

RENCONTRE BESIX

Luc Courard, Arthur Fanara, Sophie Grigoletto, Imad Kanjo,
Romain Libert, Yeakleang Muy, Ta Minh Phuong Bao, Julien Troquay

University of Liège

Mercredi 3 septembre 2025

Experimental and Numerical Investigation of RAC Durability

A. Fanara

Experimental Study: Overview

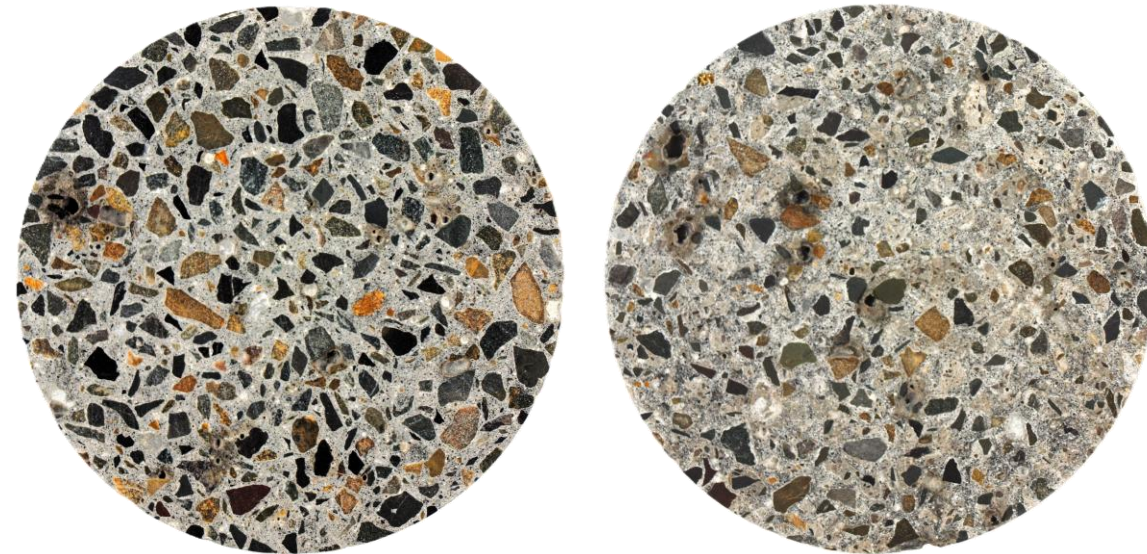
1. NAC: A micro-concrete comprising 2/8 natural aggregates of limestone origin;
2. RAC: A micro-concrete comprising 2/8 recycled concrete aggregates (from SeRaMCo) (same PSD and volume fraction than NAC, constant W/C);
3. E-M: A mortar composed of natural 0/2 Rhine sand with C.E.M. method.

▶ Water transfer properties

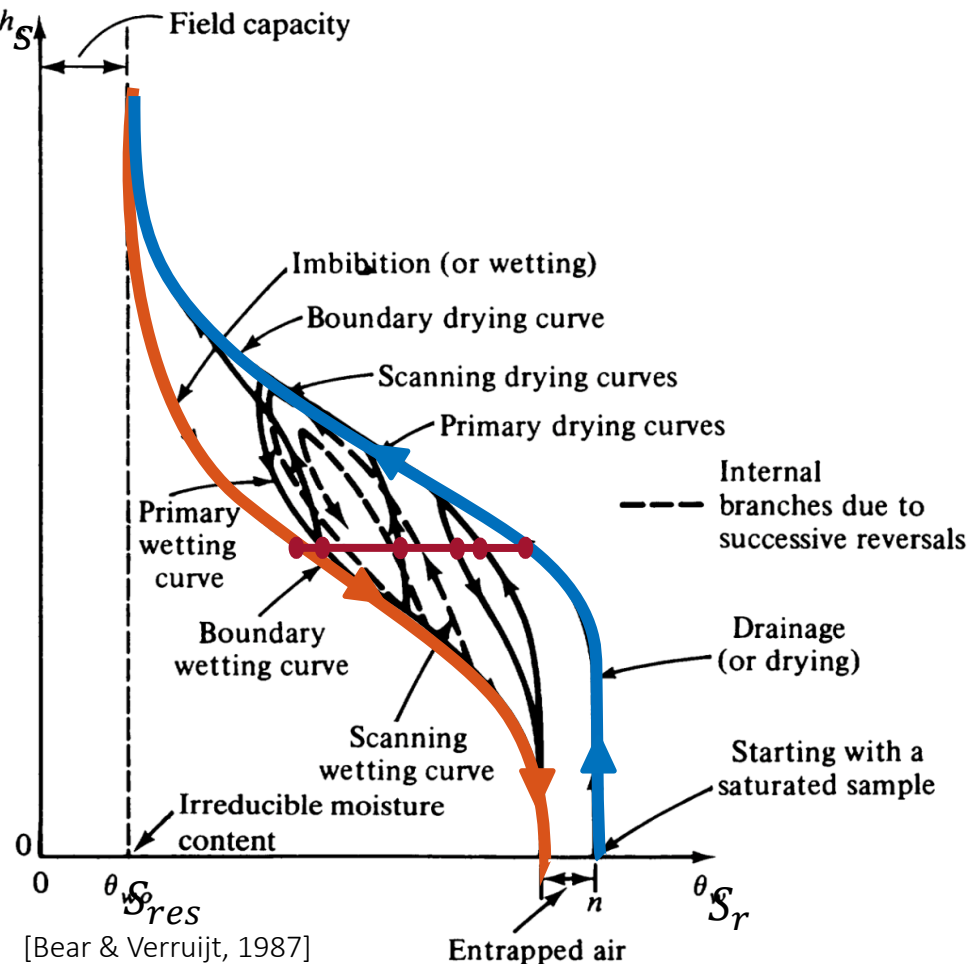
- ▶ Water Absorption by Immersion (WAI)
- ▶ Intrinsic Water Permeability experiment
- ▶ Static Sorption and Desorption experiment

▶ Chloride ions transfer properties

- ▶ Chloride diffusion under steady-state
- ▶ Chloride diffusion under unsteady-state
- ▶ Conduction

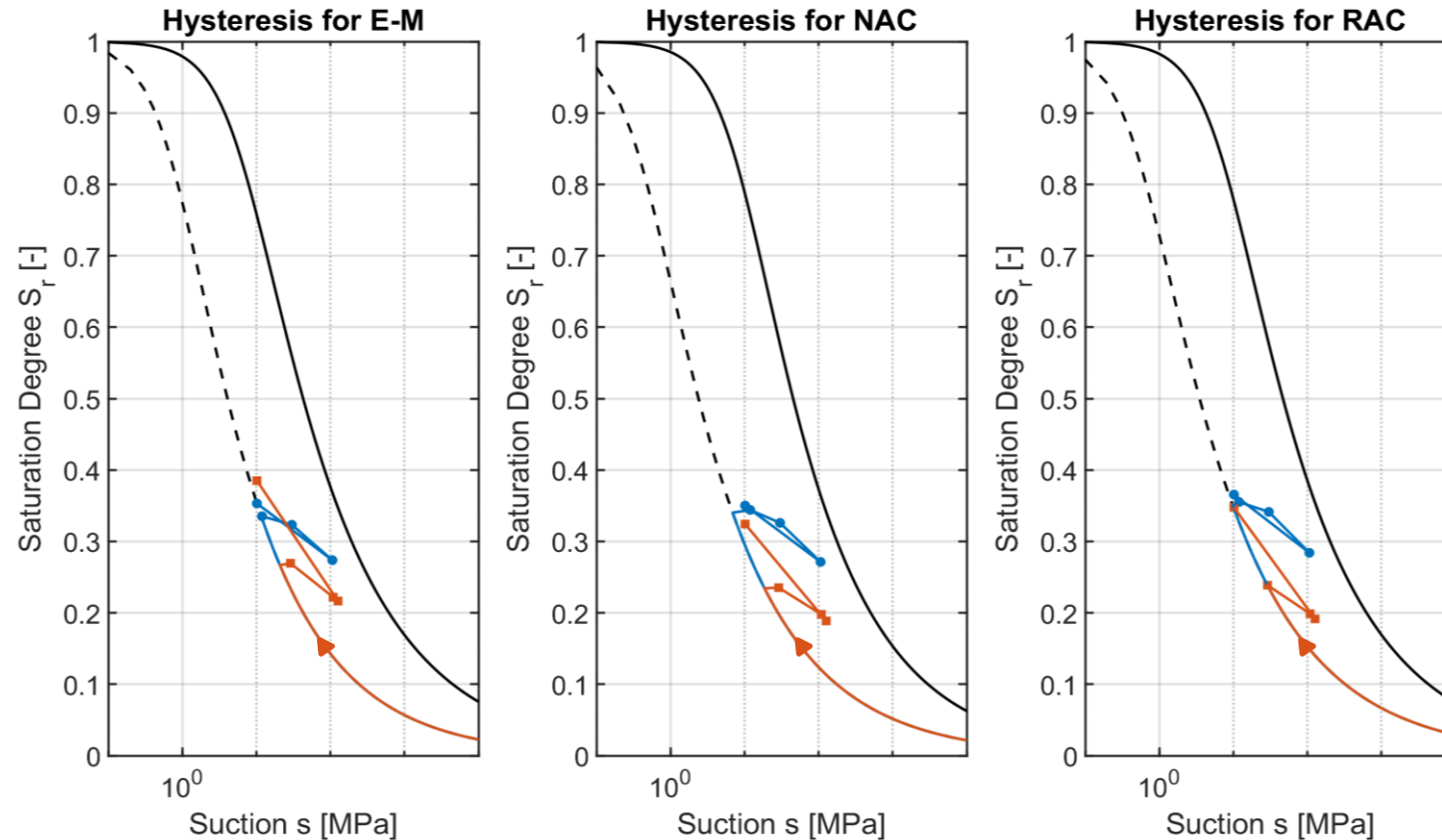


Experimental Study: Static Sorption and Desorption



Starting RH	Chamber 1	Chamber 2	Chamber 3	Chamber 4
0%	91.60%	80.30%	45.74%	92.78%
0%	80.84%	45.31%	39.37%	92.78%

Experimental Study: Static Sorption and Desorption



Starting RH	Chamber 1	Chamber 2	Chamber 3	Chamber 4
0%	91.60%	80.30%	45.74%	92.78%
0%	80.84%	45.31%	39.37%	92.78%

