, tels que :

- des particules fines issues du traitement des déchets de béton et de déchets mixtes (d'une granulométrie de 0/8 mm, 0/10 mm ou 0/20 mm selon le procédé employé) ;

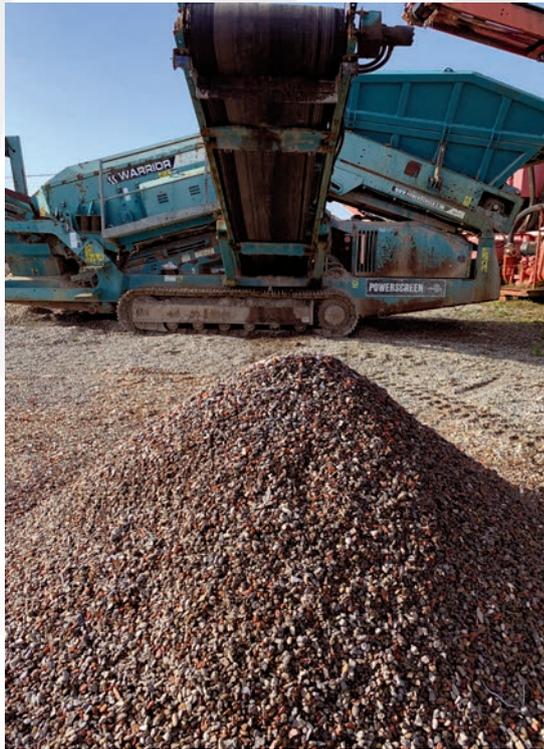
- des particules fines issues du pré-criblage de terres valorisables riches en inertes ;
- des boues (particules d'une granulométrie inférieure à 63 μm) issues du traitement "par voie humide" des déchets mixtes.

Les éléments indésirables tels que le bois ou le plastique sont, eux, envoyés vers les filières de recyclage légales.

Cette même logique s'est appliquée aux flux identifiés dans le cadre du projet Seramco en vue de leur utilisation dans le béton et le ciment, en s'assurant d'une part des bonnes propriétés physico-chimiques des flux sélectionnés et d'autre part de la viabilité économique des prétraitements mis en place (criblage / concassage / lavage par voie humide).



Graphique 2 : Du traitement des matériaux en mélange avec de l'eau à la production de matériaux triés : procédé de lavage par "voie humide" établi par Recymex Saint-Ghislain.



Granulats mixtes recyclés en sortie de l'installation de traitement par voie humide de Recymex Saint-Ghislain.

© Tralécovall

Les granulats recyclés utilisés pour la fabrication d'éléments préfabriqués en béton dans le cadre du projet Seramco ont été produits sur le site Recymex Saint-Ghislain après donc un procédé de traitement "par voie humide". Selon l'expertise de la société Prefer, la construction d'éléments préfabriqués en béton nécessite l'apport de granulats présentant des courbes granulométriques serrées, au grand "D" (diamètre maximal) et au petit "d" (diamètre minimum) beaucoup plus proches que pour des utilisations traditionnelles en génie civil. Par conséquent, quatre fractions

de granulats recyclés lavés ont ainsi été retenues : 2/6, 6/10, 10/14 et 14/20 mm. Ces granulats recyclés proviennent de déchets de béton mais surtout de déchets mixtes.

BASE NORMATIVE

Le projet Seramco avait pour ambition d'atteindre des critères de qualité béton similaires à des produits composés de matériaux naturels, en suivant comme "base environnementale" l'AGW "Sortie du statut de déchet" et comme ligne directrice la norme NBN EN 12620 "Granulats pour béton" ([10]). Bien qu'inadaptée à la substitution d'une fraction de granulats naturels par des granulats recyclés pour une utilisation dans des bétons, elle sert de cadre réglementaire.

Cette norme s'appuie sur la nomenclature réglementaire des granulats recyclés (voir Tableau 3). Elle définit différentes caractéristiques physiques, mécaniques ou chimiques spécifiques des granulats pour béton :

- Fl: coefficient d'aplatissement;
- f: teneur en fines;
- LA: coefficient de Los Angeles (résistance à la fragmentation);
- SS: sulfates solubles dans l'acide;
- A: modification du temps de prise.

