

FORMATION BÂTIMENT DURABLE

GRANULATS RECYCLÉS ET
RÉGLEMENTATION SOLS

AUTOMNE 2020

Projet Interreg NWE SeRaMCo

Julien HUBERT et Luc COURARD





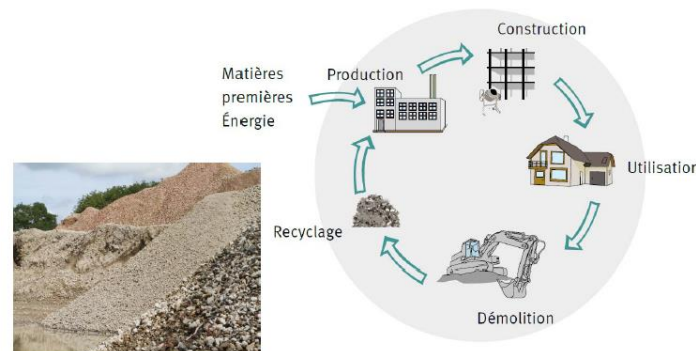
- ▶ Définir les conditions favorables au recyclage des déchets de construction et de démolition
- ▶ Introduire les normes régissant la qualité des granulats et leur utilisation dans les bétons recyclés
- ▶ Présenter une centrale de production et de traitement des granulats ainsi que l'effet de ces traitements sur la qualité des granulats recyclés
- ▶ Présenter une application concrète de composition de béton à base de granulats recyclés ainsi que les étapes du design
 - ⇒ **Définir les moteurs, les freins et les challenges liés à l'utilisation des granulats recyclés dans la production de nouveaux bétons**



CONTEXTE GLOBAL**CADRE NORMATIF****PROPRIÉTÉS DES GRANULATS RECYCLÉS****SITES PILOTES ET PRODUCTION DE BÉTON RECYCLÉ****RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION**

Pourquoi remplacer les granulats naturels par des granulats recyclés dans le béton?

- ▶ Le secteur de la construction consomme énormément de ressources....
 - Ciment : 180 millions de tonnes sont consommées chaque année en Europe (4 milliards à l'échelle mondiale)
 - Granulats : 3 milliards de tonnes pour l'EU28 (UEPG, 2018)
 - Béton: 10 milliards de tonnes à l'échelle mondiale
- ▶ ... et produits de large quantité de déchets!
 - L'industrie de la construction est responsable de 30 à 40% des déchets produits dans le monde
 - 374 millions de tonnes de déchets de construction et de démolition pour l'EU28
 - Le ciment est responsable de 5 à 8% des émissions globales de CO_2



Le but est donc de transformer ces déchets...



... en ressources secondaires

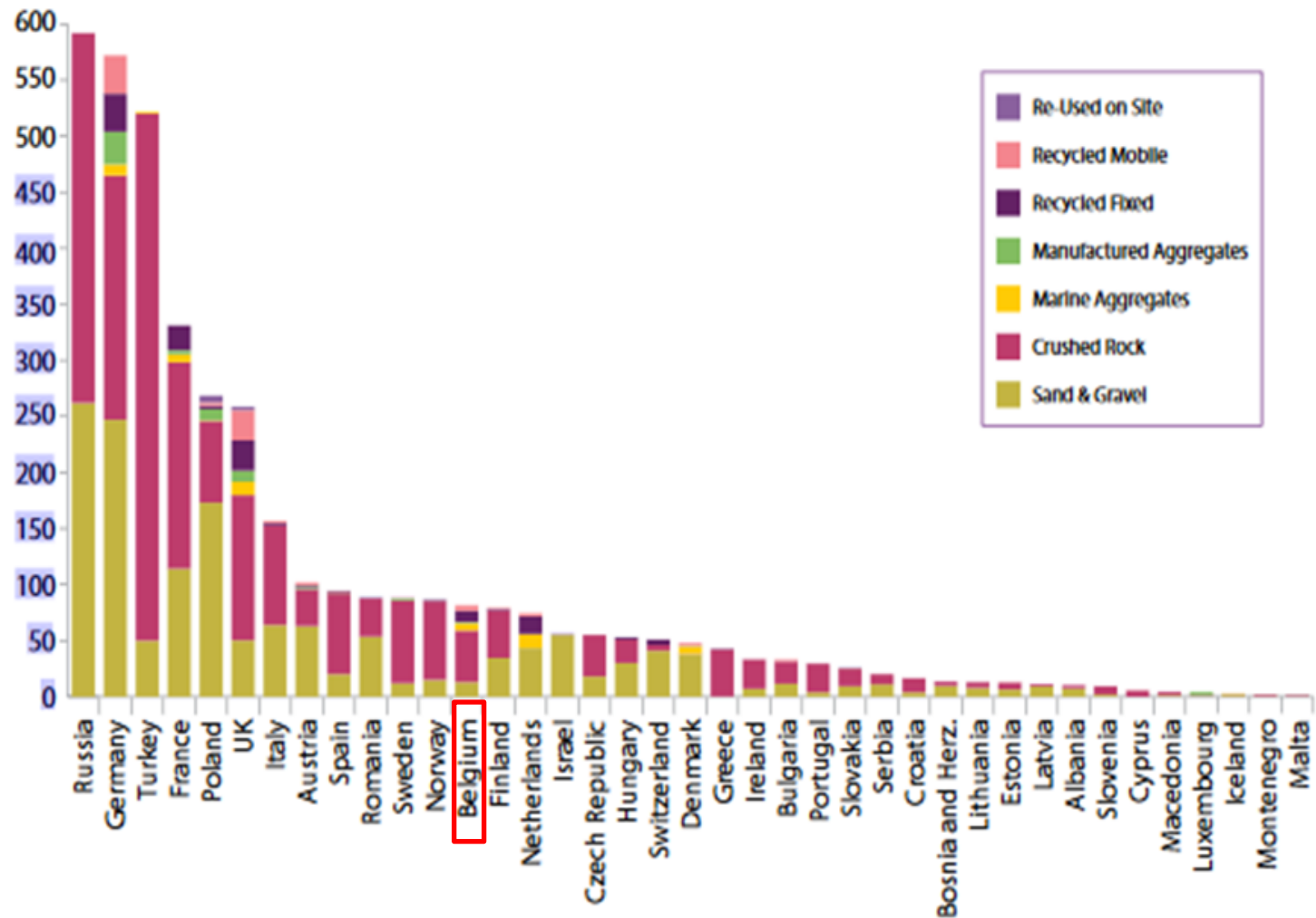


Applications possibles :

- ▶ *Matériau de remblai*
- ▶ *Granulats recyclés*
- ▶ *Liant*



PRODUCTION DE GRANULATS EN EUROPE



Production de granulats en Europe en 2016 par pays et par type en million de tonnes (UEPG, 2018)



Freins possible:

- ▶ Le transport
- ▶ Les règlements et les normes
- ▶ Le manque de traçabilité des matériaux recyclés
- ▶ Les besoins en application à valeur ajoutée importante (« up-cycling »)
- ▶ L'industrie de la construction

Le recyclage n'est donc intéressant que si :

- ▶ Les centres d'enfouissement sont éloignés
- ▶ Les coûts d'enfouissement sont élevés
- ▶ Les matières premières sont rares et/ou chères
- ▶ Il existe des designs éprouvés incluant des matériaux recyclés