Experimental Study: Chloride Diffusion under Unsteady State

- Apparent diffusion coefficient
- NBN EN 12390-11
- 80x50mm cylinders

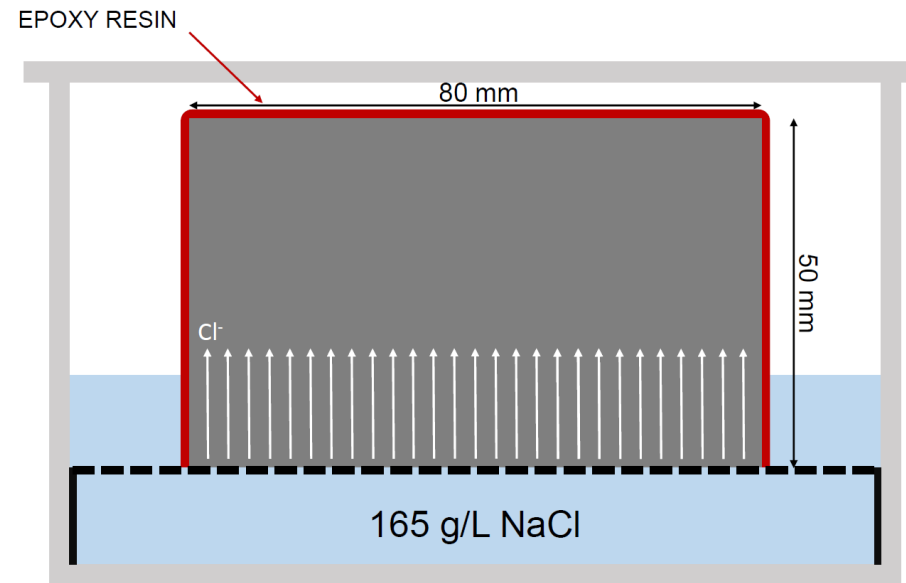
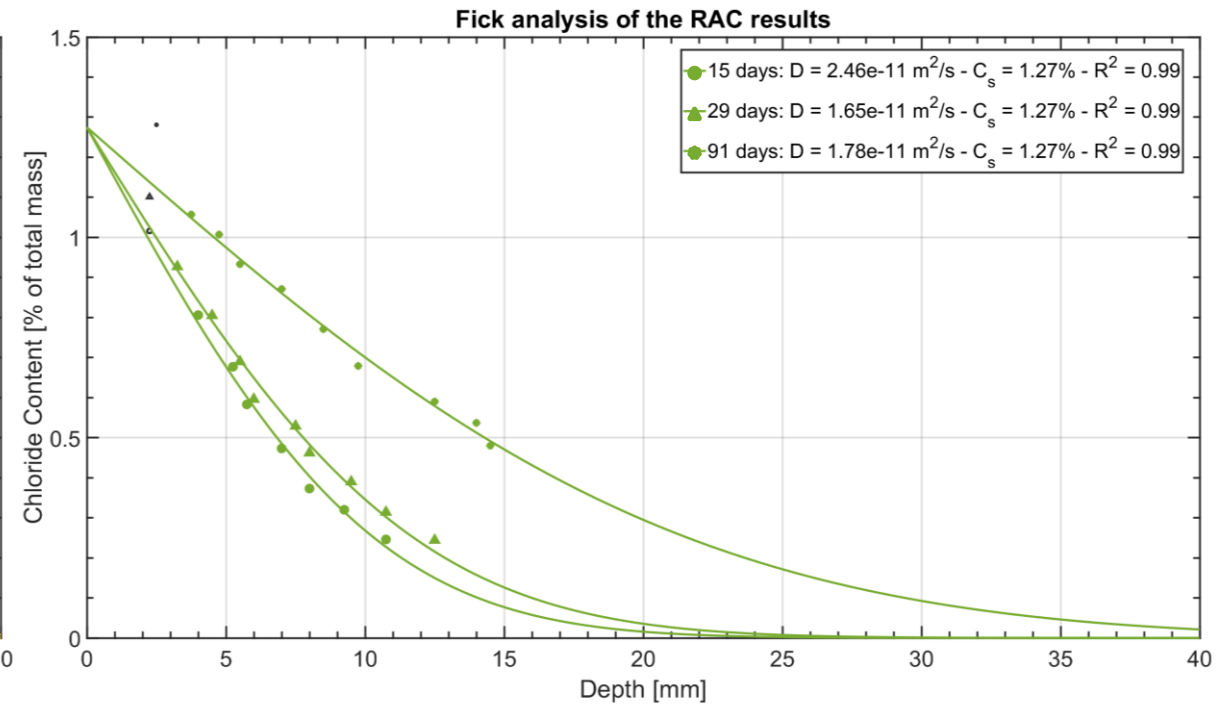
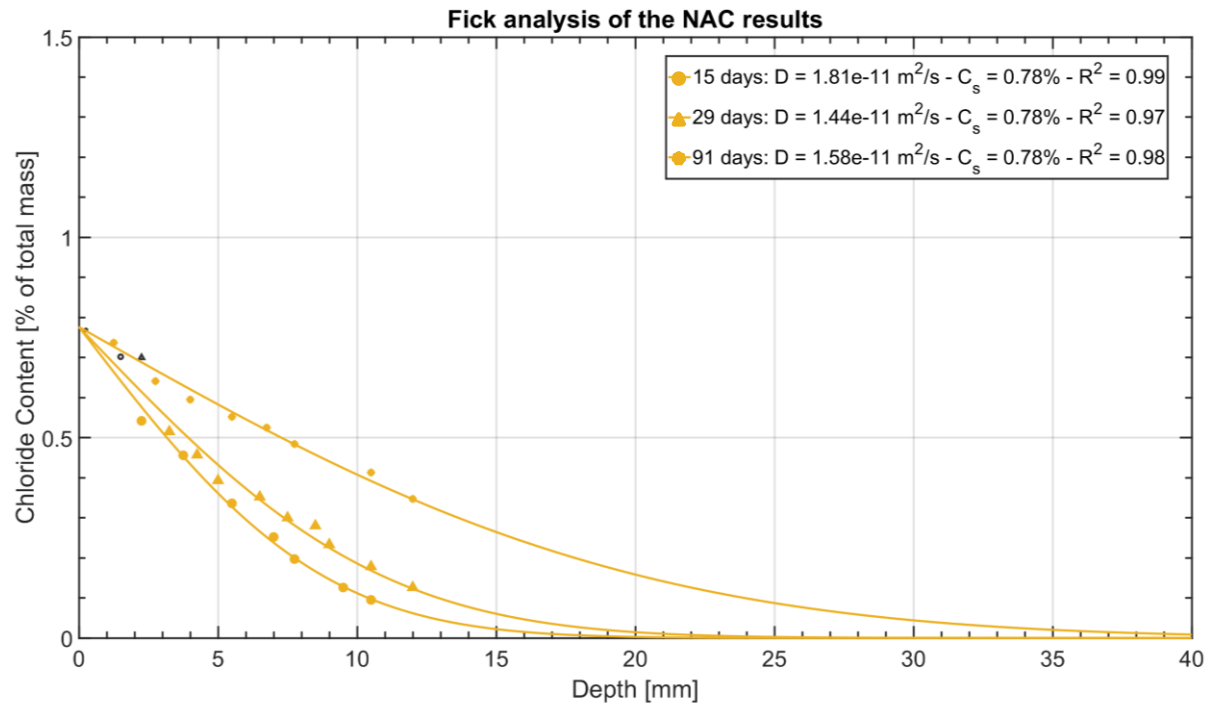


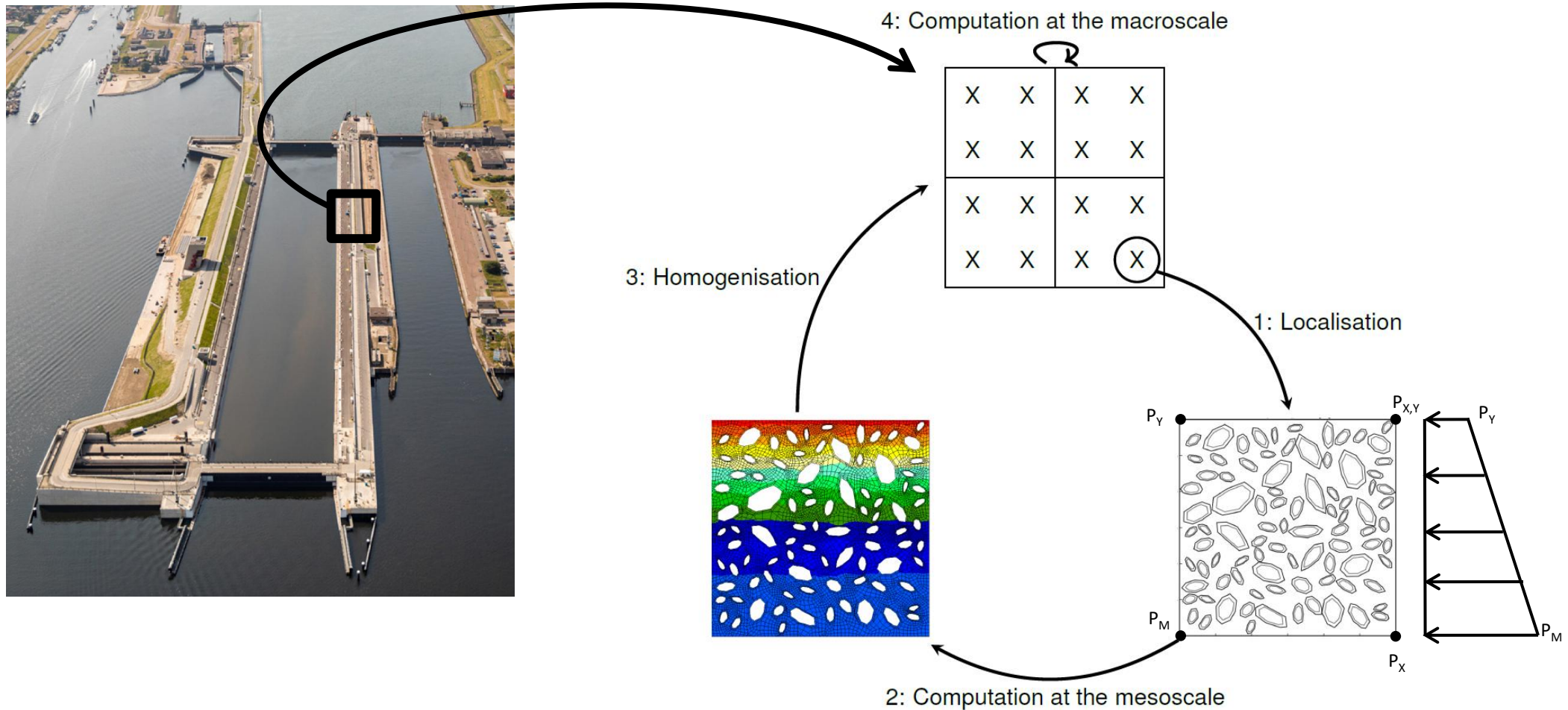
Figure 4.5: Experimental system for the diffusion under unsteady-state.

Experimental Study: Chloride Diffusion under Unsteady State

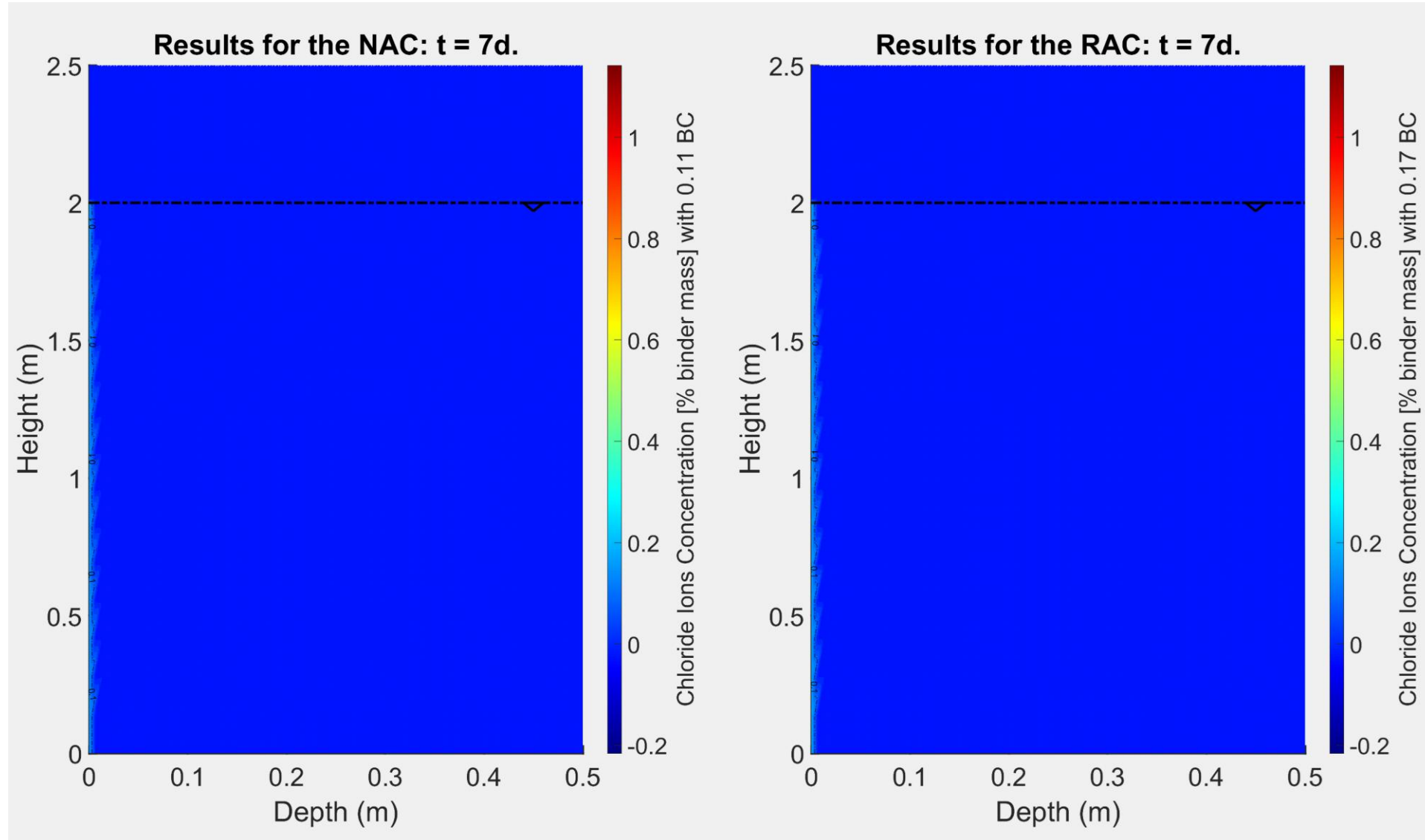


$$C(x, t) = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{app}t}} \right) \right) \quad \text{with} \quad C_s[\%] = C_{sol} [\text{g/L Cl}^-] \frac{n [\% \text{ volume}]}{\rho_d [\text{kg/m}^3]}$$

Numerical Investigation: Development of a multiscale FE² model



Numerical Investigation: Modelling of an Application under Realistic BC



Mitigation of alkali-silica reaction through carbonation of recycled concrete aggregates

PhD thesis – S. Grigoletto

Introduction

Concrete Production Volumes ↑
→ Consumption of natural aggregates ↑
+
Concrete = larger part of C&D waste
→ Problematic waste management