En Belgique, le cadre normatif applicable pour les granulats recyclés (d'une granulométrie $d > 4$ mm) est la norme NBN B 15-001 : 2018 Béton – Spécification, performances, production et conformité – Complément nationale à la NBN EN 206. Cette norme est l'annexe nationale définissant les condi-

Tableau 4

	Classes Environnement		
	E0, E1, EE1	EE2, EE3, ES1, ES2, ES3, EA1	EE4, ES4, EA2, EA3
Granulats recyclés de béton (type A+)	50 %	20 %	0 %
Granulats recyclés mixtes (type B+)	20 %	0 %	0 %

Taux de substitution maximum pour des bétons non-armés (% en volume) [8].

Tableau 5

	Classes Environnement			
	E1	EE1	EE2, EE3, EA1	EE4, ES1, ES2, ES3, ES4, EA2, EA3
Granulats recyclés de béton (type A+)	30 %	30 %	20 %	0 %
Granulats recyclés mixtes (type B+)	20 %	0 %	0 %	0 %

Taux de substitution maximum pour des bétons armés (% en volume) [8].

tions d'application en Belgique de la norme NBN EN 206 : 2013+A1 : 2016 des granulats entrants dans la composition de produits préfabriqués en béton et des bétons routiers.

L'annexe NBN B 15-001 définit les critères que doivent respecter les déchets de béton, dits de type A+, et les granulats de déchets mixtes, dits de type B+.

Critères des granulats de type A+ :

- granulométrie : $d \geq 4 \text{ mm}$, $D \geq 10 \text{ mm}$;
- composants : Rc_{90} , Rcu_{95} , $Ra_{1,2}$, $XRg_{0,5}$ et FL_2 ;
- caractéristiques : FL_{20} , $f_{1,5}$, LA_{35} , $SS_{0,2}$, A_{40} ;
- masse volumique minimale : $2\,200 \text{ kg/m}^3$;
- taux d'absorption d'eau maximale : 10 %, avec une variation maximale de $\pm 2 \%$;
- utilisation dans des bétons de classe de résistance : $\leq C30/37$.

Critères des granulats de type B+ :

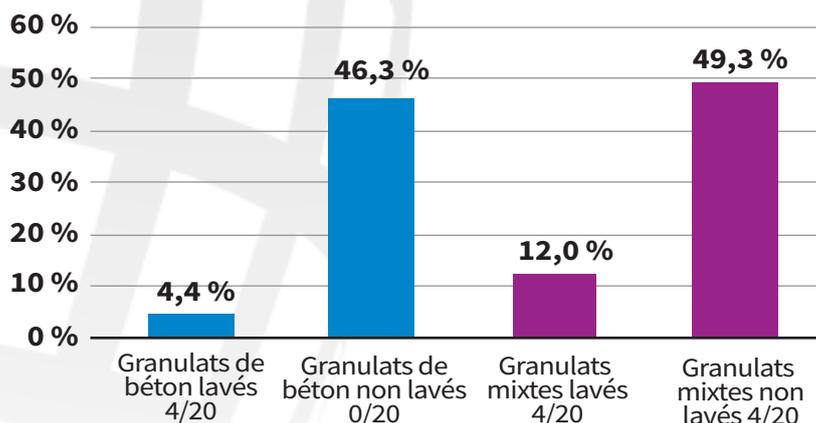
- granulométrie : $d \geq 4 \text{ mm}$, $D \geq 10 \text{ mm}$;
- composants : Rc_{50} , Rcu_{70} , Rb_{30} , $XRg_{0,5}$, FL_2 ;
- caractéristiques : FL_{50} , LA_{50} , $SS_{0,2}$, A_{40} ;
- masse volumique minimale : $1\,700 \text{ kg/m}^3$;
- taux d'absorption d'eau maximale : 15 % avec une variation maximale de $\pm 2 \%$;
- utilisation dans des bétons de classe de résistance : $\leq C25/30$.

Selon cette même annexe NBN B 15-001, les granulats de type A+ et B+ sont autorisés à l'incorporation dans du béton à des taux de substitution variables selon la "classe d'environnement" d'usage et, dans tous les cas, avec un pourcentage volumique maximum de 50 %. En outre, ces taux de substitution varient selon qu'il s'agisse d'une incorporation dans du béton armé (voir Tableau 4) ou dans du béton non armé (voir Tableau 5).