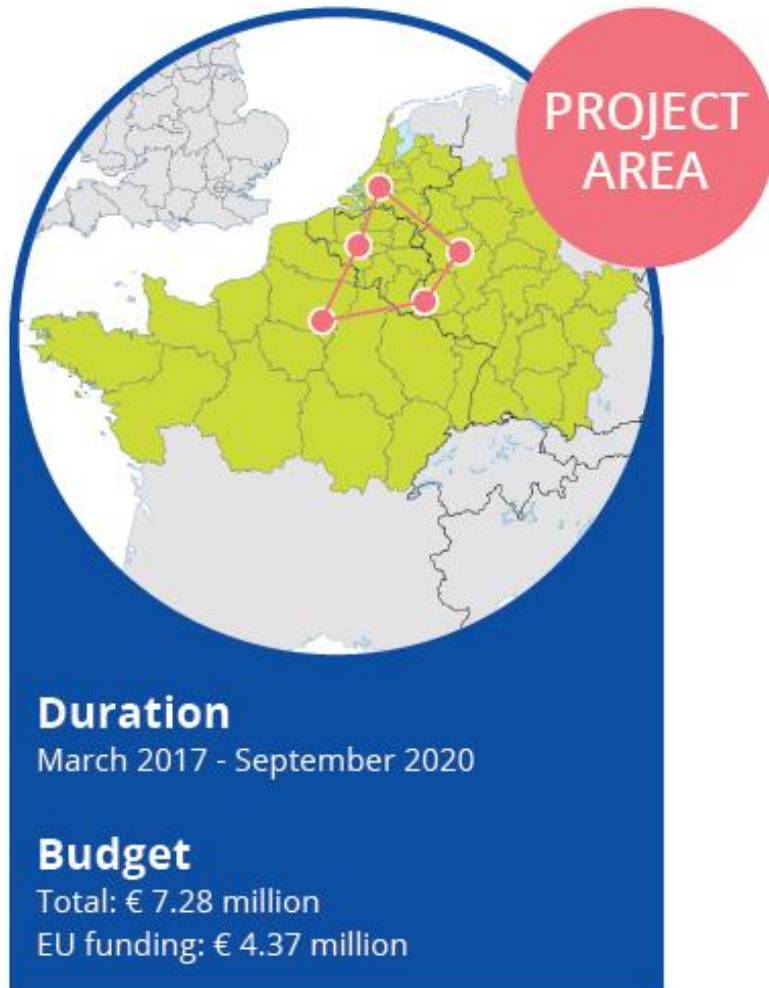


L'objectif du projet SeRaMCo est de produire des éléments en béton préfabriqué à base de granulats recyclés avec le plus haut taux de substitution possible



**Secondary Raw
Materials for
Concrete
precast products**



**Partnership:**

11 Partenaires

3 Sous-partenaires

3 Partenaires associés

Au total, 17 partenaires
provenant de 5 pays
européens (Allemagne,
Belgique, France,
Luxembourg et Pays-Bas)



CONTEXTE GLOBAL

CADRE NORMATIF

- ▶ Normes européennes
- ▶ Contexte belge

PROPRIÉTÉS DES GRANULATS RECYCLÉS

SITES PILOTES ET PRODUCTION DE BÉTON RECYCLÉ

RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION



Normes NBN EN 206 et NBN B 15-001

- L'annexe E de la NBN EN 206 donne des recommandations pour l'utilisation de granulats recyclés.
- Deux types de granulats sont définis ($d > 4\text{mm}$) :

Type A : granulats de béton



Type B : granulats mixtes



L'annexe NBN B 15-001 définit les critères que doivent respecter les granulats de béton de type A+ :

- ▶ $d \geq 4 \text{ mm}$ et $D \geq 10 \text{ mm}$;
- ▶ Catégories de composant suivantes
 Rc_{90} , Rcu_{95} , Ra_{1-} , $XRg_{0.5-}$, FL_{2-}
- ▶ Catégories suivantes
 FI_{20} , $f_{1.5}$, LA_{35} , $SS_{0.2}$, A_{40}
- ▶ Masse volumique minimale de 2200 kg/m^3 ;
- ▶ Absorption d'eau maximale de 10% avec une variation maximale de $\pm 2\%$.



Catégorie de la NBN 12620 :

Rc : béton

Ru : pierre naturelle

Ra : matériau bitumineux

XRg : verre

FL : matériau flottant

FI : coefficient d'aplatissement

F : teneur en fines

LA : coefficient Los Angeles

SS : sulfate soluble

A : modification du temps de prise

Utilisable pour des bétons de classe de résistance $\leq C30/37$



L'annexe NBN B 15-001 définit les critères que doivent respecter les granulats de béton de type B+ :

- ▶ $d \geq 4 \text{ mm}$ et $D \geq 10 \text{ mm}$;
- ▶ Respecte les catégories de composant suivantes
 Rc_{50} , Rcu_{70} , Ra_5 , Rb_{30-} , $XRg_{0.5-}$, FL_{2-}
- ▶ Respecte les catégories suivantes
 FI_{50} , LA_{50} , $SS_{0.2}$, A_{40}
- ▶ Masse volumique minimale de 1700 kg/m^3 ;
- ▶ Absorption d'eau maximale de 15% avec une variation maximale de $\pm 2\%$..



Catégorie de la NBN 12620 :

Rc : béton

Ru : pierre naturelle

Ra : matériau bitumineux

XRg : verre

FL : matériau flottant

FI : coefficient d'aplatissement

F : teneur en fine

LA : coefficient de Los Angeles

SS : sulfate soluble

A : modification du temps de prise

Utilisable pour des bétons de classe de résistance $\leq C25/30$



Type de granulats	Classes d'environnement selon la NBN B 15-001						
	E0	EI	EE1	EE2	EE3,EA1	ES1, ES2,ES3	EE4, ES4, EA2, EA3
Béton armé							
Type A+	-	30%	30%	20%	20%	0%	0%
Type B+	-	20%	0%	0%	0%	0%	0%
Béton non armé							
Type A+	-	50%	50%	20%	20%	0%	0%
Type B+	-	20%	0%	0%	0%	0%	0%

Il est autorisé d'utiliser des granulats recyclés dans certains environnements extérieurs



CONTEXTE GLOBAL

CADRE NORMATIF

PROPRIÉTÉS DES GRANULATS RECYCLÉS

- ▶ Centrale de production et traitement par voie humide
- ▶ Caractérisation et influence du lavage

SITES PILOTES ET PRODUCTION DE BÉTON RECYCLÉ

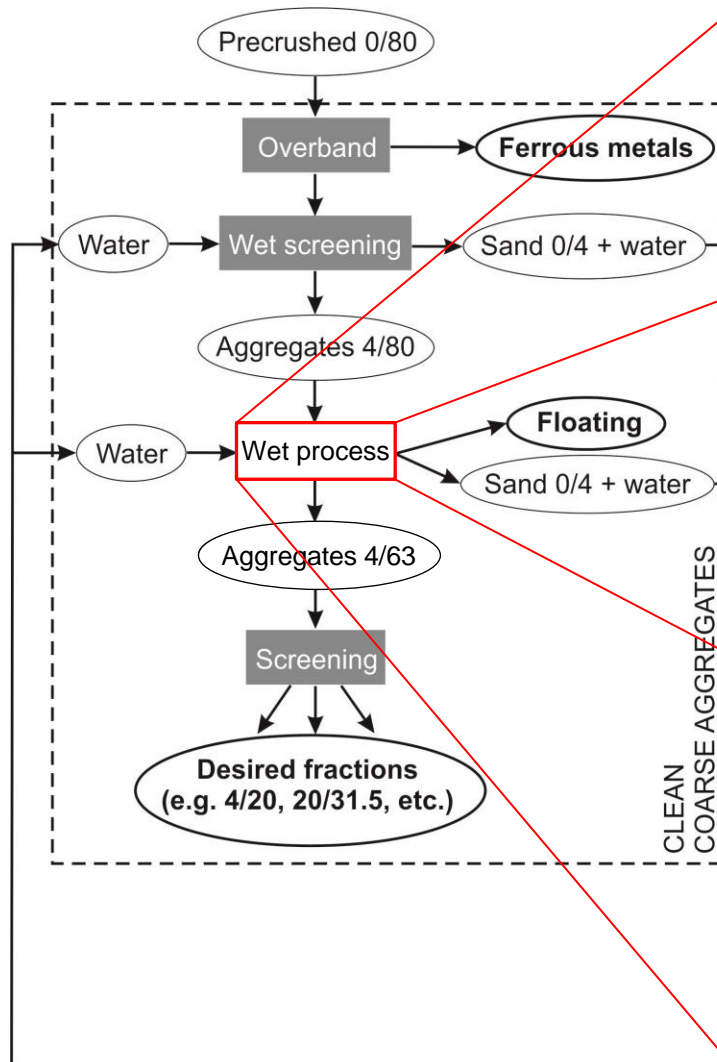
RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION



17 PRODUCTION DES GRANULATS RECYCLÉS

“SeRaMCo recycling plant” à Saint-Ghislain (Tradecowall)

18 PRODUCTION DES GRANULATS RECYCLÉS



Le lavage est composé de 3 étapes :