Use of **recycled concrete aggregates (RCA)**



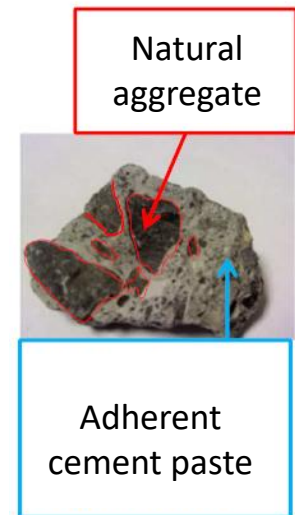
©Shutterstock

But higher porosity of the cement paste

- Water absorption ↑
- Mechanical properties ↓

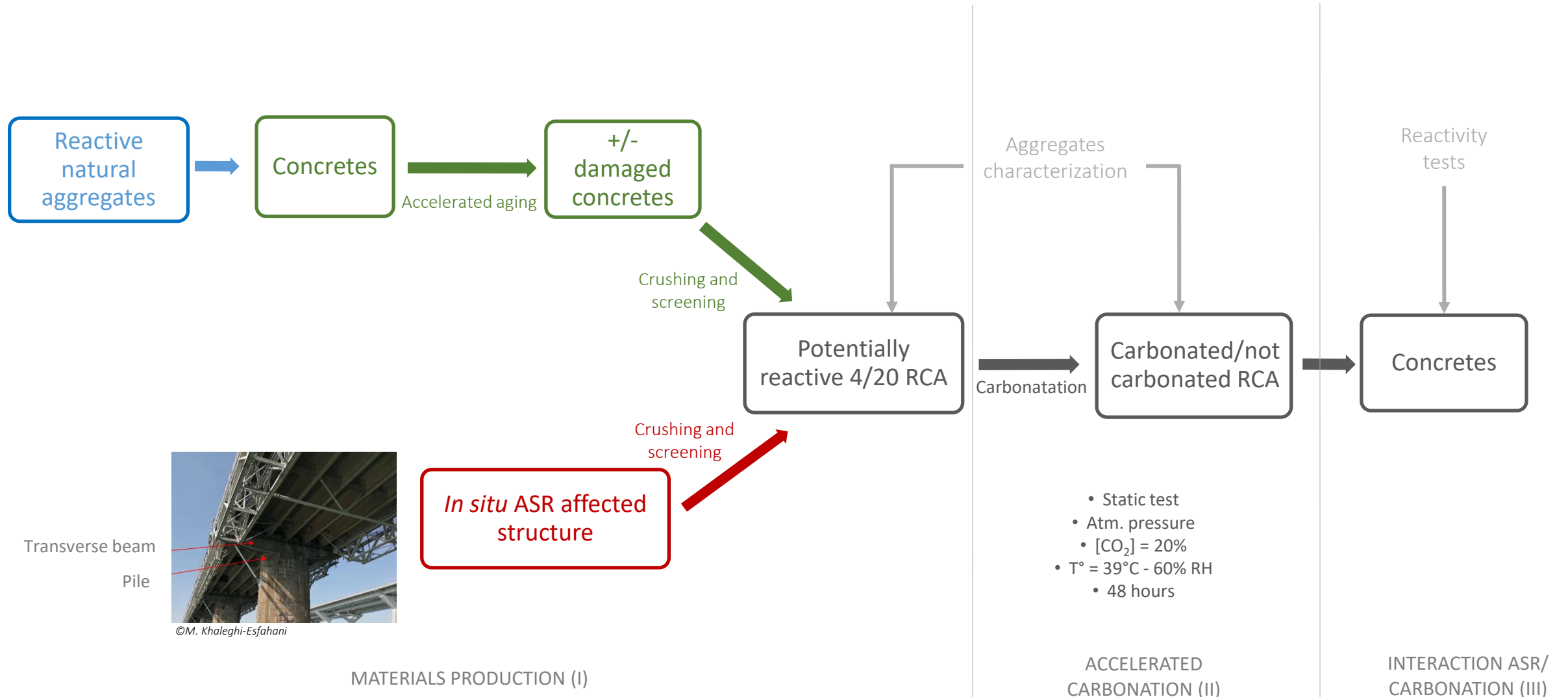
⇒ Limited use of RCA because of lower mechanical and **durability** performances

In particular: secondary expansion due to alkali-silicate reaction



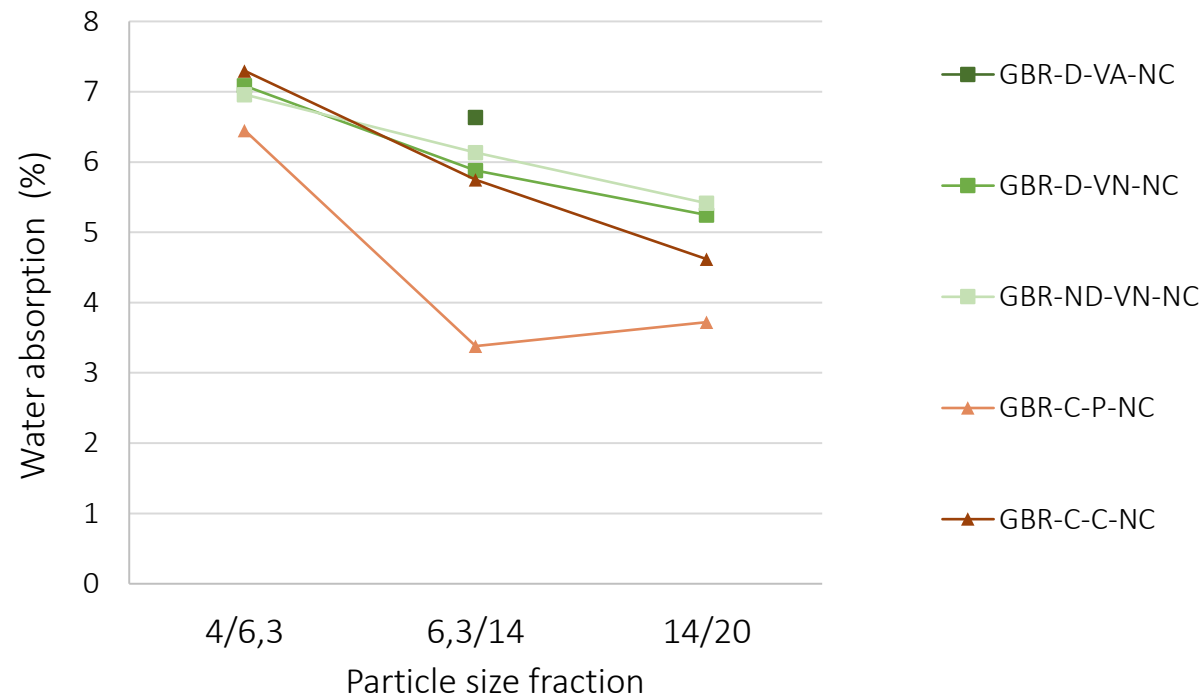
Adapted from Z.Zhao, 2016

Method



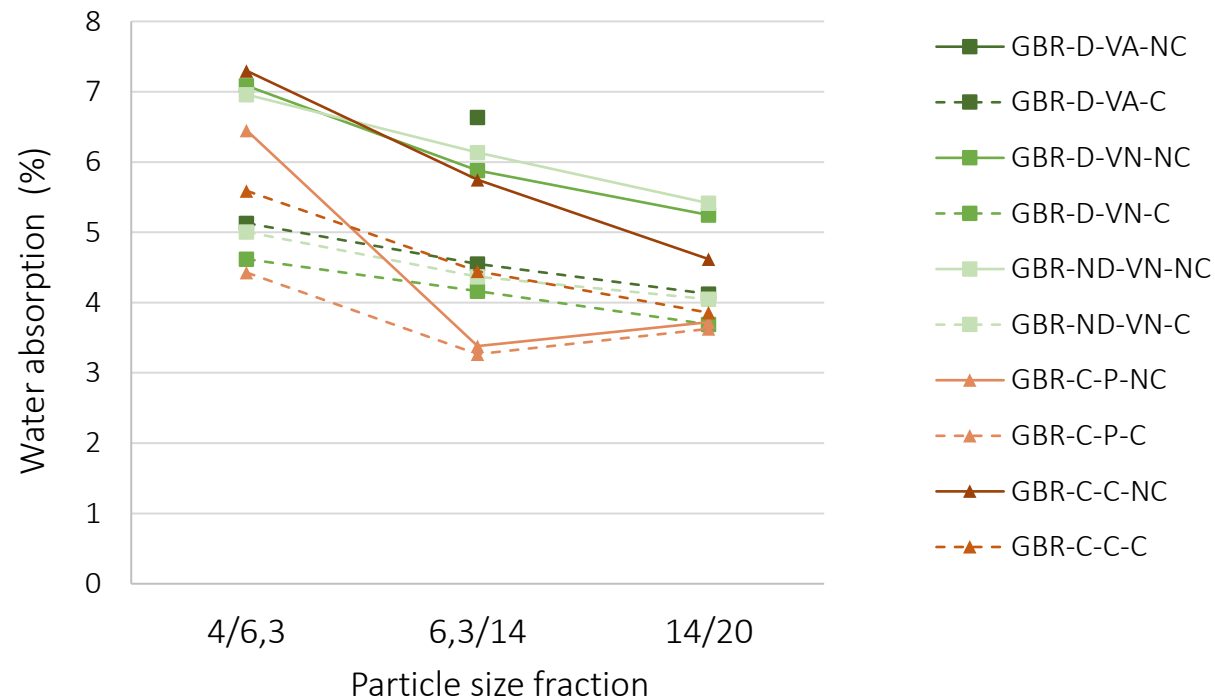
RCA characterization – influence of carbonation