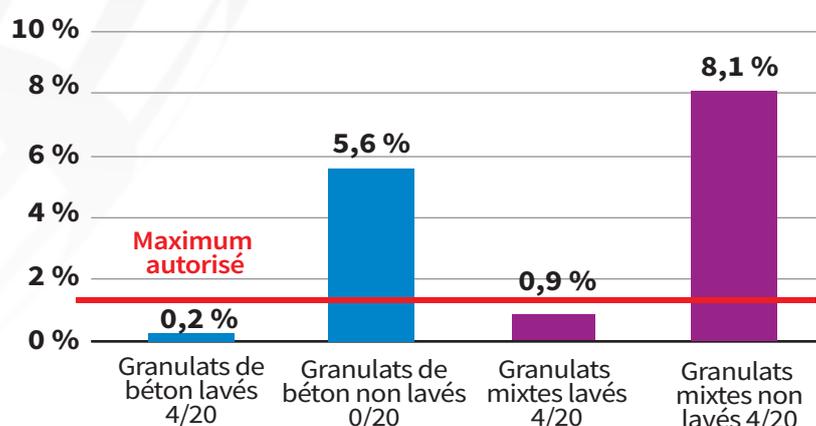
MODES DE TRAITEMENT ET RESPECT DE LA NORME

Le lavage "par voie humide" permet de diminuer significativement la fraction "sableuse" des granulats – jusqu'à 30 à 40 % (voir Graphique 3), mais également la teneur en particules fines d'une granulométrie $< 63 \mu\text{m}$ (voir Graphique 4). Dans le cadre du projet Seramco, la fraction fine en sortie de traitement "par voie humide" fut systématiquement inférieure à 1 % et, par conséquent, la norme respectée ($f < 1,5 \%$).

Ces bons résultats sont également confirmés sur les éléments flottants : bois, plâtre, argile, etc. En effet, par rapport à un traitement "par voie sèche", le traitement "par voie humide" a permis la réduction d'au moins 50 % de cette fraction pour, au final, en avoir moins de $2 \text{ cm}^3/\text{kg}$; permettant le respect systématique des valeurs normatives (voir Graphique 5).



Graphique 3 : Fraction sableuse (granulométrie $< 4 \text{ mm}$) des granulats recyclés de béton et mixtes lavés et non lavés (Réf. : [15]).

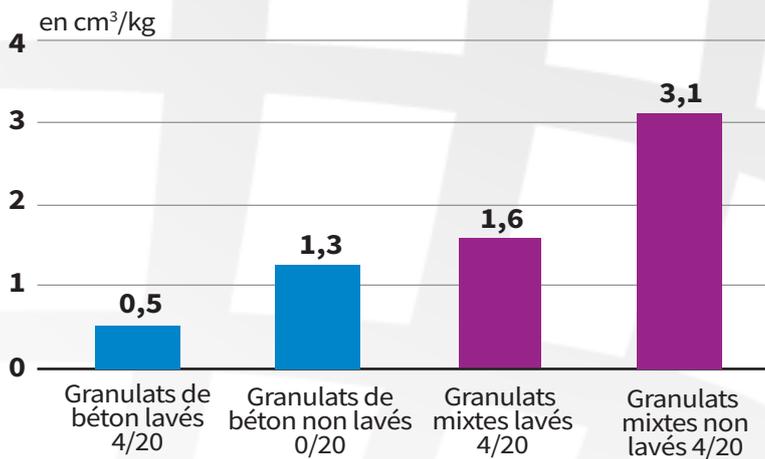


Graphique 4 : Teneur en particules fines ($< 0,63 \text{ mm}$) des granulats recyclés de béton et mixtes lavés et non lavés (Réf. : [15]).

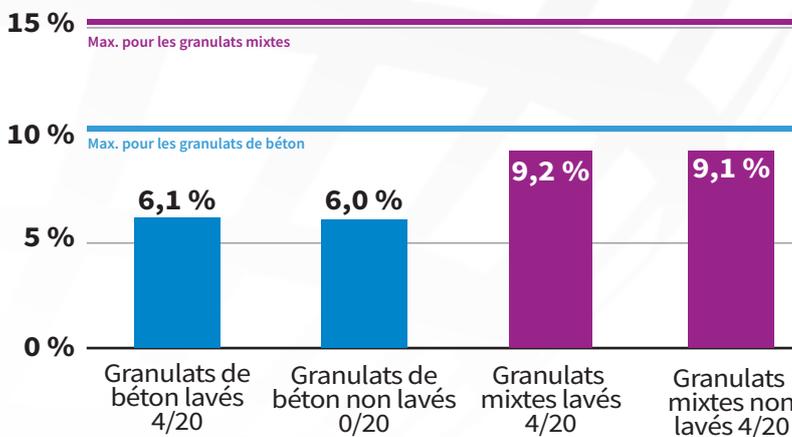


Tas de déchets flottants retirés des déchets inertes après traitement par voie humide (Recymex Saint-Ghislain).