1. Crible laveur

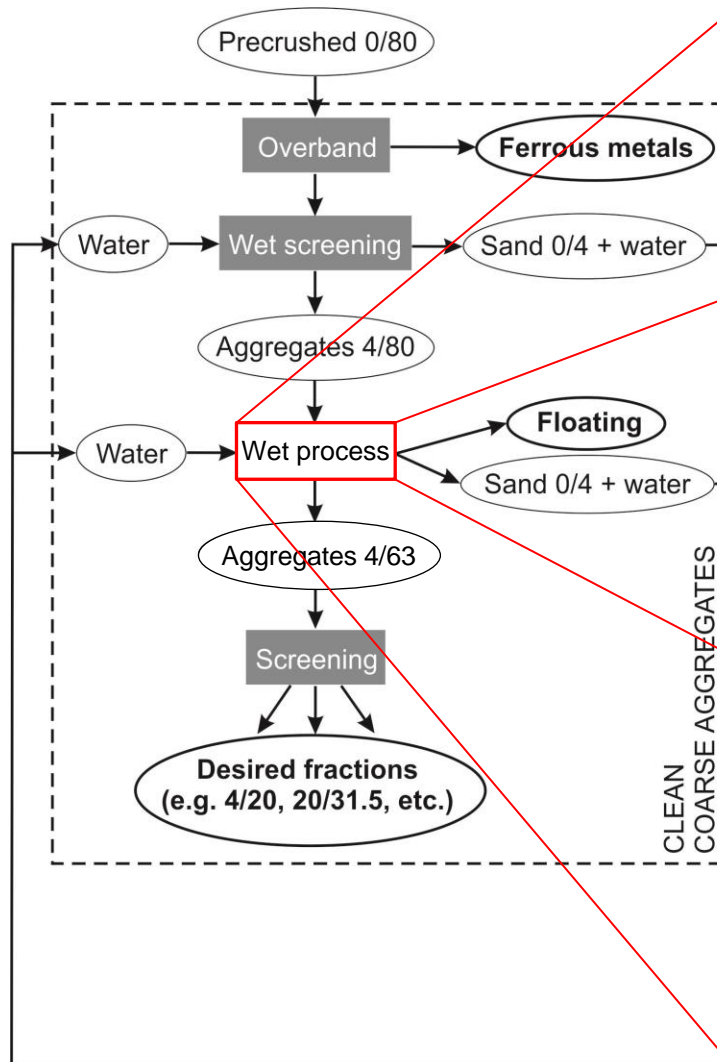


1^{er} lavage

- 63+ mm → rejetée
- 0/63mm



19 PRODUCTION DES GRANULATS RECYCLÉS



Le lavage est composé de 3 étapes :

2. Débourbeur à palette



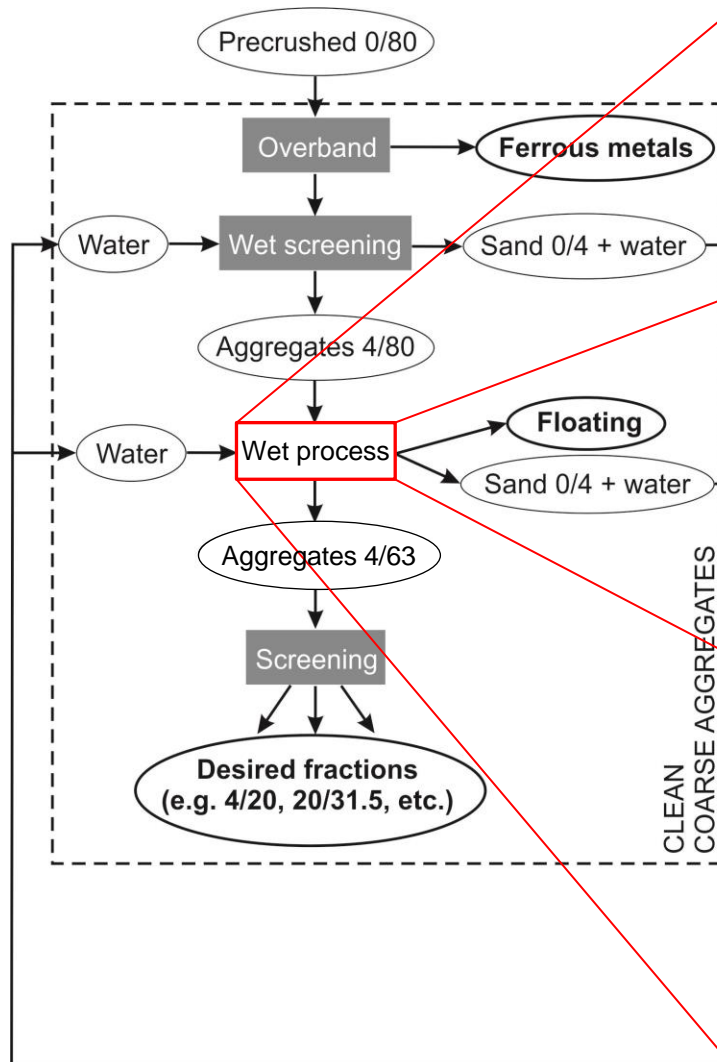
2^{ème} lavage

Eau de lavage chargée
en boue → hydrocyclone

0/63mm



20 PRODUCTION DES GRANULATS RECYCLÉS



Le lavage est composé de 3 étapes :

3. Crible rinceur Mogensen



3^{ème} lavage

- 0/4mm → hydrocyclone
- 4/63mm



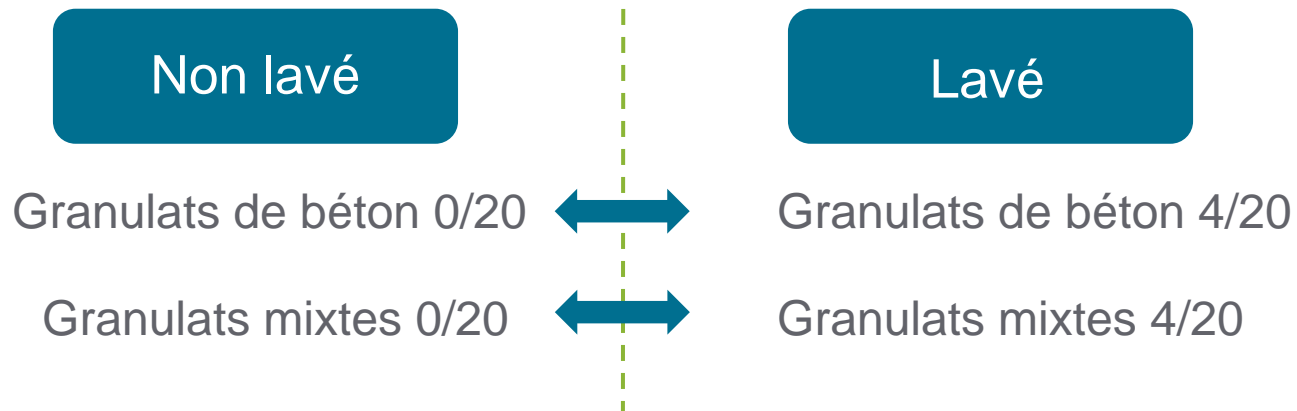
22 PRODUCTION DES GRANULATS RECYCLÉS

Trois granulométries différentes en sortie: - 4/20 mm
- 20/31,5 mm
- 31,5/63 mm



Effets anticipés :