Impact of carbonation on water absorption

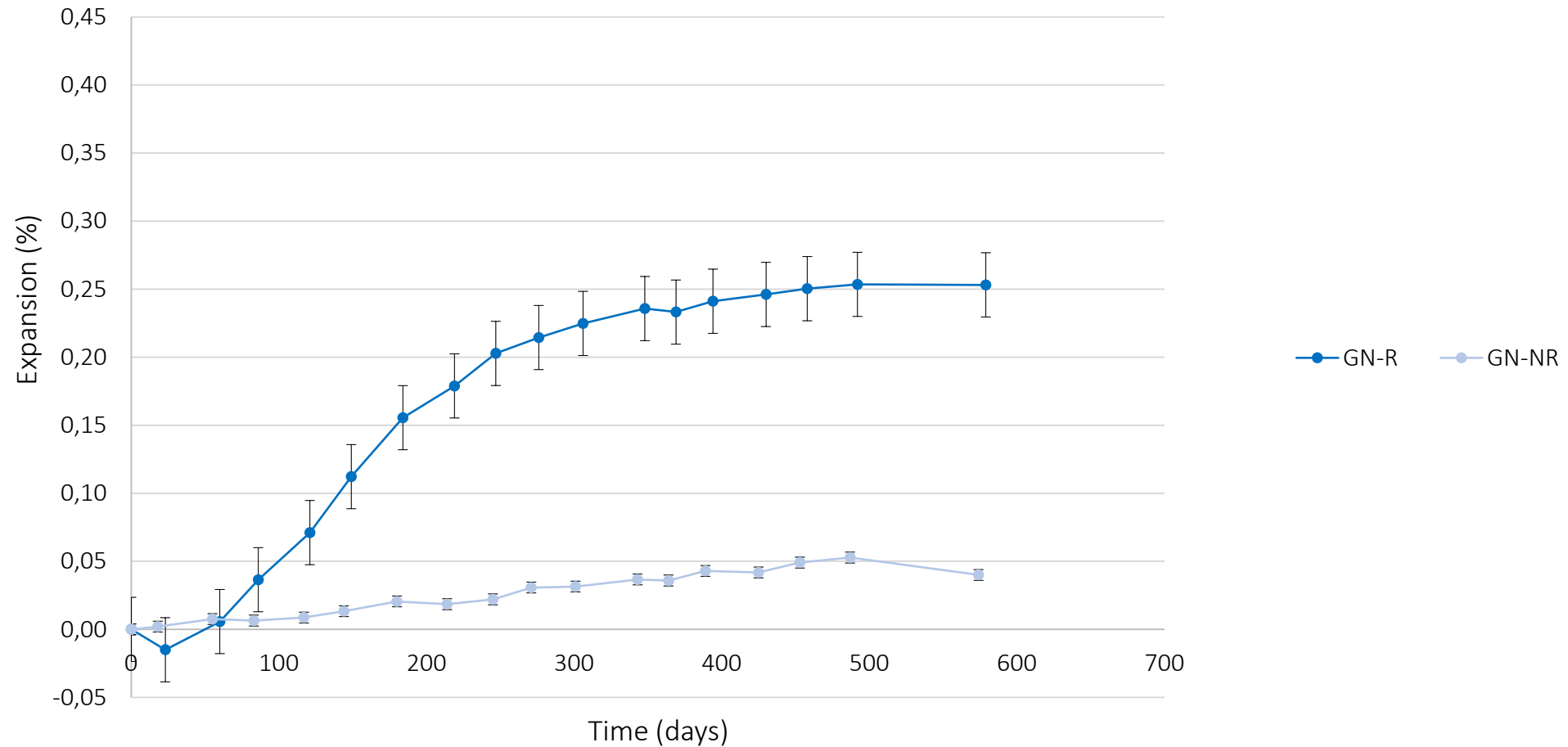


RCA characterization – influence of carbonation

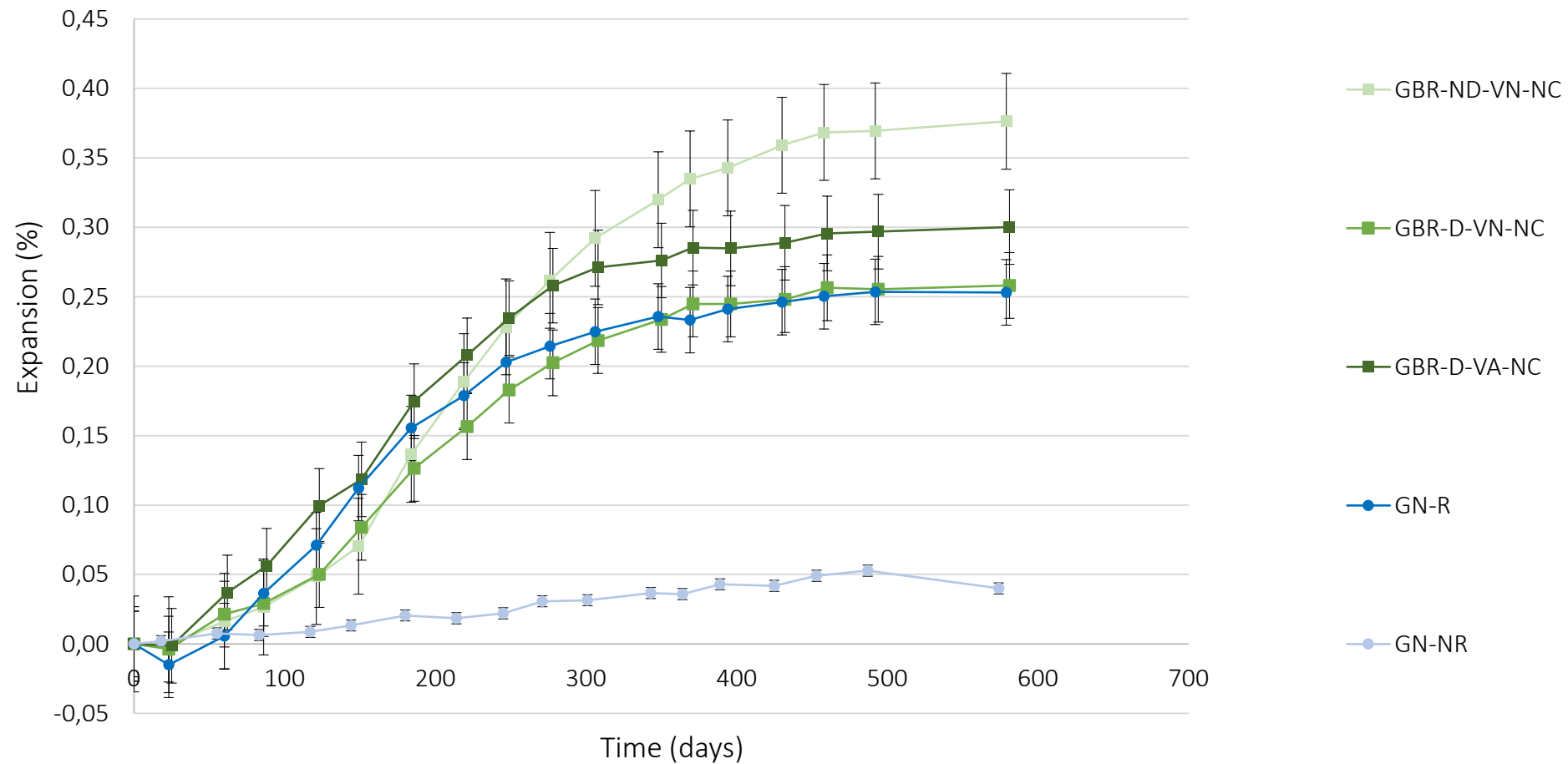
Impact of carbonation on water absorption



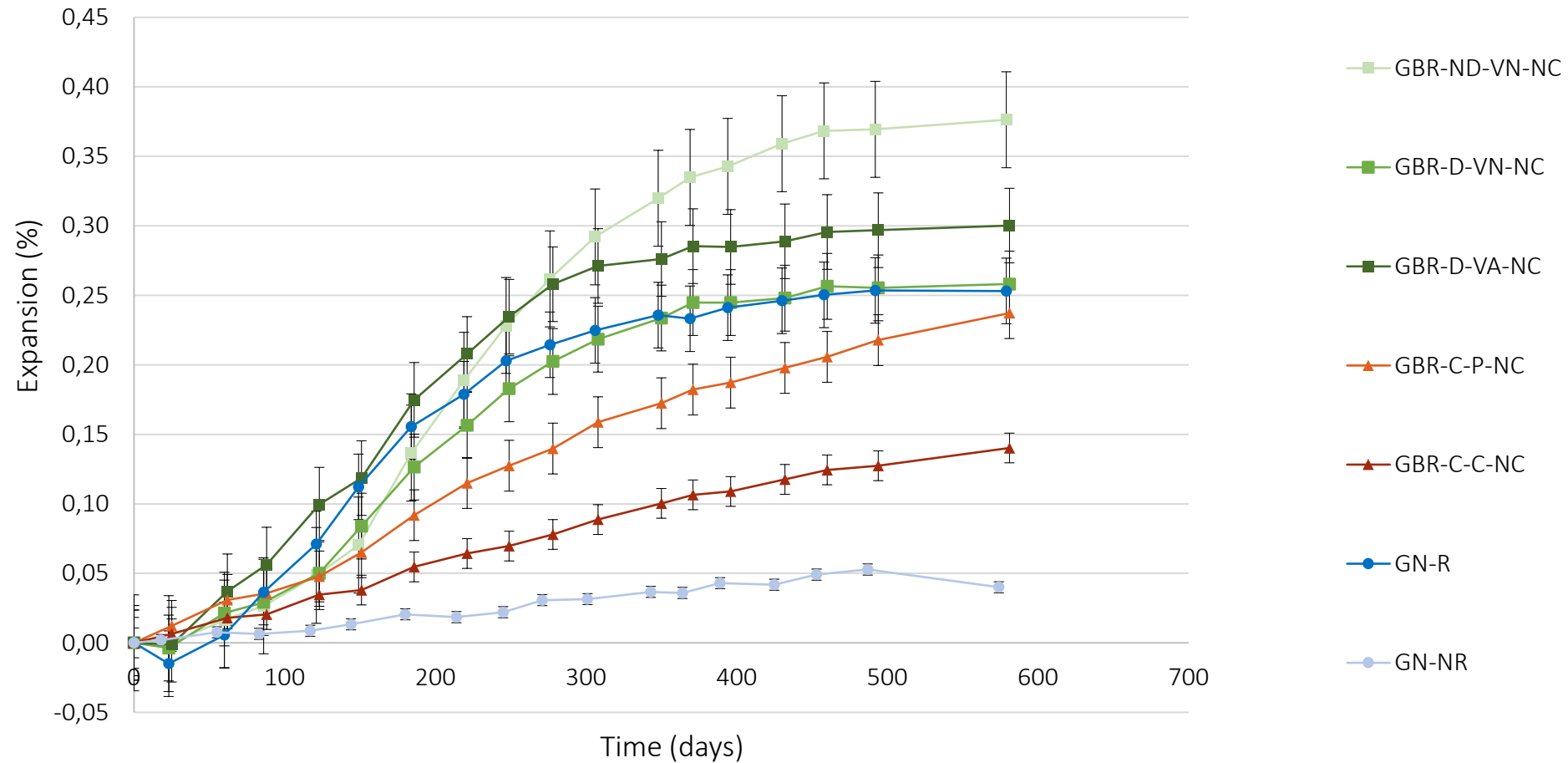
Reactivity tests on concrete (NF P18-594)



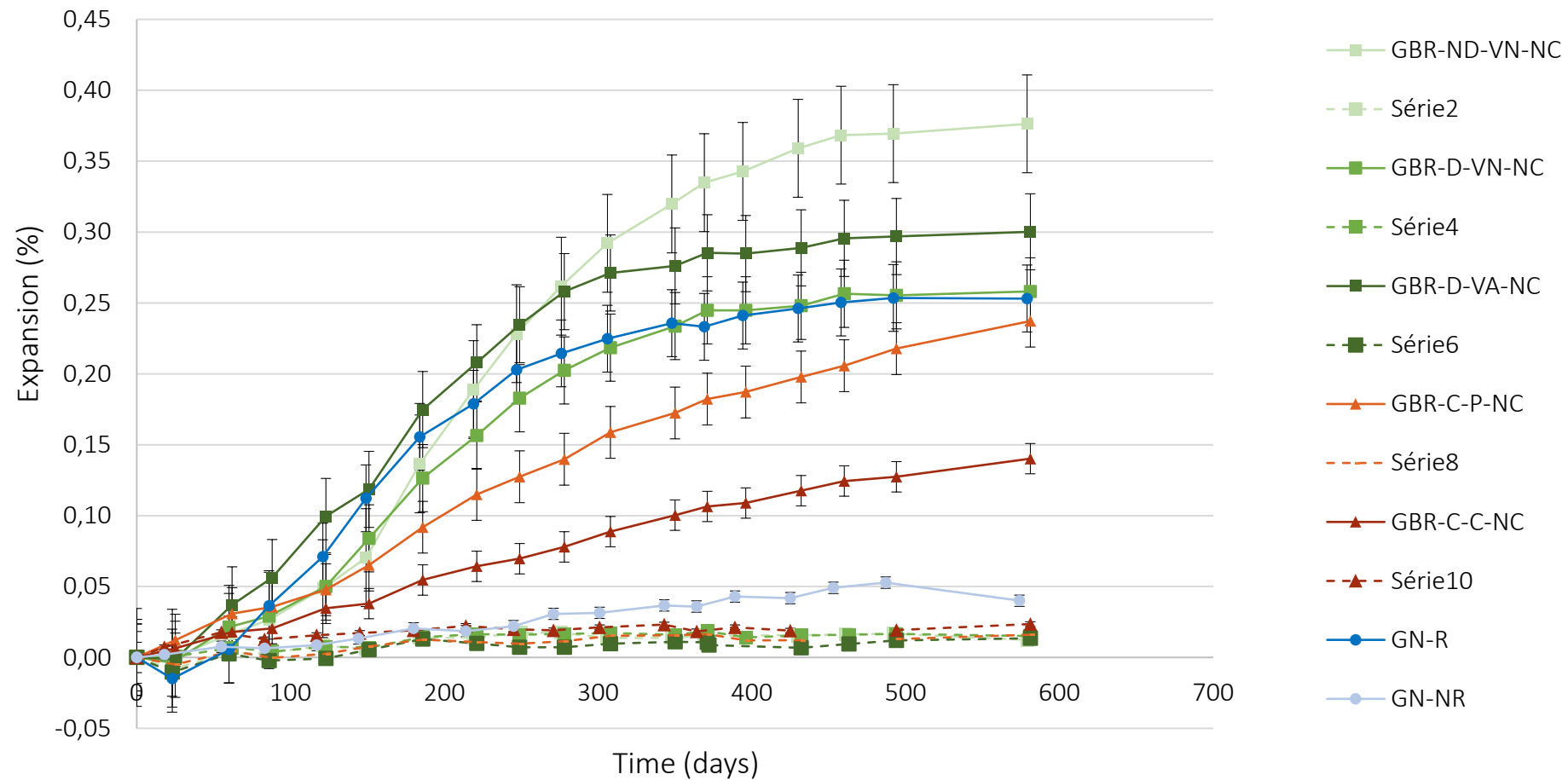
Reactivity tests on concrete (NF P18-594)



Reactivity tests on concrete (NF P18-594)



Reactivity tests on concrete (NF P18-594)





Mineral Loop

Valorization of Mineral Waste Through Accelerated Carbonation



Context

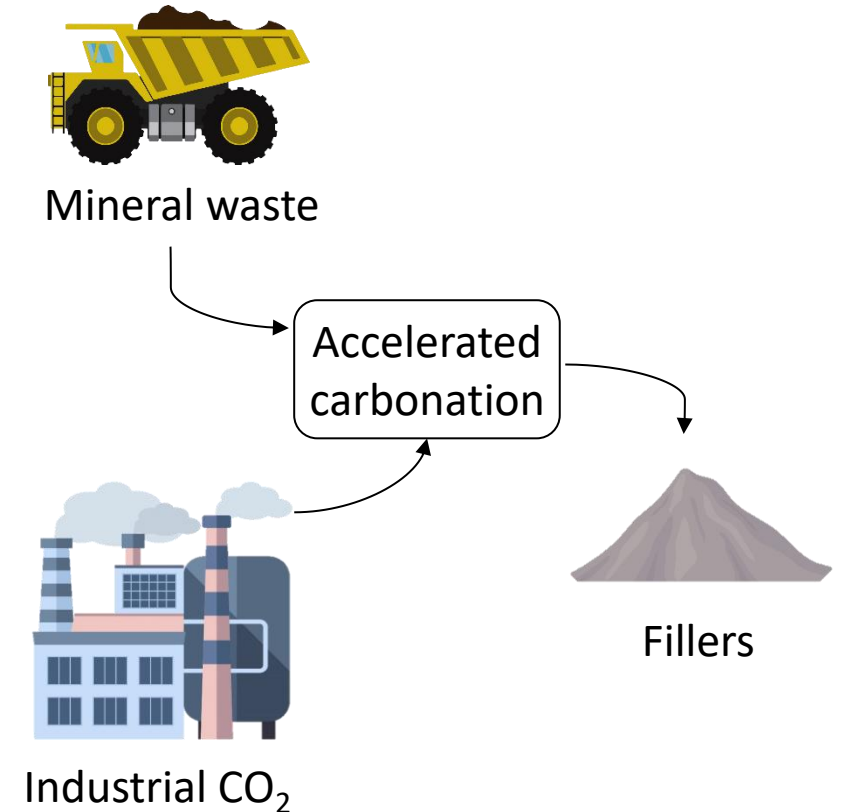
Mineral waste

- Largest waste stream in Europe
- Rarely recycled

→ Accelerated carbonation as an innovative pathway to transform alkaline industrial by-products into **valuable construction materials**.

Aim of this study

Bring added value to some carbonated mineral waste by valorizing them as a **partial substitute for cement** in mortar composition.