Concernant le taux d'absorption maximale d'eau, le projet Seramco a montré qu'elle n'est pas ou très peu influencée par un traitement "par voie humide" (voir Graphique 6). Toutes les fractions analysées, de type A+ ou B+ lavées par voie sèche ou humide, ont répondu au critère normatif ($< 10 \%$). Concernant le coefficient de Los Angeles (LA), le lavage "par voie humide" n'a pas eu d'effet significatif (voir Graphique 7). Pour les échantillons de déchets de béton, il était à la limite de 35 % (valeur



Graphique 5 : Teneur en éléments flottants en cm³/kg des granulats recyclés de béton et mixtes lavés et non lavés (Réf. : [15]).



Graphique 6 : Taux d'absorption d'eau à 24 h (WA24) des granulats recyclés de béton et mixtes lavés et non lavés (Réf. : [15]).

maximale obtenue pour les granulats de type A+) et entre 40 et 45 % pour les échantillons de déchets mixtes (valeur maximale obtenue pour les granulats de type B+ : 50 %).

MISE EN ŒUVRE

Des éléments en béton préfabriqués ont été produits à l'usine Prefer de Flémalle près de Liège. Ces éléments devant être intégrés dans un aménagement extérieur de la ville de Seraing située à quelques kilomètres de là, des objectifs techniques ont été définis au préalable d'un point de vue qualitatif.

Les éléments en béton produits devaient répondre à la classe EE4 d'environnement des bétons ([11]), c'est-à-dire à des conditions : extérieures, d'épisodes de pluies, de cycles gel-dégel et de présence d'un agent de déverglaçage.

Par conséquent, les objectifs des caractéristiques du béton préfabriqué à atteindre furent les suivants :

- résistance : C35/45, soit une résistance moyenne à la compression $F_{c, \text{moyen}}$ de 50-55 MPa ;
- rapport eau/ciment (E/C) $\leq 0,45$;
- quantité de ciment $\geq 340 \text{ kg/m}^3$;
- taux d'absorption d'eau $\leq 6,5 \%$;
- cycle gel-dégel avec agent de déverglaçage : perte de masse $< 1 \text{ kg/m}^2$, avec une valeur individuelle $< 1,5 \text{ kg/m}^2$.

Ces objectifs ont permis d'évaluer la qualité de la production de béton préfabriqué sur la base de critères particulièrement exigeants, avec un taux de substitution de granulats naturels par des granulats recyclés allant jusqu'à 100 %. La caractérisation des bétons a été faite sur la base des essais béton frais et béton durci prescrits dans les normes NBN 12 390 et 12 350.

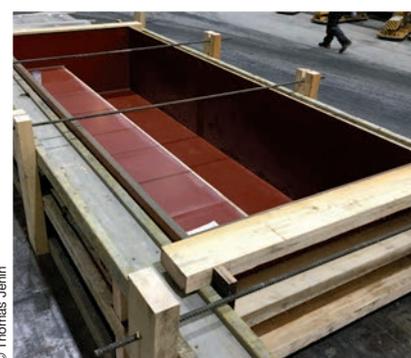
RÉSULTAT DES ANALYSES

Des tests préliminaires ont été réalisés sur des éléments préfabriqués en béton produits selon ces mêmes objectifs. Les résultats obtenus sont repris dans le Tableau 6. Selon la nomenclature, le sigle M50-75CC signifie que l'échantillon carotté contient



© Thomas Jehin

Coffrage d'éléments en béton préfabriqué contenant des granulats recyclés pour le parcours parc de la ville de Seraing (Photos à droite), et résultats du décoffrage (Photo haut).