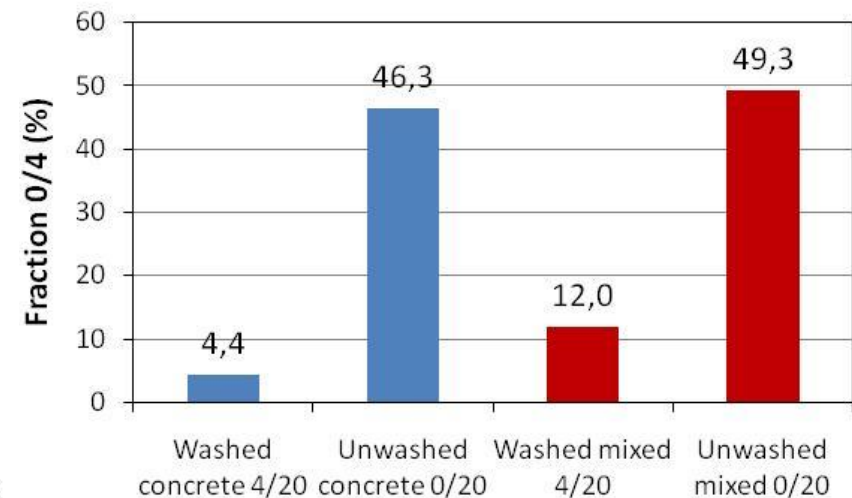
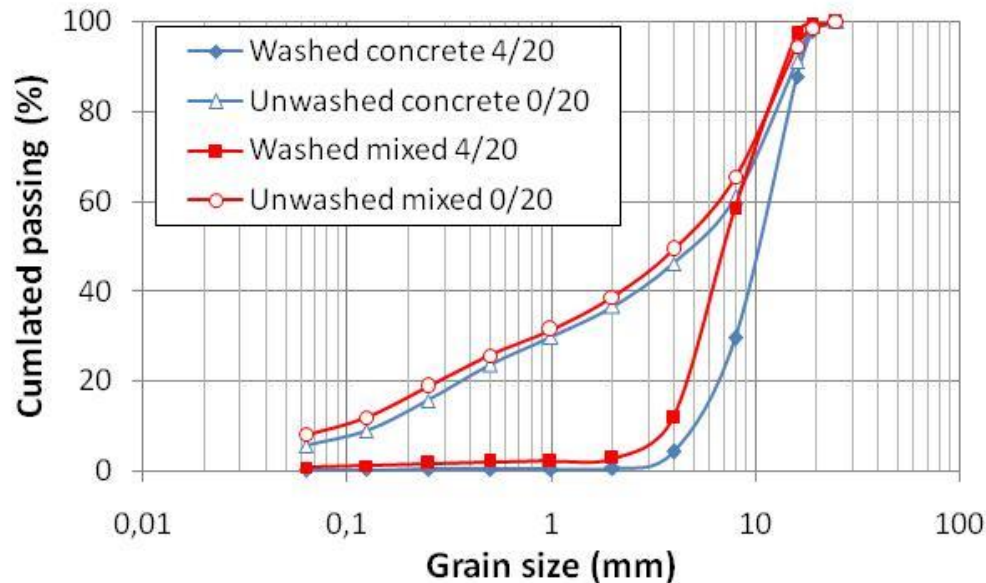
- ▶ Courbe granulométrique plus restreinte
- ▶ Diminution de la teneur en particules fines
- ▶ Diminution de la quantité d'éléments indésirables (plâtre, argiles, etc.)
- ▶ Meilleure résistance à la fragmentation

Méthodologie :

COURBES GRANULOMÉTRIQUES

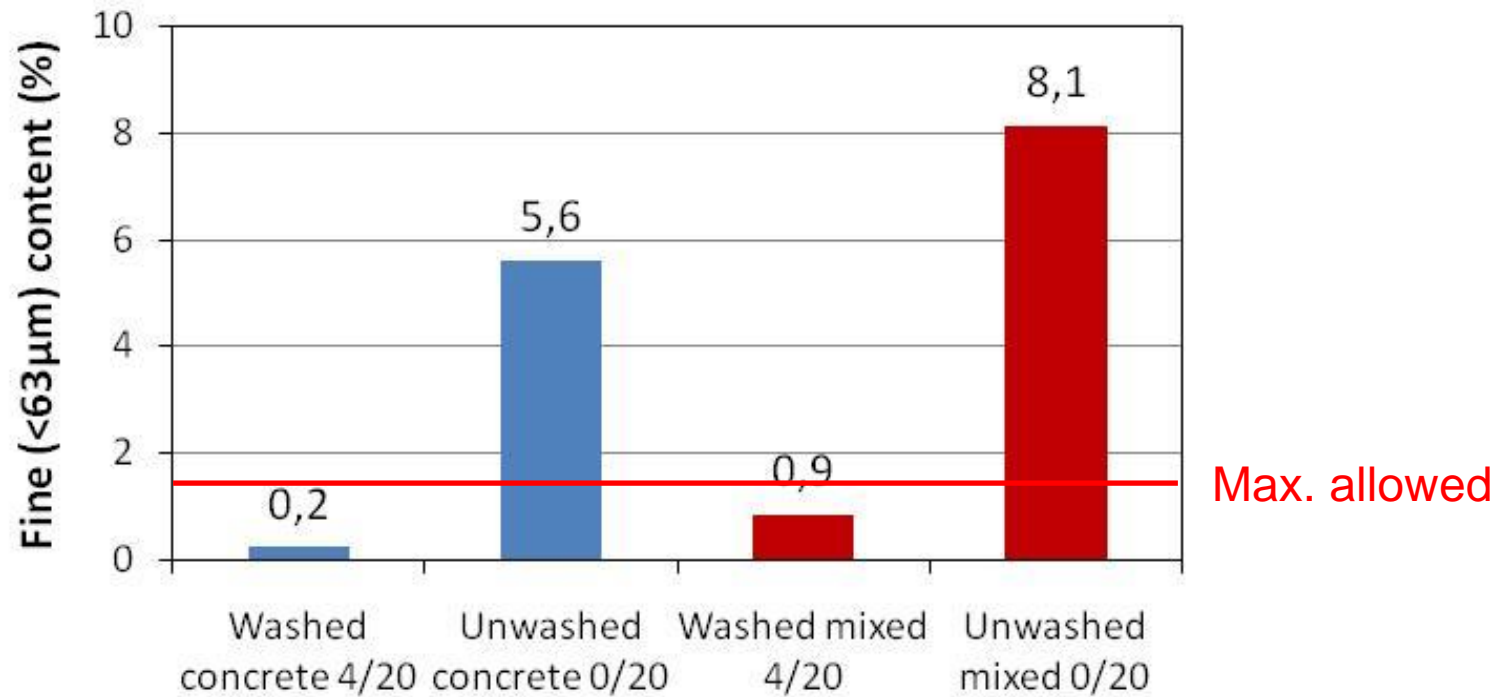
La fraction 0/4 représente presque 50% de la composition des granulats non lavés

Le lavage diminue significativement la fraction « sableuse » des granulats



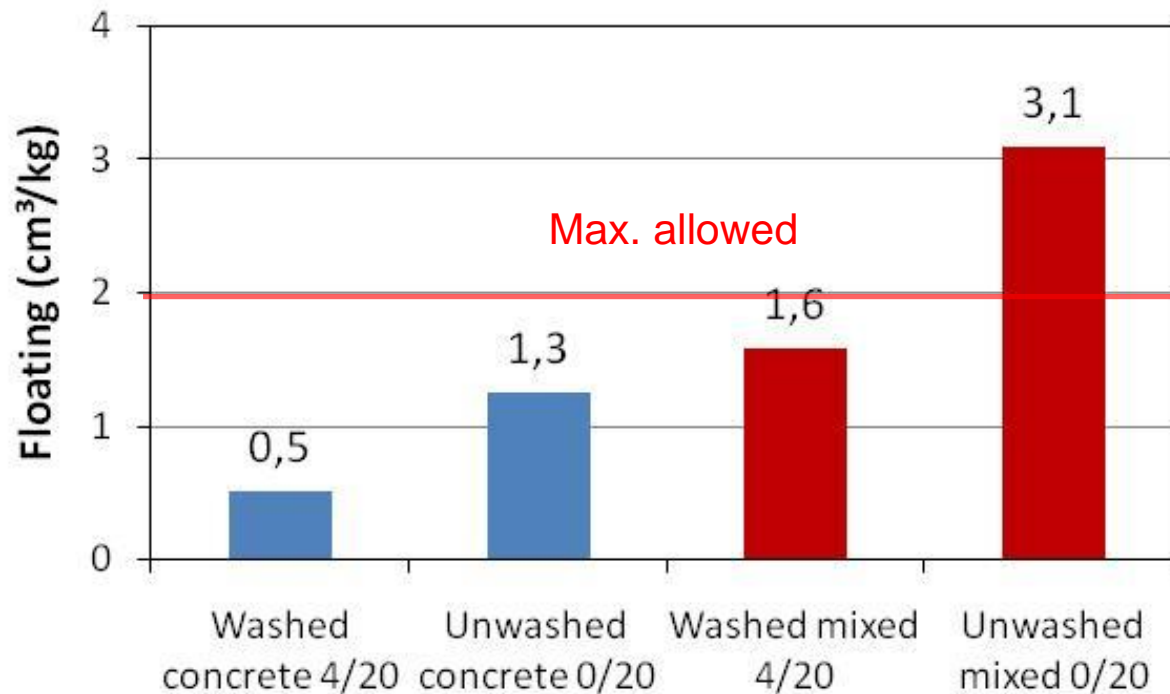
La teneur en particules fines ($< 63 \mu\text{m}$) est significativement réduite par le lavage