Materials & Dynamic Carbonation Process



Fiber Cement Fines

Demolition waste



Aerated Concrete Fines

Demolition waste



Limed WWTP Sludge

Wastewater treatment plant by-product

- Processed through a 100 μm sieve
- Compared to a limestone with a high content of finely ground pure calcium carbonate
- Industrial Carbonation Setup
 - 120L hermetically sealed tank with controlled gas supply
 - Axial rotor with 6 lifting blades ensuring optimal material mixing
 - Variable CO_2 concentrations (20 or 100%)
 - Processing times: 120-180 minutes depending on material properties



Methods

Mortar Composition

Portland cement (CEM I 52.5 N) substituted at **10%, 20%, and 30%** replacement rates by mass following NBN EN 196-1 standards

Workability Assessment

Fresh mortar **consistency measured** using flow value determination per NBN EN 1015-3 standard protocols

Compressive and Flexural Strength Testing

Hardened mortar specimens tested at **7 and 28 days** according to NBN EN 1015-11 to determine mechanical performance

Setting Time Analysis

Cement paste setting characteristics evaluated using **needle penetration method** (NBN EN 196-3)

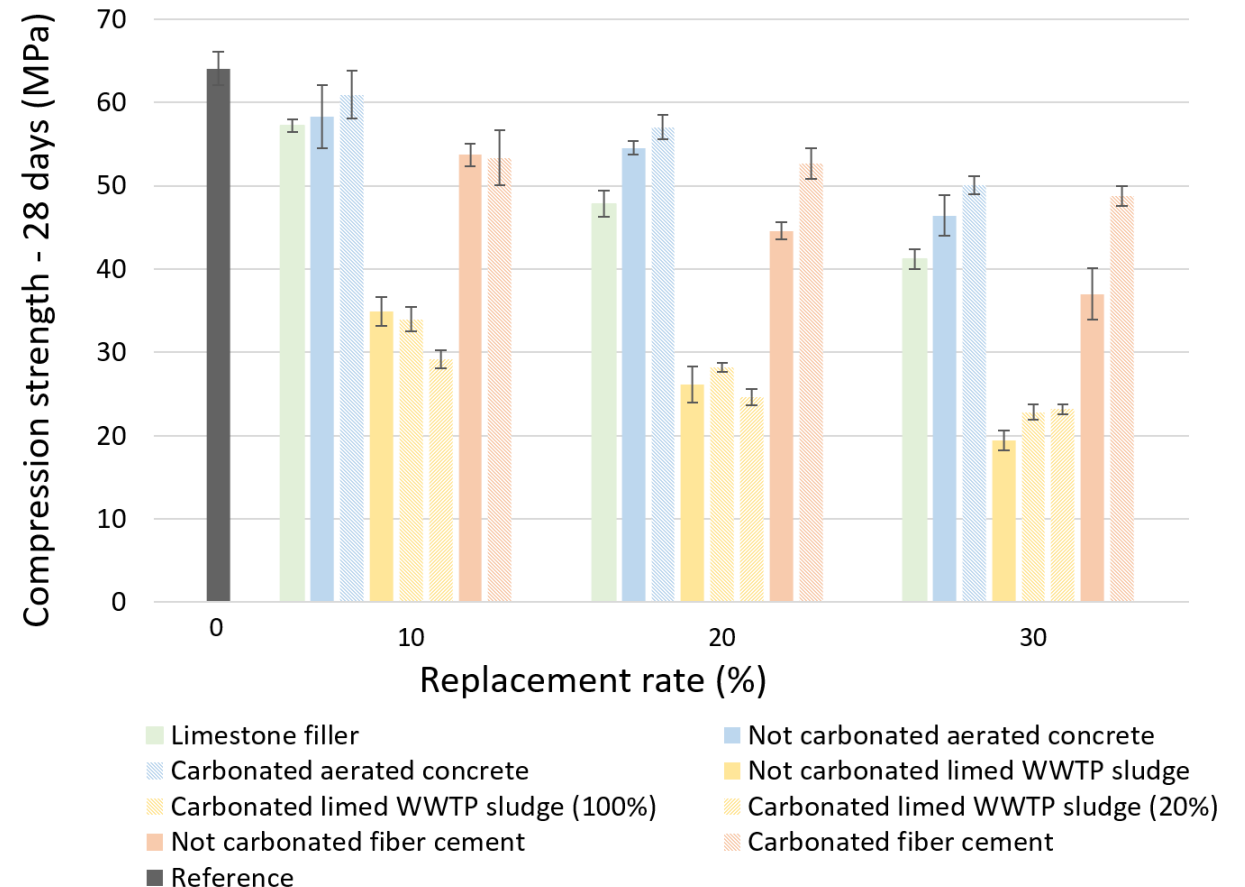
Results

Mechanical properties

Loss of mechanical properties when substitution of Portland cement ↑ :

- Fiber cement and aerated concrete fines: comparable to limestone filler
- Limed WWTP sludge: nearly - 50% at 10% of replacement
-> rejected and not tested further

Carbonation treatment improves mechanical performances compared to specimens made of raw fines.

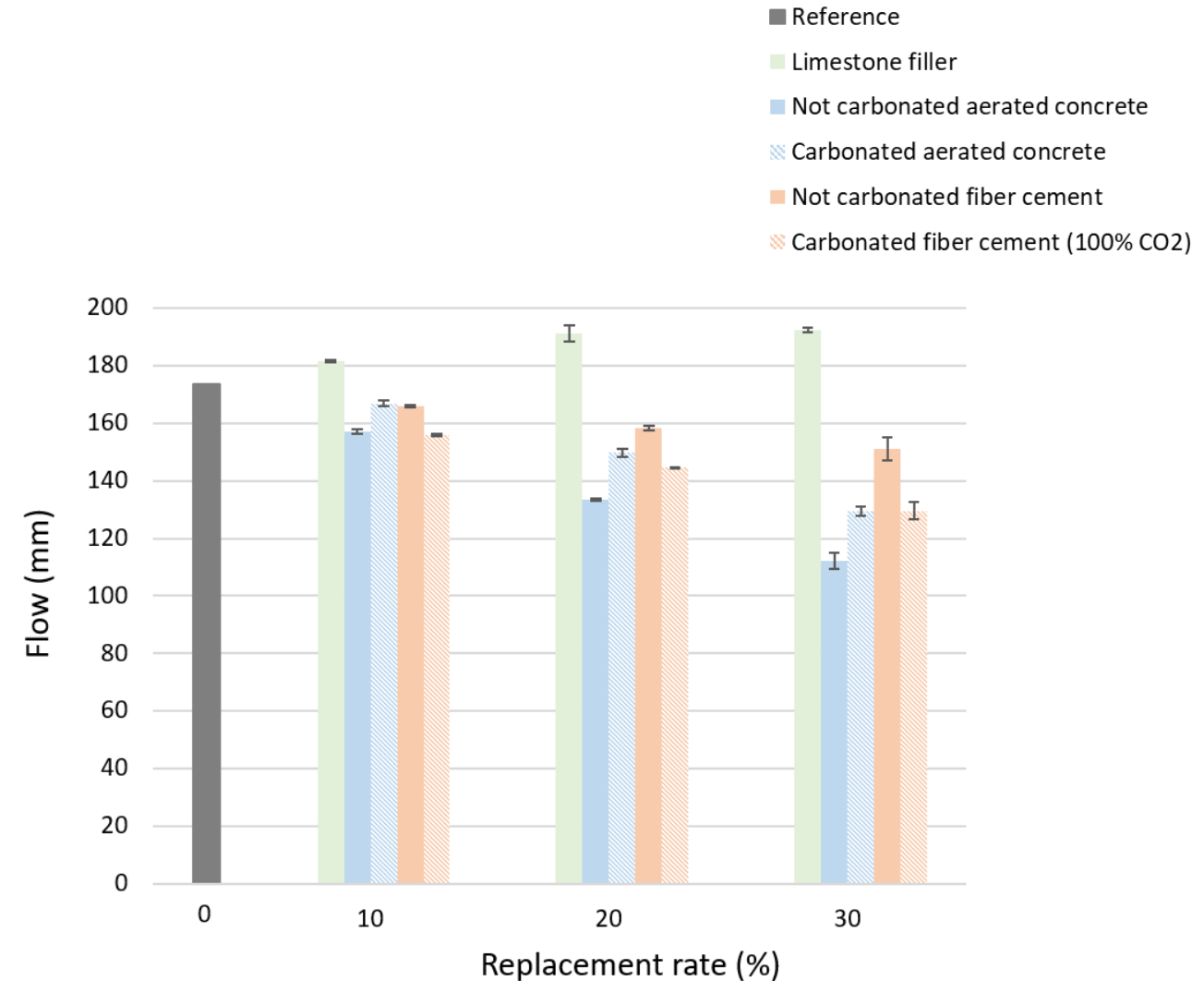


Results

Workability

Unlike limestone filler, **workability** ↓
when replacement rate increases ↑

Carbonation **improves workability** of
mortars made of aerated concrete fines.
Not the case for fiber cement fines,
probably because coming from different
batches.

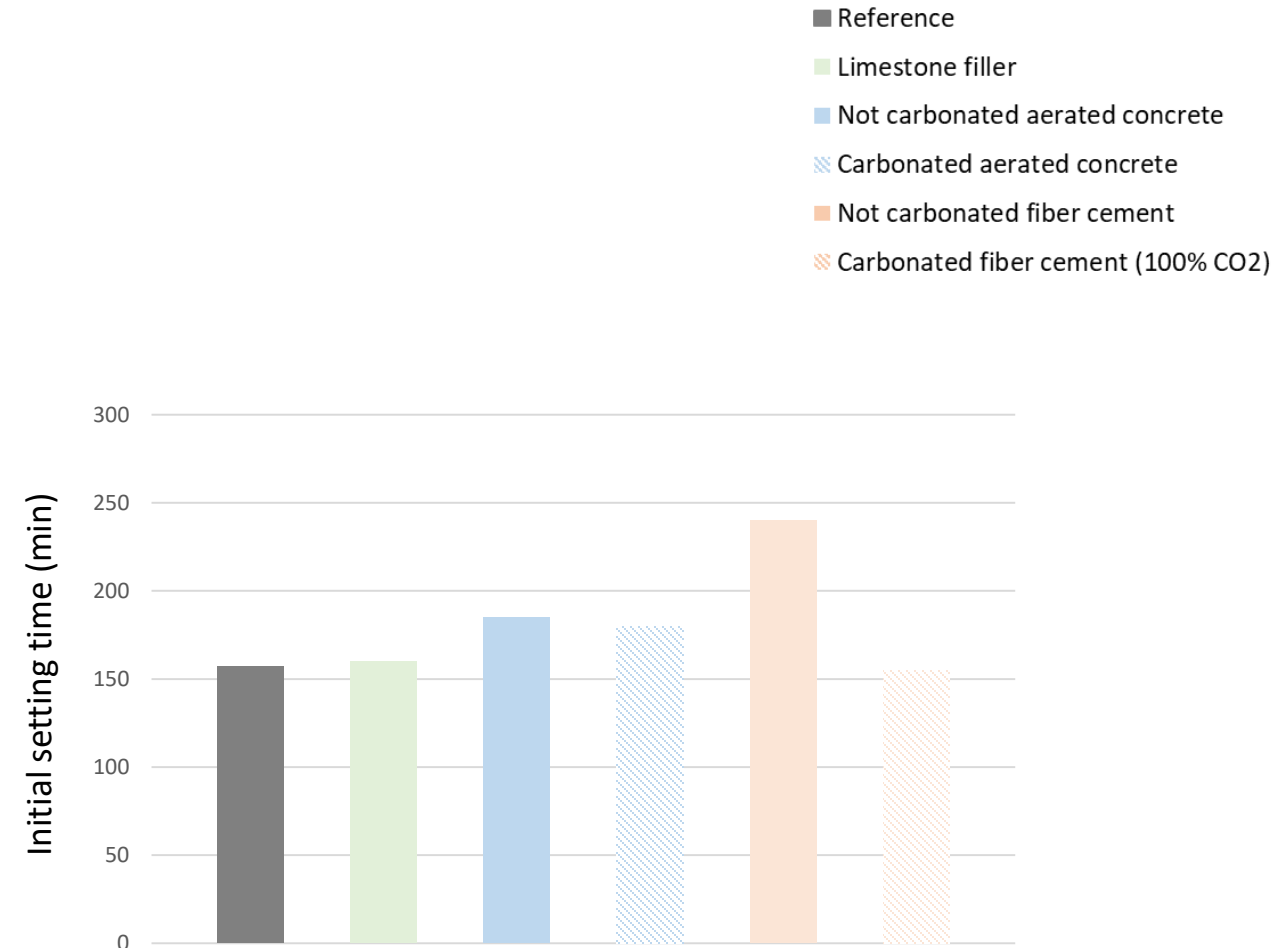


Results

Setting time

Initial setting time ↑ when 30% of aerated concrete or fiber cement fines are used (more than limestone filler at the same rate).

However, **carbonatation of these fines reduces this increase**



Conclusions

- Cement can be partially replaced by carbonated fiber cement and aerated concrete fines **to 30% replacement rate** without losing more than 30% of 28 days compressive strength.
- Due to its high organic matter content, **limed WWTP sludge fines cannot be used** as cement substitute, even when carbonated.
- **Carbonation** of aerated concrete fines seems to improve mortars compressive strength, workability and initial setting time.



CARBOC

Captage et stockage du CO₂ par carbonatation de mâchefers et de béton à teneur réduit en ciment



Introduction

Contexte

Matériaux en pénurie

Consommation granulats naturels: 2.2 milliards de tonnes.

Production des mâchefers : 18 millions tonnes.

Problème Actuel

Stockage des Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères occupe des surfaces importantes et augmente le risque de contamination.

Utilisation Actuelle

Substitution partielle ou total des sables et granulats dans les sous-fondations routières, pavés en béton et blocs de béton.