© Thomas Jehin



© Thomas Jehin

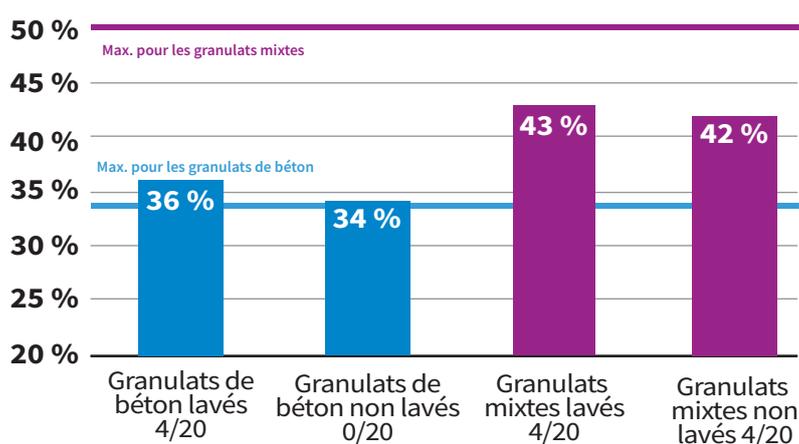
Tableau 6

Résultats des tests sur les différents échantillons		Béton de référence (0 % de GR)	Granulats de béton concassé de type A (EN 12 620)			Granulats mixtes de type B (EN 12 620)		
		MO	M65-100CC	M50- 75CC	M25-40CC	M6-100MA	M50-75MA	M25-40MA
Ciment	[kg]	400	400	400	400	400	400	400
Quantité d'eau efficace/ quantité de ciment (E_{eff}/C)	[-]	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Quantité d'eau/ quantité de ciment (E/C)	[-]	0,47	0,57	0,55	0,51	0,58	0,55	0,51
% de granulats recyclés (dont sable naturel)	[-]	0 %	65 %	50 %	25 %	65 %	50 %	25 %
Ratio E/C mesuré	[-]	0,42	0,44	0,41	0,44	0,42	0,41	0,44
Essai d'affaissement (avec un cône d'Abrams) EN 12 350-2	[-]	S4 (21 cm)	S3 (10 cm)	S4 (18 cm)	S4 (21 cm)	S3 (10 cm)	S4 (18 cm)	S4 (17 cm)
Masse volumique du béton frais	[kg/m ³]	2433	2254	2319	2229	2299	2261	2326
Résistance à la compression à 7 jours	[MPa]	67,8	54,6	58,5	59,6	50,5	53,4	54,6
Résistance à la compression à 28 jours	[MPa]	80,0	59,9	74,3	72,4	59,0	69,6	75,8
Résistance à la traction à 28 jours	[MPa]	5,0	4,0	5,1	5,6	4,4	5,1	5,0
Taux d'absorption d'eau du béton	[%]	5,0	6,7	5,6	5,9	7,1	6,0	5,5
Masse volumique du béton durci	[kg/m ³]	2432	2167	2195	2282	2071	2195	2234
Perte de masse à 28 jours (test de dégel)	[kg/m ²]	0,67	2,45	1,73	1,77	2,61	2,54	1,87

Résultats des essais sur bétons soumis à une classe d'environnement EE4 ([11]), dans l'objectif d'obtenir en sortie des matériaux répondant aux caractéristiques : résistance à la compression F_c de 50-55 MPa, rapport eau sur ciment $E/C \leq 0,45$, ciment ≥ 340 kg/m³, coefficient d'absorption d'eau du béton $\leq 6,5$ % (Réf. : Prefer). En vert, les objectifs sont atteints, en rouge non et en orange proches de l'être.

50 % de granulats recyclés de béton (CC : *crushed concrete*) sur un total tenant compte des sables (fraction granulométrique inférieure à 4 mm), et 75 % de granulats de béton recyclé sur la fraction granulométrique supérieure à 4 mm. De même, le sigle M50-75MA signifie que l'échantillon contient 50 % de granulats de béton recyclés sur un total tenant compte des sables et 75 % de granulats mixtes (MA : *mixed aggregates*) sur la fraction granulométrique supérieure à 4 mm.