Les granulats lavés respectent les réglementations pour un usage dans le béton

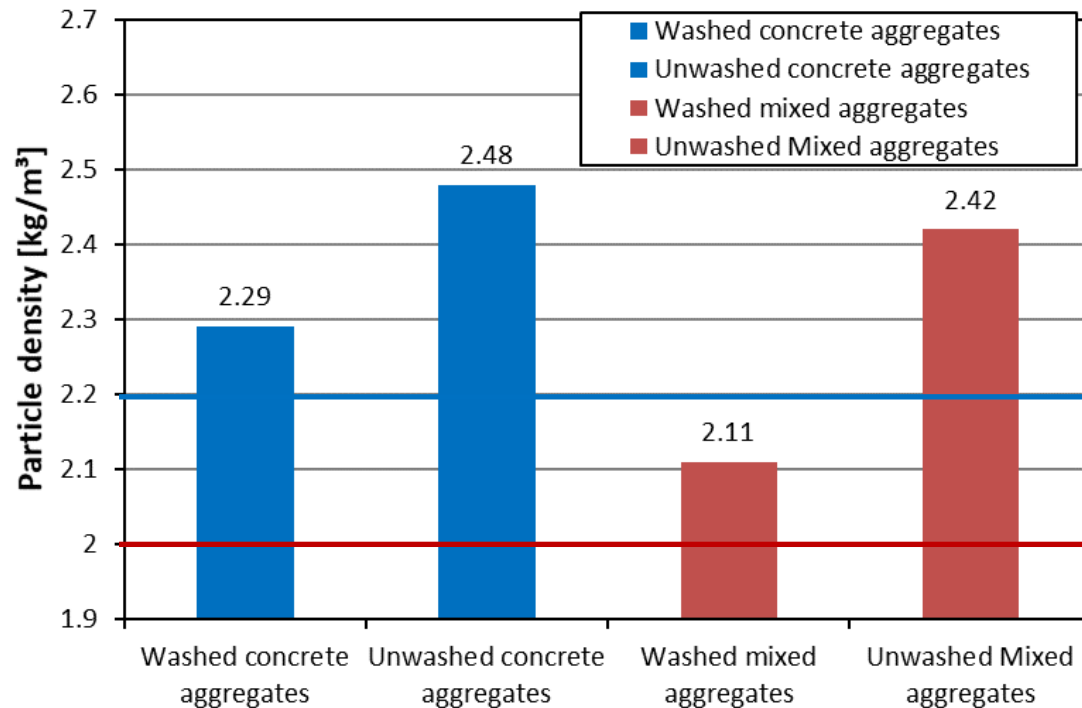


TENEUR EN ÉLÉMENTS FLOTTANT

La teneur en éléments flottants (bois, plâtre, argile, etc.) est réduite de 50%
Le lavage est nécessaire pour que les granulats mixtes respectent les réglementations



La masse volumique des granulats diminue suite au lavage mais respecte toujours les règlements



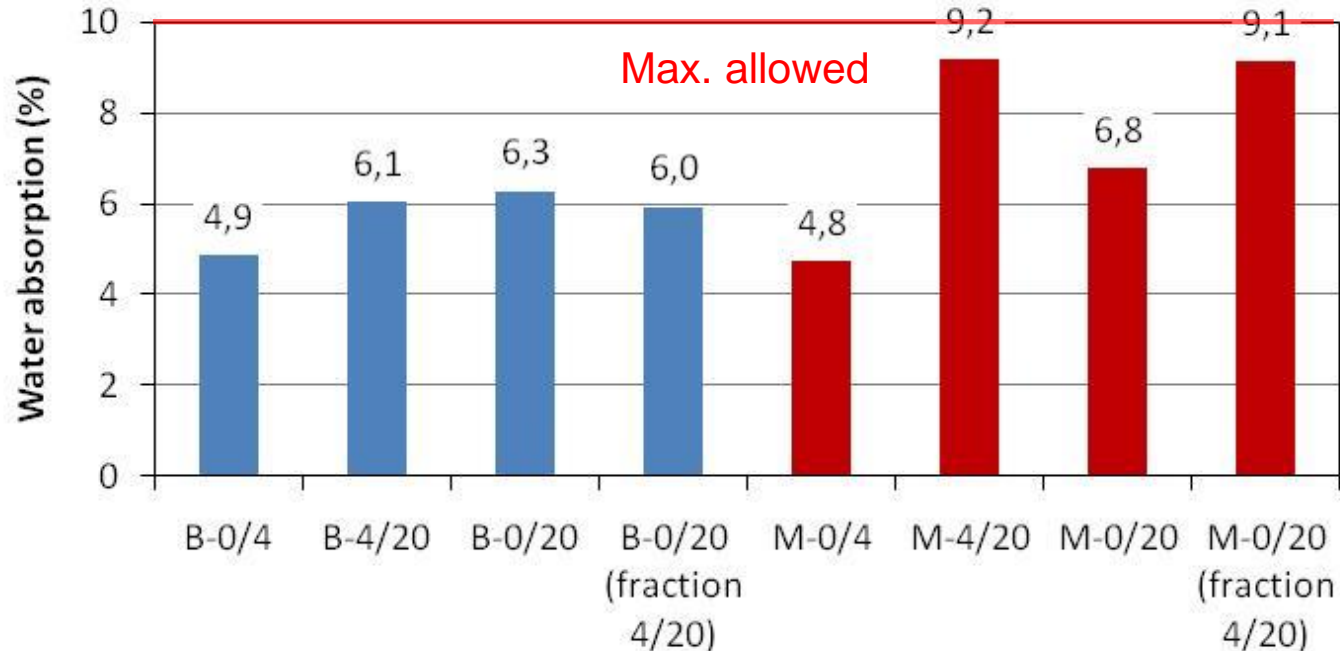
Min allowed
for concrete
aggregates

Min allowed
for mixed
aggregates



L'absorption d'eau n'est pas ou peu influencée par le lavage

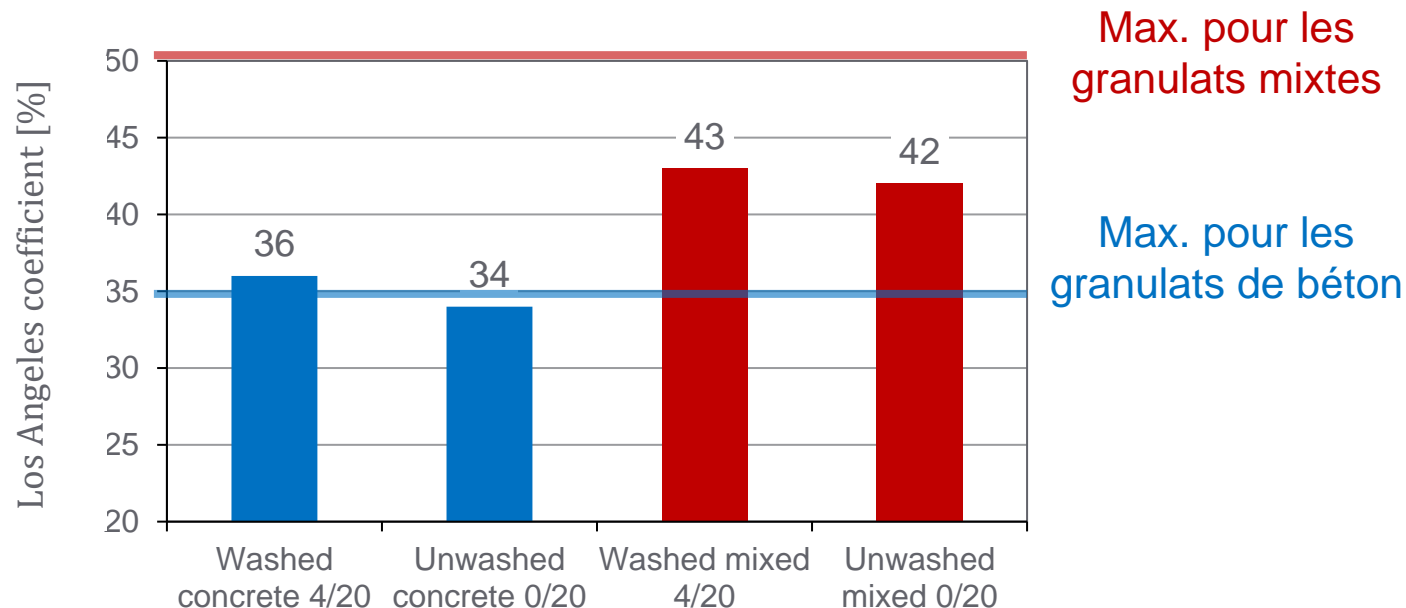
Les granulats recyclés lavés ou non rencontrent les réglementations



RÉSISTANCE À LA FRAGMENTATION

Le coefficient de Los Angeles (LA) définit la résistance à la fragmentation d'un granulat.