Solution innovante de traitement

Traitement

Carbonatation accélérée pour minimiser la durée de traitement tout en capturant le CO₂ dans les mâchefers.

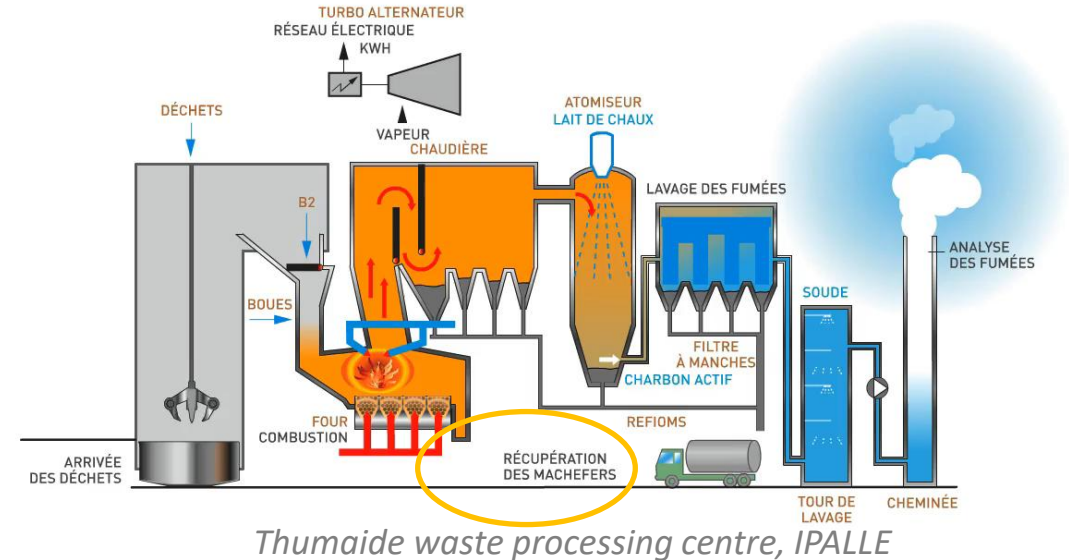
Formations de béton adaptées

Bétons optimisés en maximisant le taux de substitution.

→ **Objectif : Remplacer les granulats et sable naturels par des mâchefers carbonatés**

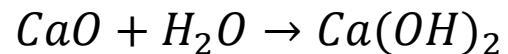
Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères (MIOM)

- Sous-produits vient de l'incinération des déchets résiduels.
- Granulométrie similaire aux sables et granulats naturels.
- Faible densité et grande absorption d'eau par rapport aux sables et granulats naturels

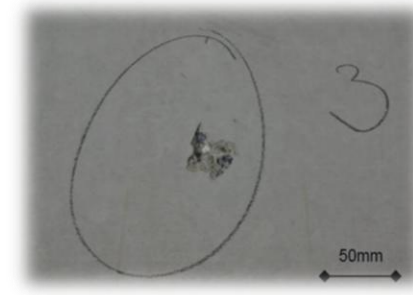
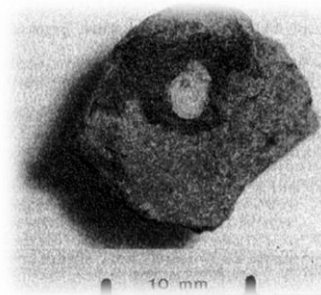


Risques potentiels

- Lixiviation.
- Gonflement des nodules de chaux.



Molécule	CaO	H ₂ O	Ca(OH) ₂
Volume molaire (cm ³ /mole)	16.8		33.1



Traitement : Maturation **vs** Carbonatation **statique** accéléré

Maturation:

- ✗ Durée de traitement : 18 semaines.
- ✗ Inefficace dans certains cas.
- ✗ Dépendant des conditions météorologiques

Carbonatation accélérée:

- ✓ Durée de traitement: 1-7 jours
- ✓ Séquestration du CO₂
- ✓ Conditions contrôlables



Cellule de maturation



Chambre de carbonatation statique

Avantages du traitement par carbonatation accélérée

- Diminution de durée de traitement (18 semaines => 24 heures).
- Amélioration des propriétés physiques des MIOM.
- Captage du 15 ± 3 kg du CO_2 /t de MIOM

	Masse volumique (kg/m^3)	Absorption d'eau (%)
Maturés 0/2	1770	10.7
Carbonatés 0/2	2160	6.7
Maturés 2/6	2060	6.1
Carbonatés 2/6	2380	1.5
Maturés 6/20	2348	3.1
Carbonatés 6/20	2550	1.6

	Maturés	Carbonatés	QUALIROUTES (Béton maigre)
Résistance à l'usure MDE (wt.%)	21	24	<25
Résistance au gel/dégel MS (wt.%)	19	20	<25

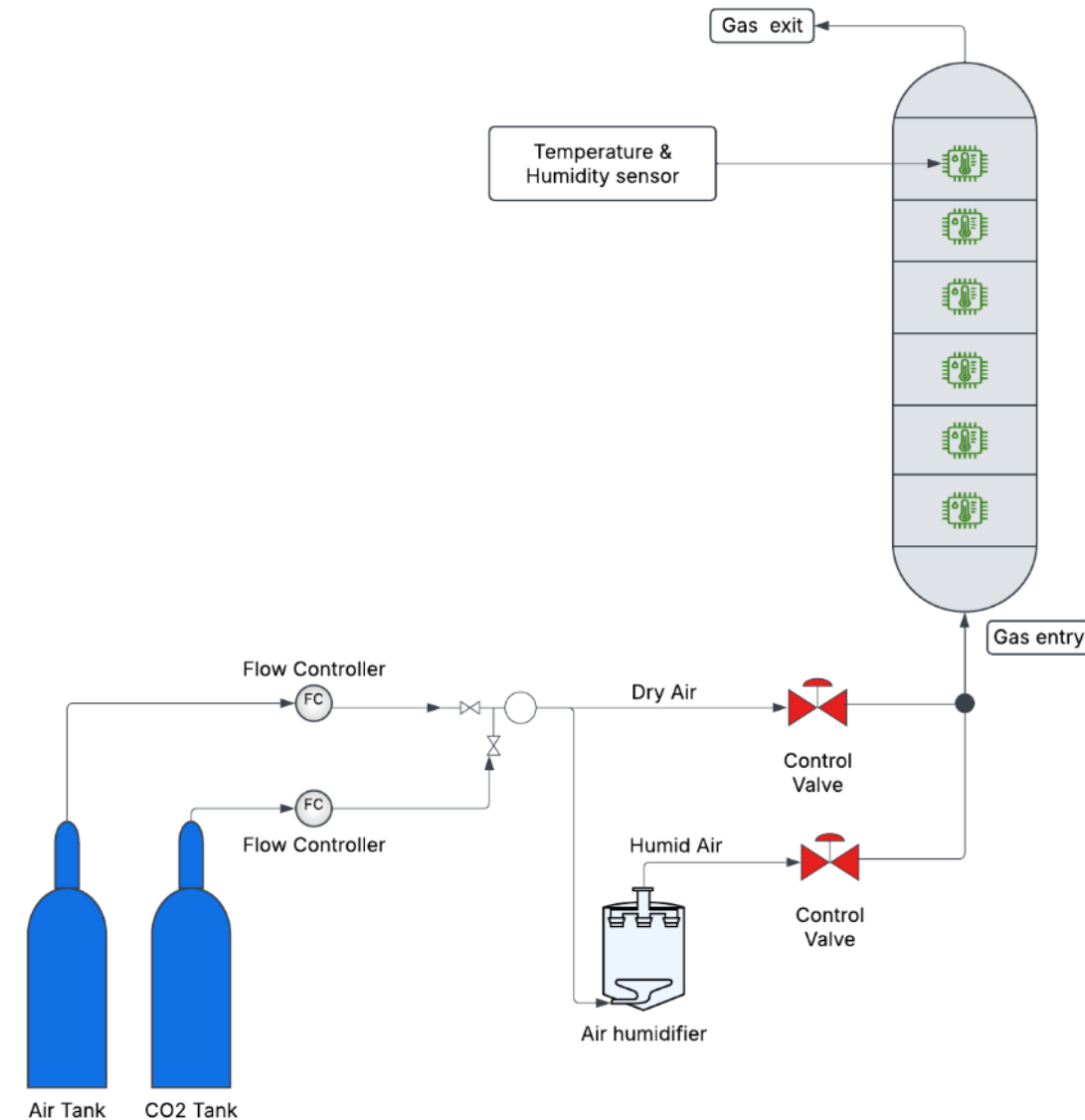
Carbonatation par colonne

Installation ULiège pour la carbonatation en colonne

- Capacité maximale = 150 kg.
- Contrôle d'humidité d'air.
- Débit maximale = 70 L/h.
- Suivi du température et d'HR en temps réel à l'intérieur de la colonne.

Limitations de cet méthode:

- Distribution inégale du CO₂.
- Risque de blocage.
- Durée de traitement parfois élevée.



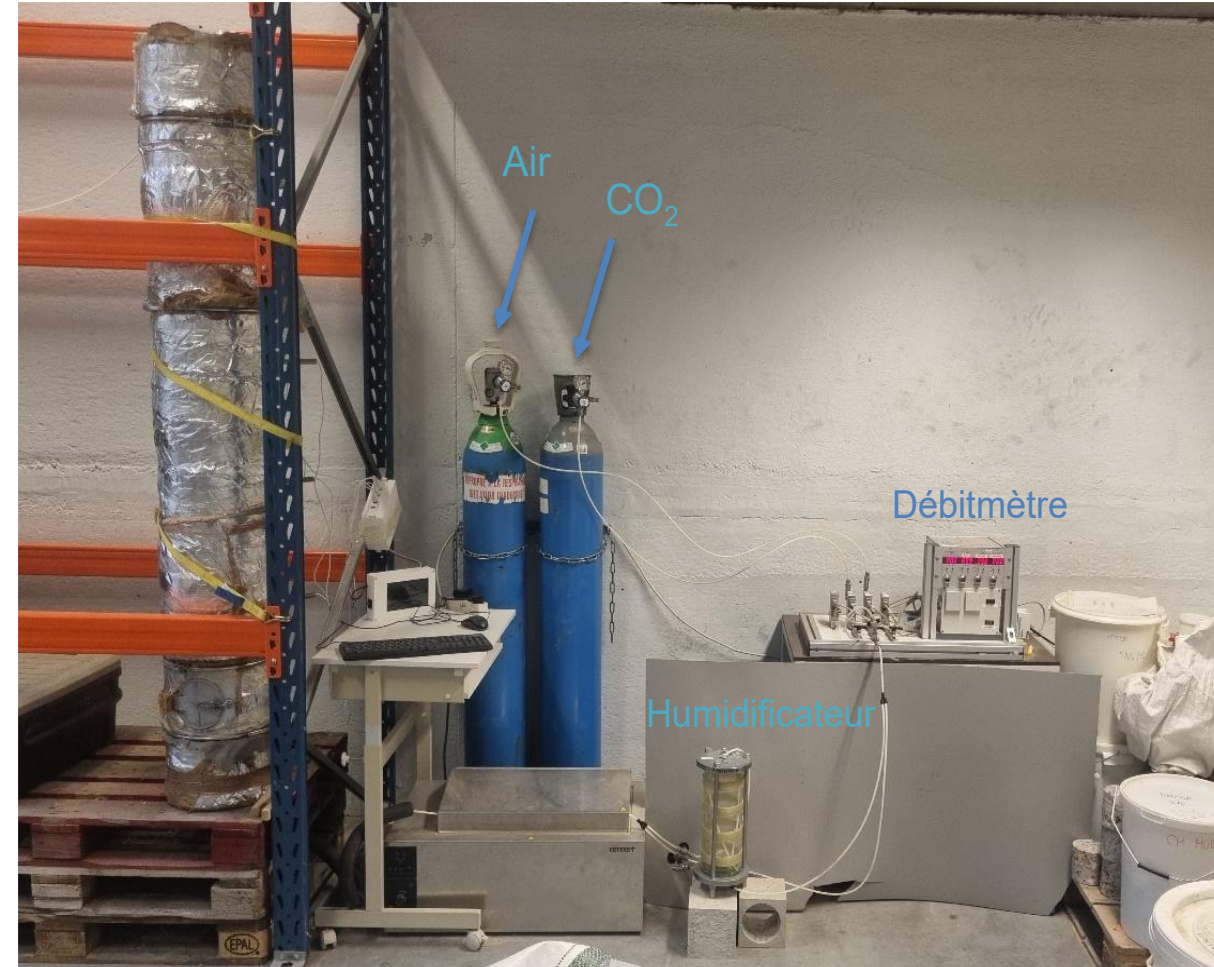
Carbonatation par colonne

Installation ULiège pour la carbonatation en colonne

- Capacité maximale = 150 kg.
- Contrôle d'humidité d'air.
- Débit maximale = 70 L/h.
- Suivi du température et d'HR en temps réel à l'intérieur du colonne.