Pour évaluer le critère "cycle gel-dégel avec agent de déverglaçage", des essais d'écaillage en surface de l'échantillon ont été réalisés au bout de 28 jours, avec mesure de la perte de masse moyenne (sur 3 résultats). Il s'agit alors de récolter la matière écaillée sur l'échantillon, puis de transposer le résultat de mesure de perte de masse sur une surface de 1 m². Une erreur même assez faible à l'échelle d'un échantillon pouvant mener à une modification beaucoup plus importante rapportée à 1 m², on observe parfois une variabilité des résul-



Graphique 7 : Coefficient de Los Angeles des granulats recyclés de béton et mixtes lavés et non lavés (Réf. : [15]).

tats de mesure, comme dans le cas de l'échantillon de référence MO (dépourvu de granulat recyclé) – voir photos -. La dispersion des résultats au laboratoire est due principalement au caractère hétérogène du béton et à la petitesse de la surface étudiée.



Résultats des essais gel-dégel avec agent de déverglçage. Au bout de 28 jours, l'échantillon de référence M0 (sans granulat recyclé) présente une perte de masse de 0,72 kg/m² (échantillon carotté du haut) ou de 0,43 kg/m² (carotte du bas).



Résultats des essais gel-dégel avec agent de déverglçage. Au bout de 28 jours, les échantillons de granulats de béton concassé de type A M50-75CC et M25-40CC présentent une perte de masse respective de 1,27 kg/m² (à gauche) et de 2,15 kg/m² (à droite).



Résultats des essais gel-dégel avec agent de déverglçage. Au bout de 28 jours, l'échantillon de granulats mixtes de type B M50-75MA présente une perte de masse de 1,96 kg/m².

L'échantillon à base de granulats de béton M65-100CC et l'échantillon à base de granulats mixtes M65-100MA, avec un taux de substitution de granulats naturels de 100 % de la fraction granulométrique supérieure à 4 mm, ne respectent pas les exigences sur les critères "absorption d'eau" et "cycle gel-dégel avec agent de déverglçage".

Concernant les échantillons M50-75CC et M25-40CC, le taux de substitution de granulats naturels par des granulats recyclés était respectivement de 75 % et 38 %. Dans ces deux cas le critère "absorption d'eau" se trouve respecté.

La société Prefer a ainsi produit une série d'éléments préfabriqués non-structuraux sous forme de prototypes "produits" destinés à l'aménage-

ment d'un parcours parc urbain récréatif, et également des pavés en béton.

Différents constats sur ces bétons à base de granulats recyclés nous amènent à préciser quelques éléments qui méritent attention :

- le ressuage du béton en surface lors de sa mise en œuvre ;
- l'écaillage en surface lorsque l'échantillon est soumis à des cycles de gel-dégel avec agent de déverglçage, même si ce phénomène se produit aussi régulièrement avec des bétons à base de granulats naturels étant donné la forte agressivité du test (gel porté jusqu'à une température de -20 °C),

En termes de points de satisfaction, notons :

- de bonnes résistances à la compression et à la traction ;
- un bon taux d'absorption d'eau pour les bétons qui comprennent jusqu'à 70 % de granulats recyclés béton ou mixtes (conforme donc à l'objectif [4]) ;

Sans l'exigence "gel-dégel avec agent de déverglçage", en conditions intérieures ou en conditions environnementale et climatique moins critiques, la durabilité des éléments non structuraux est rencontrée y compris avec un taux de substitution de 100 %. Sans pour autant aller jusque-là, le but du projet Seramco étant de tester les limites. Pour des taux de substitution allant jusqu'à 70 %, on a globalement un très bon comportement pour les environnements hors gel.

En outre, pareil challenge ne s'impose pas vraiment en Belgique. En effet, la production totale de déchets de la construction et de la démolition est estimée de 6 à 7 Mt/an en Wallonie [6] et à 15 Mt/an en Flandres (2016, [12]), soit quelque 22 Mt/an ; un chiffre correspondant à la production de granulats recyclés dans le pays selon l'Union européenne des producteurs de granulats (2021, [13]). La

Prototype de pavé Seramco en béton désactivé produit par la société Prefer.



© T. Jehin

production totale de granulats, naturels et recyclés, serait de 92 Mt/an selon la Fediech, la fédération des industries extractives de Belgique (2021, [14]). Dans ce contexte, l'objectif actuellement avancé de fixer dans les cahiers des charges publics un taux de substitution de granulats recyclés de l'ordre de 30 % dans tous les bétons pour les environnements intérieurs ou extérieurs protégés s'avère réaliste.