- ▶ Il s'agit du pourcentage de la masse de la prise d'essai passant au tamis d'ouverture 1.6 mm après un essai. Un pourcentage élevé dénote une mauvaise résistance aux chocs et au frottement
- ▶ Les granulats de béton présentent une meilleure résistance à la fragmentation que les granulats mixtes
- ▶ Le lavage n'a pas ou peu d'effet sur le coefficient de Los Angeles



Par rapport aux effets anticipés:

- ▶ Courbe granulometrique plus restreinte ☒
- ▶ Diminution de la teneur en particules fines ☒
- ▶ Diminution de la quantité d'éléments indésirables (bois, argiles, plâtre, etc.) ☒
- ▶ Augmentation de la résistance à l'abrasion ☒

A noter également :

- ▶ Pas d'influence sur l'absorption d'eau des granulats
- ▶ Diminue la masse volumique moyenne des granulats

Validité par rapport aux réglementations

- ▶ NBN EN 206 et NBN B 15-001



	B-4/20	B-0/20	M-4/20	M-0/20
FL (cm³/kg)	0.51	1.25	1.58	3.10
Rc (%)	81.43	86.78	61.05	63.04
Ru (%)	10.60	5.47	11.80	9.80
Rb (%)	7.53	6.24	24.89	25.42
Ra (%)	0.01	0.18	0.00	0.00
XRg (%)	0.02	0.018	1.23	0.32
f (%)	0.2	5.6	0.9	8.1
LA	36	34	43	42



CONTEXTE GLOBAL

CADRE NORMATIF

PROPRIÉTÉS DES GRANULATS RECYCLÉS

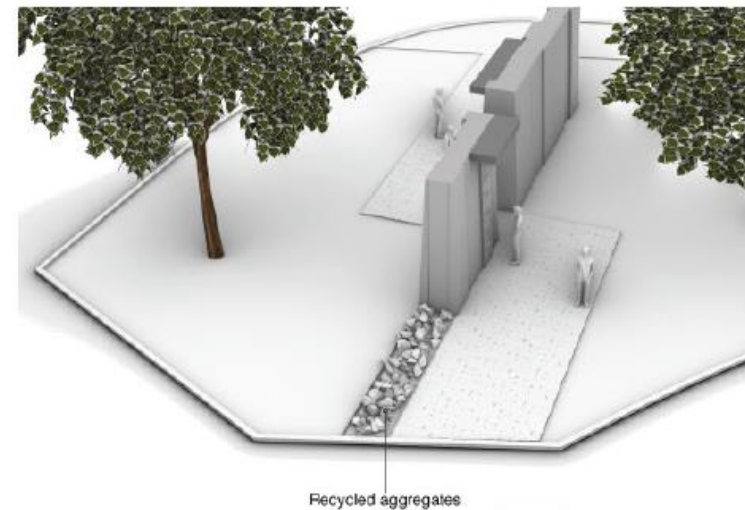
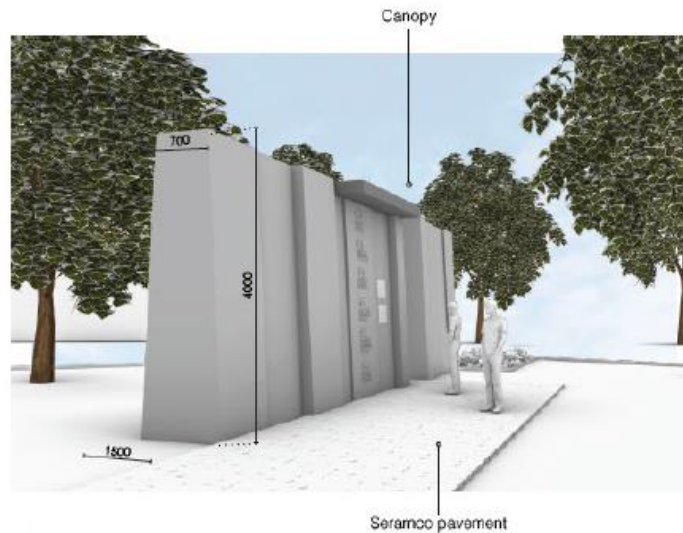
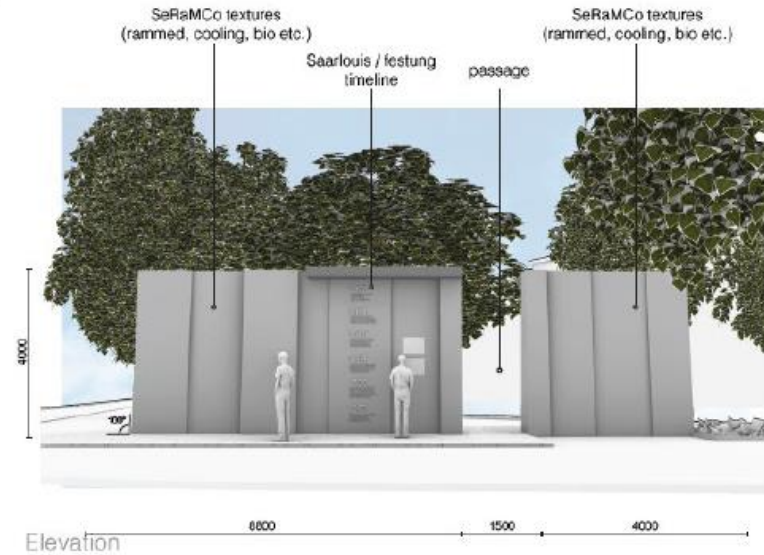
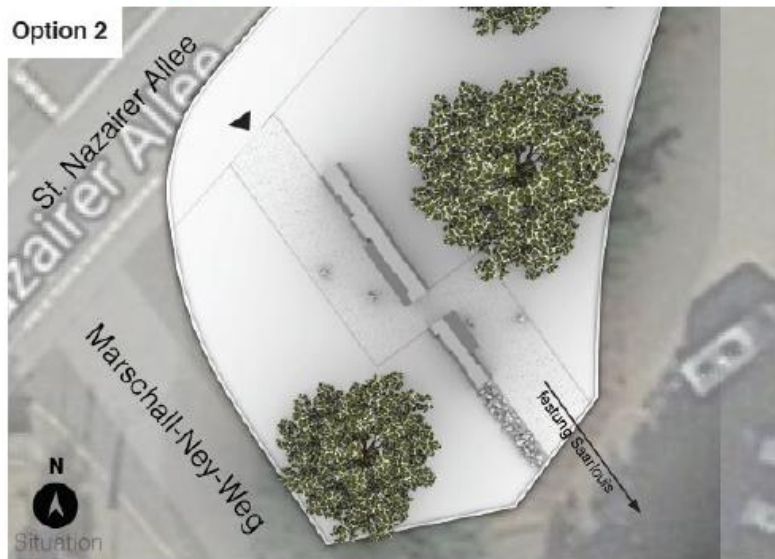
SITES PILOTES ET PRODUCTION DE BÉTON RECYCLÉ