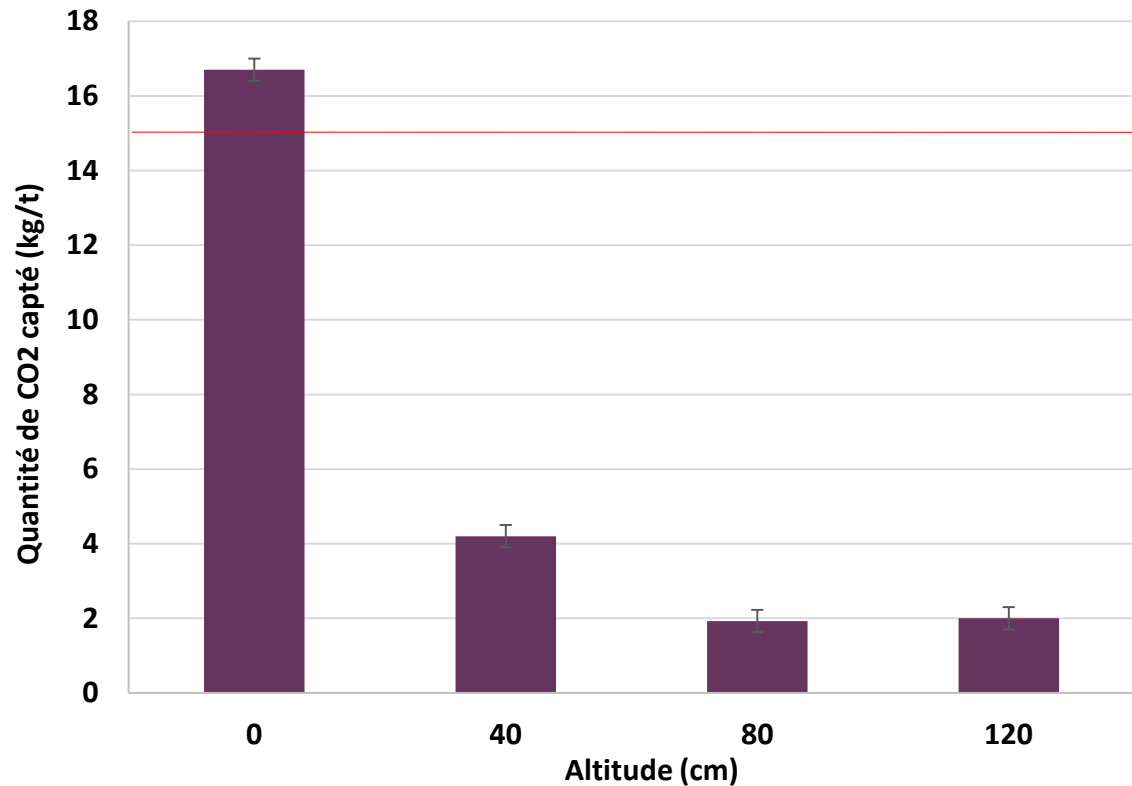
Limitations de cet méthode:

- Distribution inégale du CO₂.
- Risque de blocage.
- Durée de traitement parfois élevée.

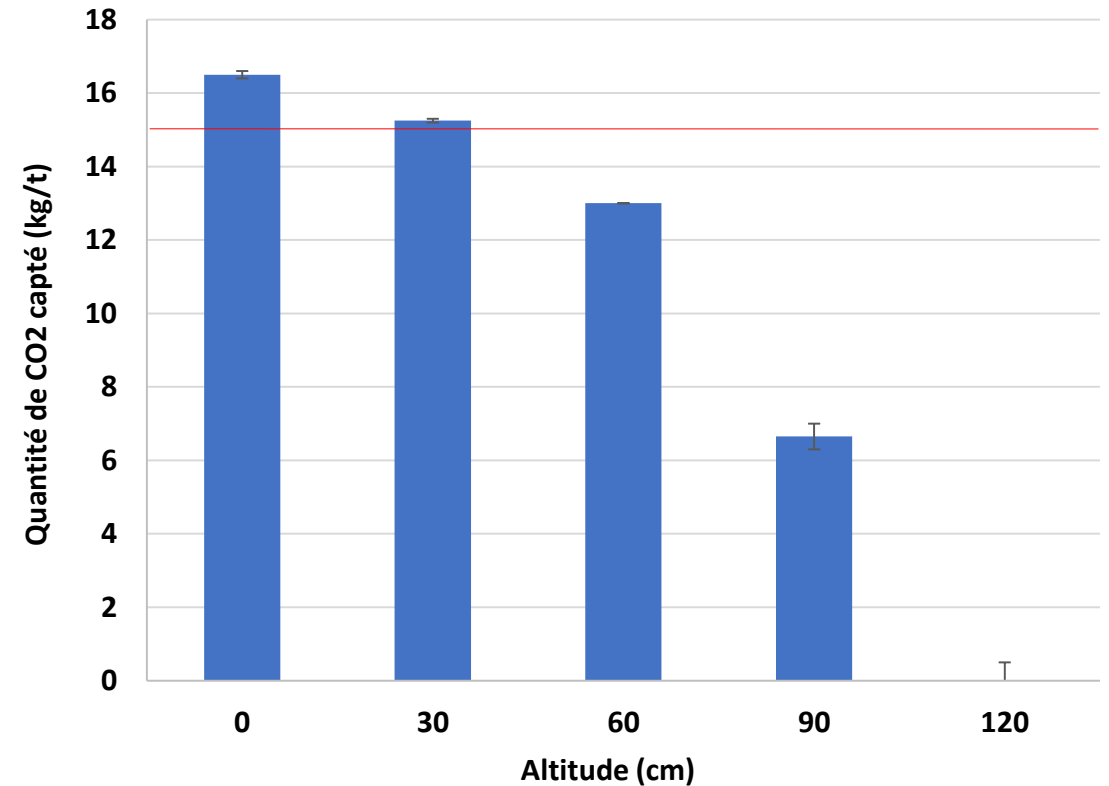


Carbonatation par colonne

- Débit: 50L/h pour 100 kg.
- Teneur en CO₂ dans l'air: 12%
- Epaisseur: 120 cm
- Durée: 3 jours



- Débit: 50L/h pour 100 kg
- Teneur en CO₂ dans l'air: 12%
- Epaisseur: 120 cm
- Durée: 3 semaines



Suite du projet

Analyses supplémentaires

- Étudier l'influence de différents paramètres sur l'accélération de la vitesse de carbonatation en colonne (débit, épaisseur, teneur en CO_2).
- Évaluer l'effet de la carbonatation accélérée sur la lixiviation des métaux lourds.

Fabrication de béton prêt à l'emploi

- Adapter les formulations aux contraintes industrielles.
- Étudier l'effet des MIOM sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton.

Développement d'autres types de bétons

- Conception et évaluation de blocs, pavés et bordures intégrant des MIOM carbonatés.





BioFACon3

BioBased Fly Ash for Engineered Concrete Products



Introduction

Contexte

Impact CO₂

Production de ciment : 5-7% des émissions mondiales de CO₂.
Biomasse > 4% de l'énergie UE.

Problème Actuel

Stockage des cendres volantes de biomasse occupe des surfaces importantes et augmente le risque de contamination.

Utilisation Actuelle

Agriculture, construction routière, recherche pour béton structural limité par faible activité pouzzolanique.

Solution innovante de traitement

Traitement Physico-chimique

Micro-broyage pour renforcer le caractère amorphe et augmenter les propriétés liantes

Formations de béton adaptées

Bétons optimisés en maximisant le taux de substitution

→ **Objectif : Remplacer les laitiers et cendres de charbon.**

Identification

Cendres volantes de « type A » :

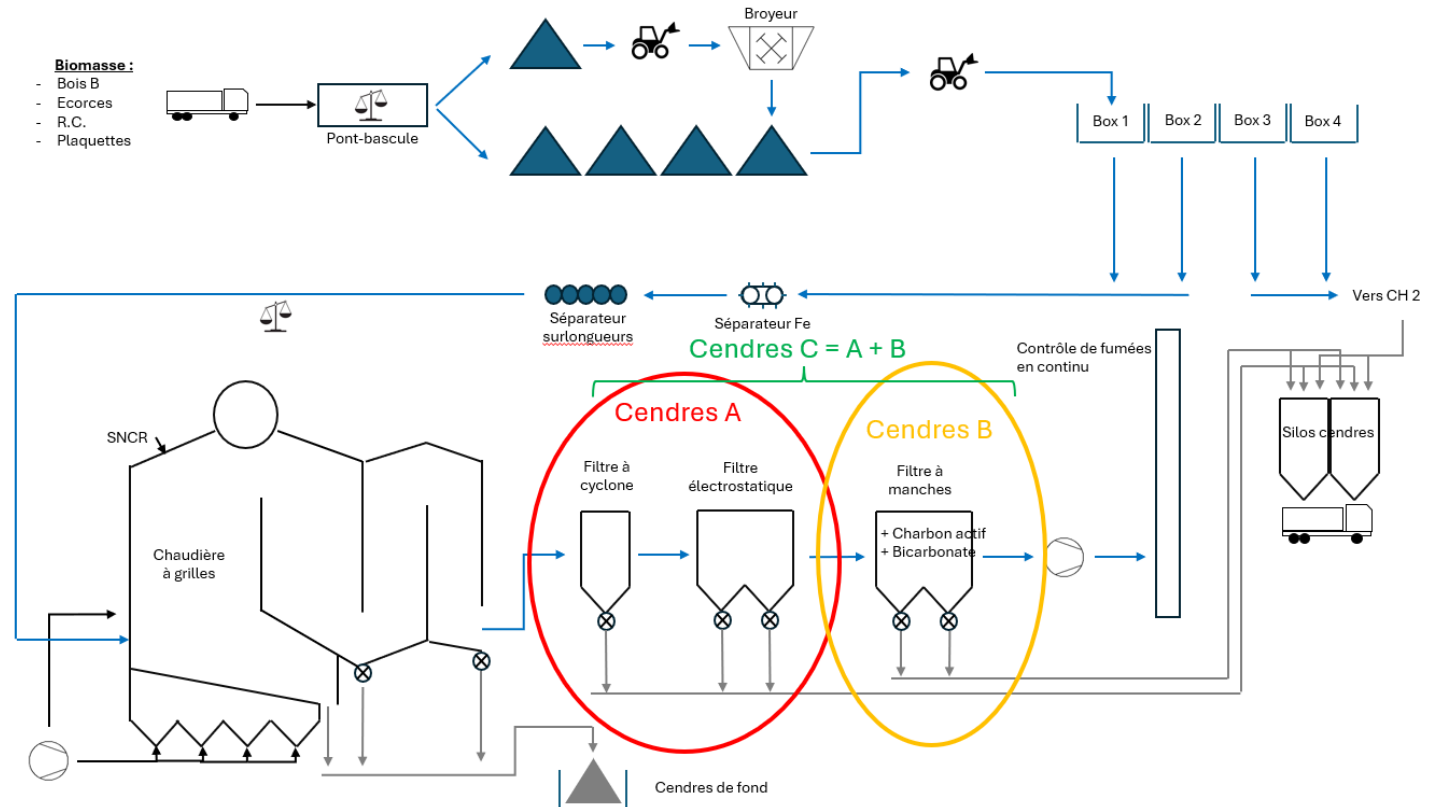
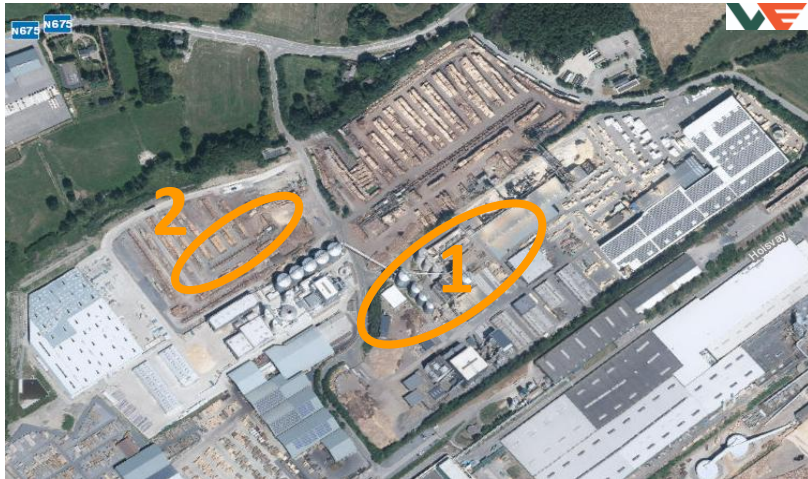
Filtre à cyclone et électrostatique

Cendres volantes de « type B » :

Filtres à manches + traitements au charbon actif et bicarbonate de sodium

Cendres volantes de « type C » :

Mélange des 2 autres cendres



Caractérisation

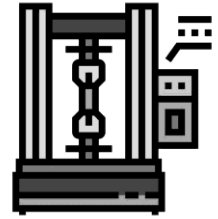
Physique (granulométrie, compression sur mortiers, MV abs., Perte au feu, ...)

Cendres volantes de « type A »

- Plus grossières que les cendres volantes B.
- Perte de 20% à 45% de résistance en compression par rapport à la référence.

Cendres volantes de « type B »

- Grande finesse, comparable à celle d'un ciment.
- Perte de résistance en compression allant jusqu'à 70% par rapport à la référence.



Minéralogique et chimique (DRX, FX, ...)