PERSPECTIVES INDUSTRIELLES

Le projet Seramco ouvre de réelles perspectives de circularité pour la gestion des déchets inertes issus des opérations de démolition et de déconstruction. Ses enseignements sont nombreux, à commencer par la faisabilité de l'intégration de granulats recyclés bétons comme mixtes dans certains bétons non structurels.

Un bon équilibre des granulats naturels et recyclés (jusqu'à 70 % pour ces derniers et donc en conformité avec l'objectif européen ([4]), des granulats recyclés de haute qualité béton ou mixtes (obtenus

“par voie humide”) ou encore des applications techniques qui s'y prêtent sont autant d'éléments motivants pour plus de circularité dans les processus constructifs.

CARTE DE VISITE

LE PROJET INTERREG ENO SERAMCO

Programme européen : Interreg Europe de l'ouest (2014-2020).

Période : 2017-2020.

Pays impliqués : Allemagne, Belgique, France, Luxembourg et Pays-Bas.

Partenaire pilote : université technique de Kaiserslautern (Allemagne).

Partenaires : Société Prefer (Belgique), Fabricant Béton-Betz (Allemagne), Groupe Vicat (France), Schuttelaar & Partners (Belgique), la société Tradecowall (Belgique), l'université de Liège (Belgique), l'université du Luxembourg (Luxembourg), l'université de Lorraine (France), l'université de technologie de Delft (Pays-Bas) et le Centre d'études et d'expertise des risques, de l'environnement, de la mobilité et de la planification urbaine et rurale (Cerema, France).

Budget total : 7,28 M€.

Budget venant de l'Europe : 4,37 M€.

Villes pilotes de tests de produits finis : Seraing (Belgique), Saarlouis (Allemagne) et le département de la Moselle (France).

Seramco au cœur d'une JT de la Sim

Les journées techniques de la Société de l'industrie minérale (Sim) sont des occasions de découvrir la réalité du secteur. Retour sur celle consacrée au projet Seramco en Région Wallonie de Belgique.

Le programme Seramco de coopération Interreg Europe du nord-ouest (ENO) a fait l'objet d'une présentation le 13 mai 2022 à Mons, lors d'une journée technique organisée par le Groupement des membres belges (GMB-Sim) en partenariat avec le groupe de réflexion Recyclage et valorisation de la Société de l'industrie minérale (Sim). Placée sous le titre “Valorisation des granulats recyclés dans les bétons préfabriqués”, elle a réuni près de 60 professionnels venus de France, de Suisse et de Belgique.

Lors de cette journée technique a été abordé le contexte réglementaire belge et européen avec la “fin du statut de déchet”. Ce sujet était présenté par Jean-Marc Aldric, directeur de la direction des infrastructures de gestion et de la politique des déchets du service public de Wallonie (SPW). Thibault Mariage, le directeur de

la Fédération des recycleurs en Wallonie (Feredeco) a apporté un éclairage sur le marché wallon et ses perspectives.

Les aspects techniques, normatifs et pratiques du projet Seramco ont été abordés lors de la séance académique par Julien Hubert de l'université de Liège (département Argenco - architecture, géologie, environnement & constructions - Matériaux de construction non métalliques du génie civil, dirigé par le professeur Luc Courard) et par Thomas Jehin, responsable qualité & R&D de la société Prefer, fabricant de bétons préfabriqués basé à Flémalle en Wallonie.

Ali Kheffi, président du GMB-Sim a clôturé la séance. Le GMB-Sim et le GR Recyclage et valorisation de la Sim remercient tous les participants à cette journée et les auteurs de cet article qui en découle.



La journée technique de la Sim consacrée au projet Seramco s'est déroulée en deux temps : des présentations orales en salle et une visite de terrain sur le site de Recymex Saint-Ghislain.



Espace d'accueil du public et de départ des visites par petits groupes.



Installation de traitement par voie humide de Recymex Saint-Ghislain ayant servi au projet Seramco.

Pour améliorer cette dynamique, il est nécessaire de pouvoir garantir des approvisionnements réguliers en granulats recyclés présentant une homogénéité du produit compatible avec les exigences des fabricants d'éléments préfabriqués. Pour y parvenir, les procédés et processus ont encore des marges de progrès possible : tri optique, inventaires et tri lors des déconstructions... Avec un contrôle qualité indispensable ! Celui-ci doit être adapté et pouvoir s'appuyer sur des critères normatifs pertinents. À ce titre, le critère gel-dégel avec agent de déverglaçage n'est pas nécessairement indispensable pour les applications non soumises à ce type de contrainte.