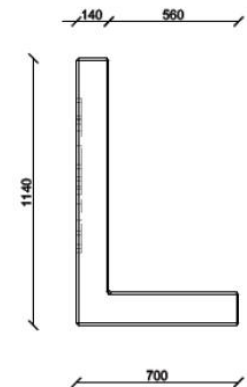
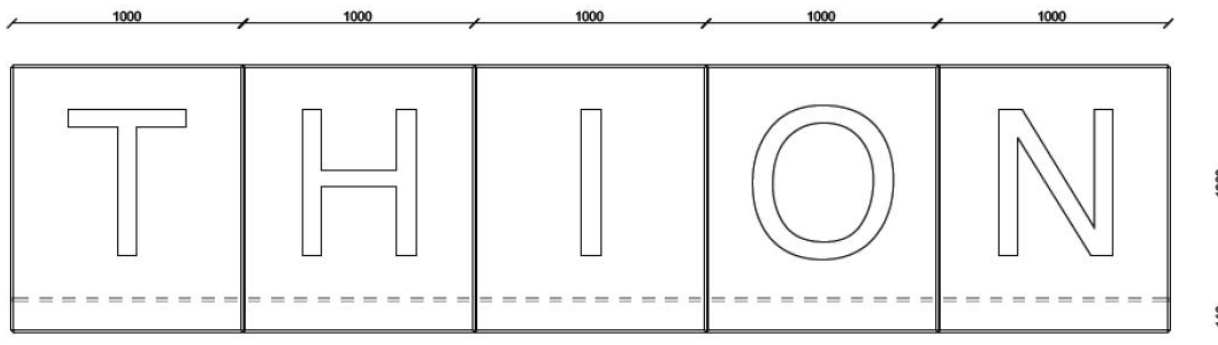
- ▶ **Présentation des sites pilotes**
- ▶ **Définition des cibles et composition des bétons**
- ▶ **Caractérisation des bétons**

RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION



Option 2



33 SITE PILOTE FRANÇAIS : AIRE DE REPOS A31

SITE PILOTE FRANÇAIS : RÉALISATION



SITE PILOTE BELGE : PARKOUR PARK DE SERAING



Éléments en béton préfabriqué

► NBN EN 206-1

- Les éléments sont en extérieur, soumis à la pluie, au gel et potentiellement à des sels de déverglaçage \Rightarrow classe d'environnement EE4

$$W/C \leq 0.45$$

$$\text{Ciment} \geq 340 \text{ kg/m}^3$$

$$C 35/45 \Rightarrow F_{ck} = 45 \text{ MPa} \Rightarrow R_c = 51.75 \text{ MPa}$$

► NBN B 15-001

- $D_{max} > 16 \Rightarrow WA_{24} \leq 5.5\%$
- $8 < D_{max} \leq 16 \Rightarrow WA_{24} \leq 6.5\%$
- $4 < D_{max} \leq 8 \Rightarrow WA_{24} \leq 7.5\%$

- Granulat : $D_{max} = 14 \text{ mm}$



Cibles

R_c : 50-55 MPa

$W/C \leq 0,45$

Ciment $\geq 340 \text{ kg/m}^3$

Absorption d'eau $\leq 6,5\%$



Pour chaque type de granulats, trois taux de substitution ont été envisagé afin de pouvoir quantifier l'influence des granulats recyclés sur les propriétés des bétons

Concrete mixes		Test series n°3 - CEM I 52 R LA						
		REF - 0 %	Granulat de béton recyclé			Granulat recyclé mixte		
		N100	B100	B75	B40	M100	M75	M40
Eau	[kg]	180	180	180	180	180	180	180
Eau de gâchage	[kg]	9	50	40	25	53	41	26
Ciment	[kg]	400	400	400	400	400	400	400
E/C efficace	[-]	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
E/C	[-]	0,47	0,57	0,55	0,51	0,58	0,55	0,51
Sable 0/2	[kg]	615	615	615	615	615	615	615
Granulat naturel 2/6	[kg]	273	-	273	273	-	273	273
Granulat naturel 6/14	[kg]	909	-	-	454	-	-	454
Granulat recyclé 2/6	[kg]	-	237	-	-	216	-	-
Granulat recyclé 6/14	[kg]	-	791	791	395	723	723	362
Taux de substitution	[-]	0%	100%	77%	38%	100%	77%	38%
Superplastifiant	[%]	0,5%	0,5%	1%	1%	1%	1%	1%



RÉSULTATS DES TESTS DE CARACTÉRISATION

Les bétons produits à base de granulats recyclés respectent la majorité des critères d'une classe d'environnement EE4 (pluie, gel, soumis à des agents de déverglaçage)

Cibles

R_c : 50-55 MPa

W/C \leq 0,45

Ciment \geq 340 kg/m³

Absorption d'eau \leq 6,5%

Résultats		REF - 0 %	Granulat de béton recycle				Granulat recyclé mixte	
		N100	B100	B75	B40	M100	M75	M40
Ciment	[kg]	400	400	400	400	400	400	400
E/C efficace	[-]	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
E/C	[-]	0,47	0,57	0,55	0,51	0,58	0,55	0,51
E/C mesuré	[-]	0,41	0,44	0,41	0,44	0,42	0,41	0,44
Test d'affaissement au cône d'Abrams cône (EN12350-2)	[-]	S4(21cm)	S3(10cm)	S4(18cm)	S4(21cm)	S3(10cm)	S4(18cm)	S4(17cm)
Masse volumique à l'état frais	[kg/m ³]	2344	2254	2319	2229	2299	2261	2326
Résistance en compression à 28 jours	[MPa]	47,5	42,5	74,3	72,4	59,0	69,6	75,8
Absorption d'eau	[%]	5,2	9,1	5,6	5,9	7,1	6,0	5,5
Masse volumique	[kg/m ³]	2280	2051	2195	2282	2071	2195	2234
Perte de masse – cycles de gel-dégel à 28 jours	[kg/m ²]	0,67	5,28	1,73	1,77	2,61	2,54	1,87



Résultats des essais de cycles gel-dégel à 28 jours

- La surface des échantillons produit à base de granulats recyclés est fortement endommagée

N100 (Ref)