Un taux de substitution maximal de granulats naturels par des granulats recyclés, tenant compte des évolutions technologiques récentes dans les procédés de traitement des déchets inertes, et notamment du lavage "par voie humide", pourrait être plus important sans grande prise de risque. Pour que ces nouveaux procédés soient encouragés et que les modèles économiques puissent prendre place, ce point normatif mériterait d'être réévalué. À ce stade, dans des applications d'éléments préfabriqués en béton tels que ceux produits dans le

cadre de Seramco, vouloir tendre vers du 100 % de substitution en granulats recyclés n'est pas nécessaire et pourrait amener d'autres risques technologiques liés au béton produit : perte de durabilité sur le long terme, influence sur les propriétés du béton telle que sa déformation (fluage, retrait ou autre), sa résistance au décoffrage, etc. Fort heureusement, une évolution des cahiers des charges et la sensibilité des prescripteurs à intégrer plus de circularité dans leurs projets, l'évolution de la sensibilité "environnement" dans le secteur du BTP, les tensions qui peuvent exister dans la disponibilité des ressources naturelles, la nécessité grandissante de se fournir en ressources "urbaines" et locales, le coût de l'énergie et surtout les évolutions législatives font que les déchets inertes sont progressivement considérés comme produits.

Robin Chapelle, responsable R&D de Tradecowall,
Julien Hubert, chercheur de l'université de Liège,
Thomas Jehin, resp. Qualité et R&D de Prefer,
David Lamy DG de Tradecowall et
Thibault Mariage, directeur de Feredeco /R&V

Références

- [1] OECD *Environmental Performance Reviews : Belgium* 2021.
- [2] Pour en savoir plus : https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/buildings-and-construction_en
- [3] Eurostat *Statistics Explained* - production de déchets 2020 – septembre 2022 (https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation).
- [4] Cet objectif est inscrit dans la directive cadre révisée relative aux déchets du 19 novembre 2008.
- [5] Cf. site Web du projet Seramco : www.nweurope.eu/projects/project-search/seramco-secondary-raw-materials-for-concrete-precast-products/
- [6] Plan Wallon des Déchets – Ressources, Cahier 4 : Gestion des déchets industriels, 2018 (data pour 2010), 118 p. (<https://sol.environnement.wallonie.be/pwd-r.html>).
- [7] Cf. site Web "Qualité & Construction" : <http://qc.spw.wallonie.be>
- [8] Ces catégories sont précisées dans la norme NBN EN 933-11 "Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 11 : essai de classification des constituants de gravillons recyclés". Son équivalente Française est la NF EN 933-11.
- [9] Cf. : www.granulatsrecycles.be, une création de la Fédération des recycleurs de déchets de construction de la région Wallonie de Belgique (Federeco), en soutien avec la Région Wallonie et Wallonie environnement (SPW).
- [10] La norme NF EN 12 620 "Granulats pour béton" définit les termes relatifs aux granulats pour béton relevant du Règlement relatif aux produits de construction (RPC). Elle spécifie les caractéristiques des granulats et des fillers utilisés dans la fabrication des bétons qui peuvent être élaborés à partir de matériaux naturels, artificiels ou recyclés.
- [11] La classe d'environnement EE4 est définie dans la norme NBN 15-001 : 2018, qui est l'annexe belge de la norme béton européenne EN 206 : 2013+A1 : 2016. Elle correspond aux classes d'exposition du béton XC4, XD3 et XF4 de cette dernière.
- [12] OVAM, *Bedrijfsafvalstoffen productiejaar 2004-2014* (uitgave 2016), 45 p., 2016 (www.ovam.be/bedrijfsafvalstoffen).
- [13] UEPG, *European Aggregates Association – Annual Review. 2020-2021*, 29 p., 2021.
- [14] FEDIEX, *L'industrie extractive en chiffres 2021*, 12 p., 2021 (www.fediex.be/c/95/7/rapports-statistiques.html).
- [15] Julien HUBERT, Simon DELVOIE, Zenfeng ZHAO, Frédéric MICHEL et Luc COURARD, "Influence of the Production Process on the Quality of Recycled Aggregates", *under revision*.