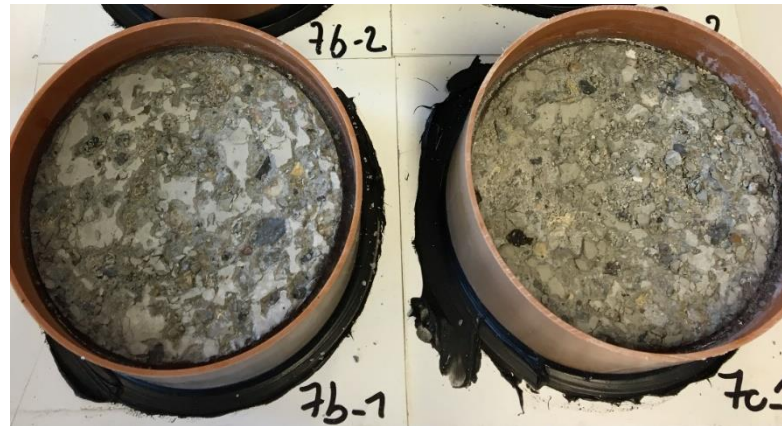
0,72 kg/m²

0,43 kg/m²



B75

1,27 kg/m²



B40

2,15 kg/m²

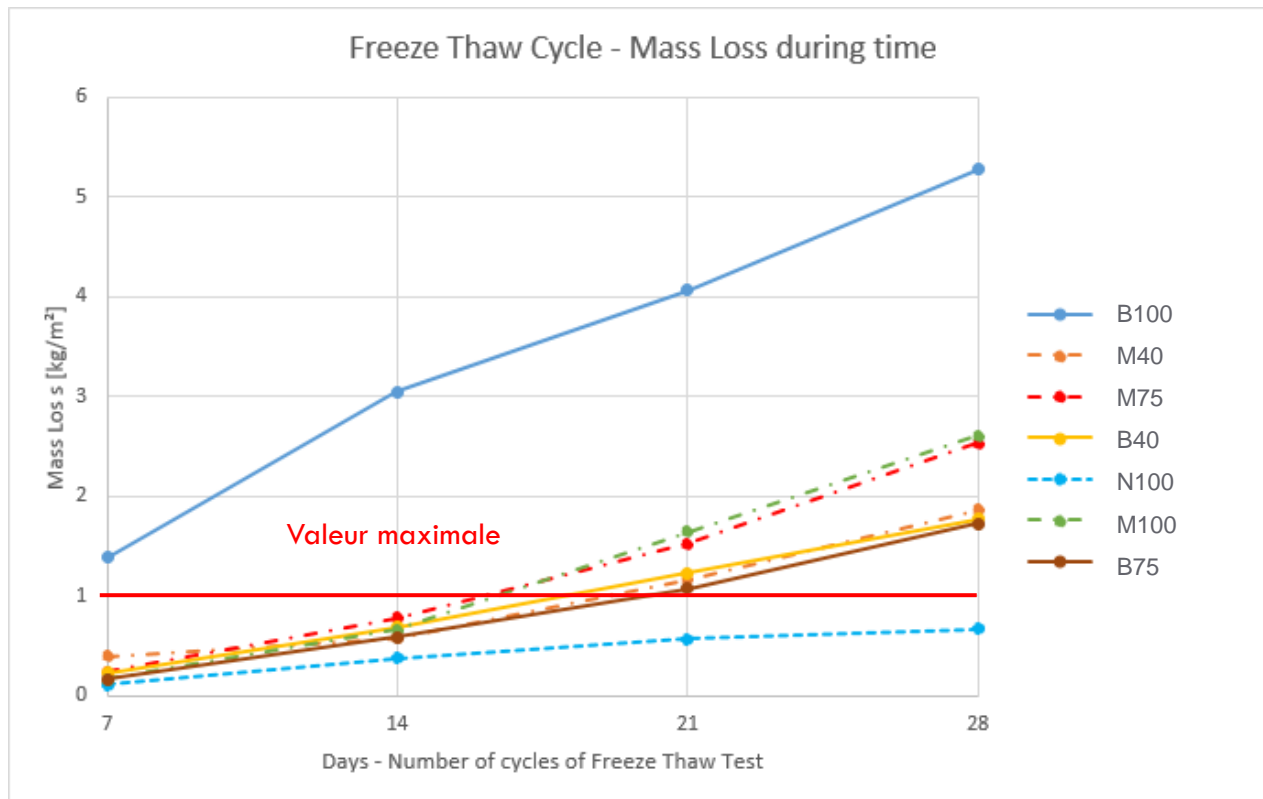


M75

1,96 kg/m²

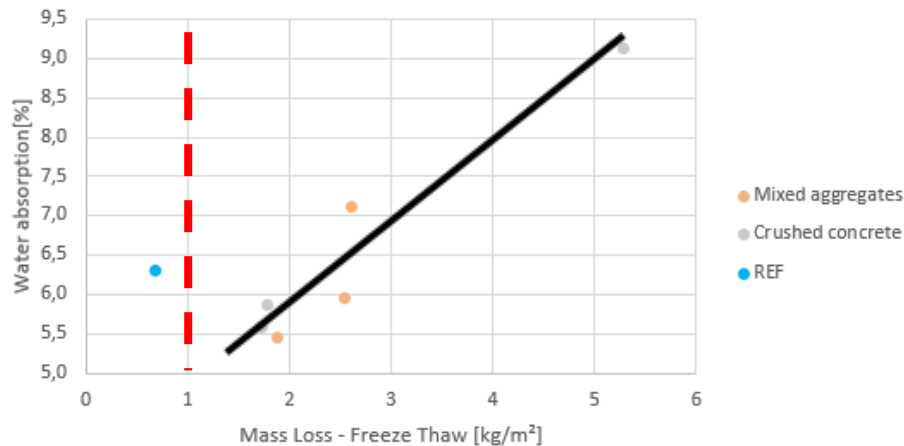
Cycles de gel-dégel à 28 jours:

- Valeur à respecter pour la norme béton routier
 - Perte de masse moyenne $< 1 \text{ kg/m}^2$
 - Valeur individuelle $< 1,5 \text{ kg/m}^2$

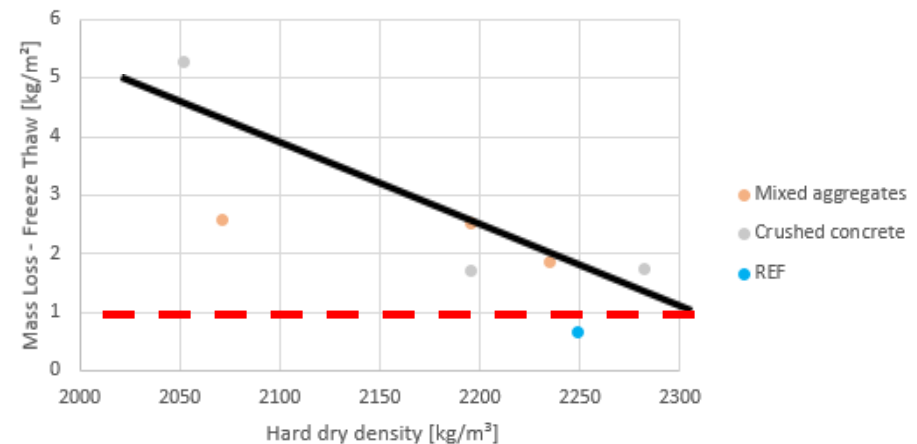


Corrélation forte entre la perte de masse lors des cycles de gel-dégel et l'absorption d'eau ou la masse volumique

Water absorption / Mass Loss



Freeze thaw / Hard dry Density



Afin de respecter les critères, il faut diminuer l'absorption d'eau et augmenter la masse volumique \Rightarrow diminuer la porosité



Production de béton à haut pourcentage en granulats recyclés:

- ▶ Résistance mécanique ☒
- ▶ Absorption d'eau ☒
- ▶ Durabilité (gel-dégel) ☐

⇒ **Difficilement applicable aux environnements les plus agressifs mais il est tout à fait admissible de les utiliser pour bétons structuraux dans des pourcentages excédant ceux recommandés par NBN EN 206 et NBN B 15-001**



Production de blocs de construction à base de granulats recyclés

- ▶ Anciens blocs en béton (C8/10 provenant de chez PREFER)
- ▶ Broyage avec un concasseur à mâchoire (ouverture $\approx 10\text{mm}$)
- ▶ Tri granulométrique par criblage (0/20mm)
 - 4 coupures granulométrique : 0/2 - 2/6.3 - 6.3/14 - 14/20



Plus d'info : https://www.uee.uliege.be/cms/c_3680187/fr/uee-conrepad



CONTEXTE GLOBAL

CADRE NORMATIF

PROPRIÉTÉS DES GRANULATS RECYCLÉS

PROPRIÉTÉS DES BÉTONS À BASE DE GRANULATS RECYCLÉS

RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION





A RETENIR

- ▶ Utilisation des granulats recyclés dans le bâtiment
 - Traitement pour des granulats recyclés de bonne qualité
 - Valeurs normatives « dépassable »
 - Résistance mécanique assurée pour ouvrages courants
 - Durabilité: proscrire dans les environnements agressifs

RECOMMANDATIONS

- ▶ Installation de centre de tri en zone peri-urbaine
- ▶ Schéma de déconstruction et traçabilité des déchets
- ▶ Ouverture des appels d'offre aux granulats recyclés et inclusion d'un taux de substitution minimal dans les marchés publics
- ▶ Evolution du cadre normatif
- ▶ Encourager par des mesures économiques l'utilisation de granulats recyclés





Guide bâtiment durable

www.guidebatimentdurable.brussels

Sites internet

- Formations Bâtiment durable

<https://environnement.brussels/thematiques/batiment/les-bonnes-pratiques-pour-construire-et-renover/pour-vous-aider/formations-116>

- Projet SeRaMCo

<https://www.nweurope.eu/projects/project-search/seramco-secondary-raw-materials-for-concrete-precast-products/>

https://www.youtube.com/channel/UCfga7zKAKFbfSkuTc3zUo_A



Ouvrages

- UEPG. 2018. European Aggregates Association. Annual Review. 2019-2020. 17 p.
- CEN, 2013. NBN EN 206-1: Concrete - Part 1: Specification performance, production and conformity
- CEN, 2018. NBN B 15-001: Concrete - Specification, performance, production and conformity - National supplement to NBN EN 206:2013+A1:2016



Julien Hubert

Ingénieur de recherche

Université de Liège

☎ + 32 4 366 92 24

✉ julien.hubert@uliege.be



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