Cendres volantes de « type A »

- 25% Si (le quartz est la principale) et 10% Ca → Traitement : broyage mécano-chimique

Cendres volantes de « type B »

- Grande proportion de phases solubles (Na, Cl, K) : IBV-B > BER-B + de métaux lourds → Traitement : lavage



Traitement

Broyage mécano-chimique

Amorphisation de la matière

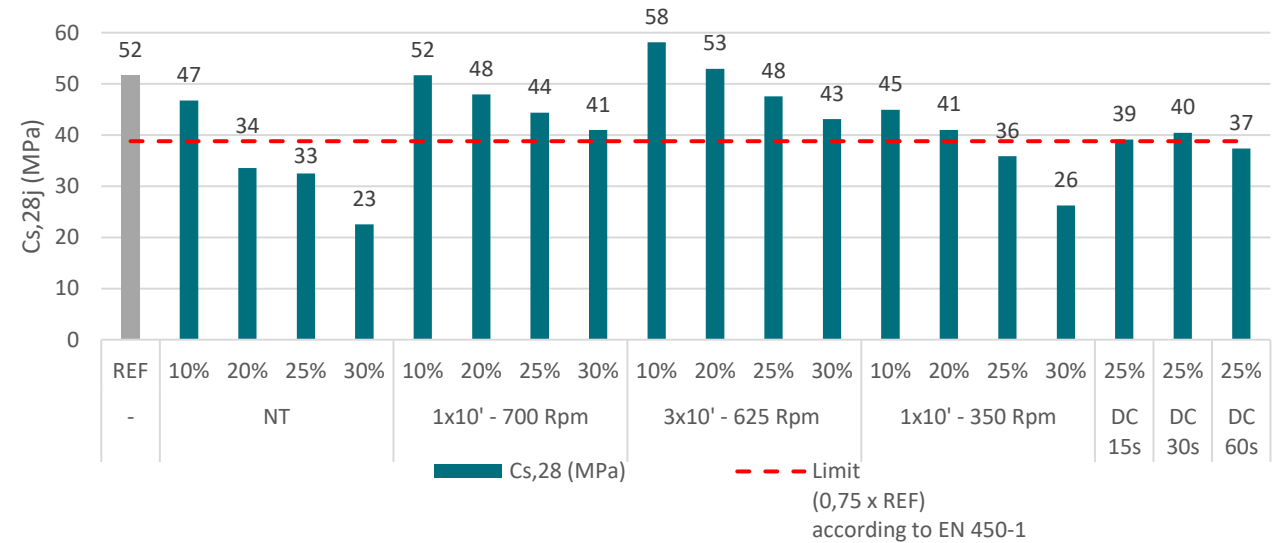
Augmentation du taux de silice réactive

Plus grande finesse

→ Gain de résistance en compression

Effet néfaste sur le temps de prise

→ Peut-être du au taux de carbone assez élevé



Lavage

Extraction de ~90% des fractions solubles (ça fonctionne)

→ Ecarté du à la difficulté à recycler l'eau de lavage

Suite du projet

Analyse supplémentaire

Essais sur les CVB traitées

- Comprendre l'augmentation de résistance en compression (microscopie électronique)
- Comprendre l'augmentation de demande en eau (BET)
- Comprendre l'augmentation du temps de prise (taux de carbone, ATG)



Fabrication de béton

Fondation en béton sec compacté (au rouleau)

- Elaboration des formulations
- Proctor modifié
- Résistance en compression
- Résistance au gel-dégel
- ...

Autres bétons



CIRMAP

Circular economy via customizable furniture with **Recycled M**aterials
for public **P**laces



Introduction

3 milliard de tonnes de granulats produits dans la zone EU27+UK+EFTA in 2019 (UEPG, 2021)

Granulats naturels

46.9% roche concassée



39.7% sable et granulats de rivière



Granulats recyclés

Déchets de construction et de demolition (C&DW)



9.3% recyclés (278 millions de tonnes)



Béton

Déchets mixtes



Granulats Fins Recyclés est moins étudié que Granulats Grossiers Recyclés (C. Bu et al., 2022)

Objectifs



Interreg 
North-West Europe
CIRMAP
European Regional Development Fund

THEMATIC PRIORITY



RESOURCE AND
MATERIALS EFFICIENCY



Structure du projet

WP1	WP2	WP3
Material flow, market and life cycle analyses	Development of methodologies and process for the 3DP of mortars containing RFA	Industrial feasibility
		

Développement de formulation



Sable recyclés



Sable naturel

✓ Pompabilité



- ☐ Seuil d'écoulement τ (Pa)
- ☐ Viscosité μ (Pa.s)

✓ Extrudabilité



- ☐ Quantité sortie (kg)
- ☐ Nombre de gouttes
- ☐ Observation forme de gouttes

✓ Constructibilité



- ☐ Imprimabilité t (mins)
- ☐ Observation de fissuration

Caractérisation de produit fini

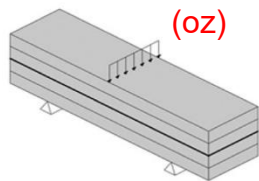
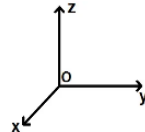
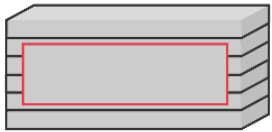
Cast sample



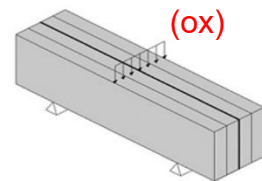
Printed sample



$4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$



Orientation I



Orientation II

$D = 5 \text{ cm} ; H = 5 \text{ cm}$



$4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$

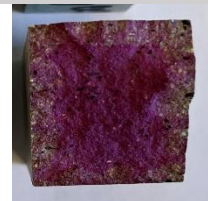


$D = 11,3 \text{ cm} ; H = 5 \text{ cm}$

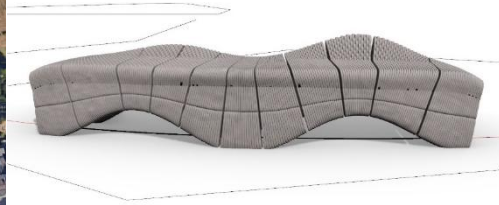


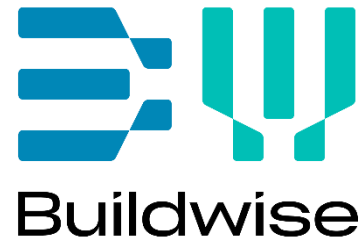
$4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$

$4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$



Banc imprimé





BEXTRUS

Impression 3D de Bétons par eXTRUSion



Introduction

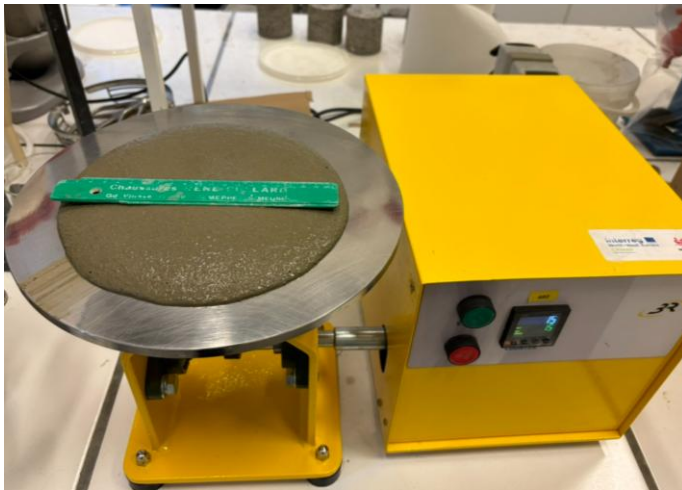
- Develop printable concrete mixes balancing **pumpability** and **buildability**.
- Focus on 2 formulations: **civil engineering concrete** and **refractory concrete**.
- Perform characterization tests on fresh to **identify printability**, combined with **numerical modeling**.
- **3D printing trials**: from simple shapes (by tuning machine parameters) to complex geometries meeting industrial needs.



A 3D-printed object in the BExTRUS project

1. Test to identify printability

- **4 tests** were conducted to determine printability
- Test based on **suitability** to 3D printing materials
- **Flow table** test and **pistol test** are the most appropriate for this material



Flow table



Fall - cone



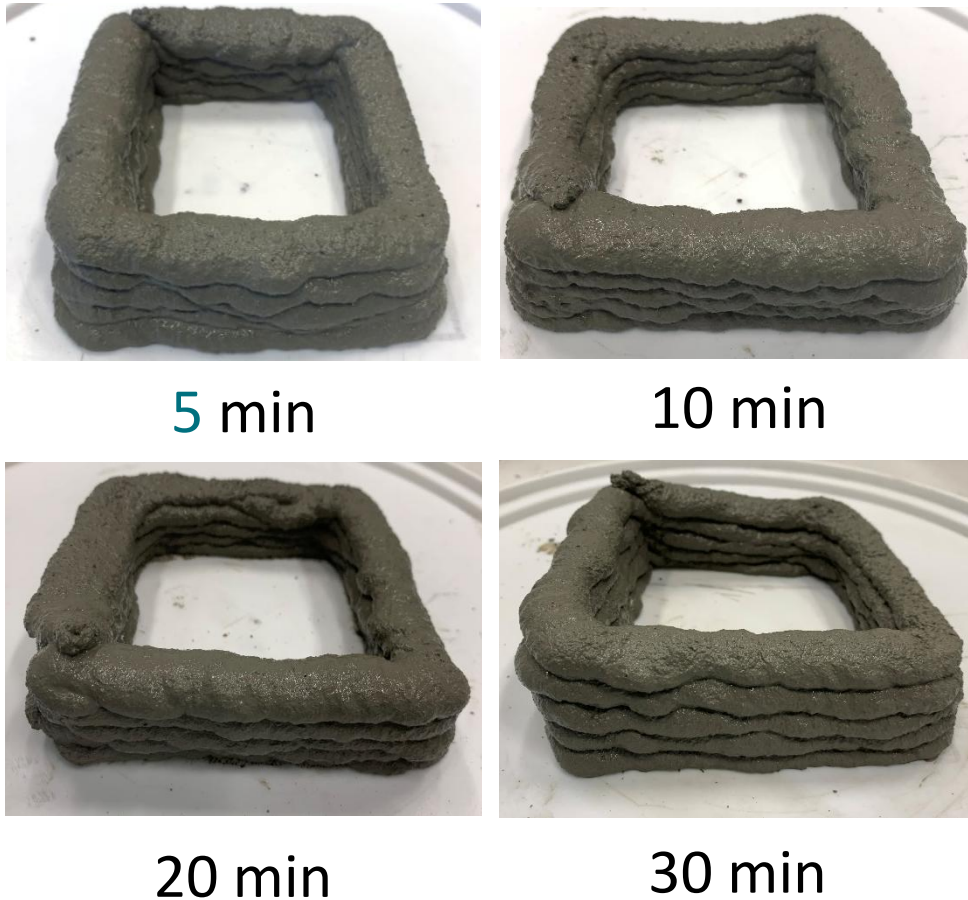
V - funnel



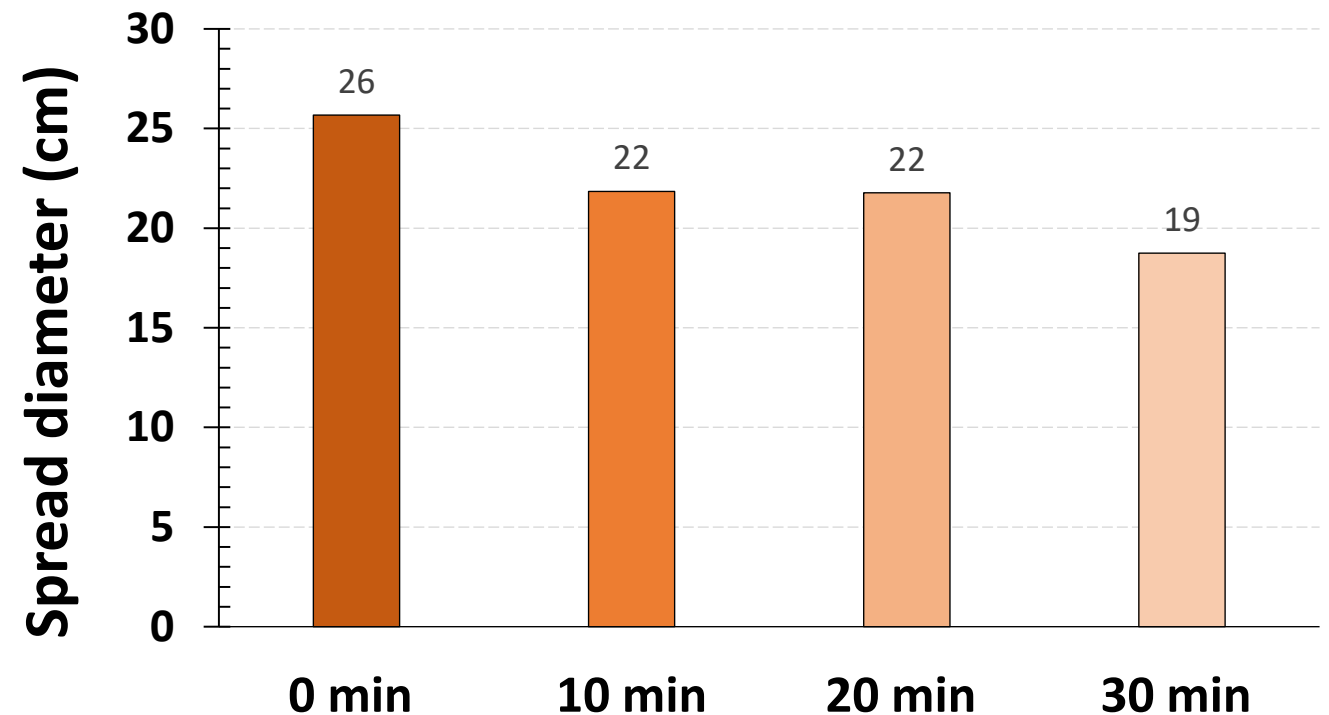
Pistol

1. Test to identify printability (results)

Results of pistol test

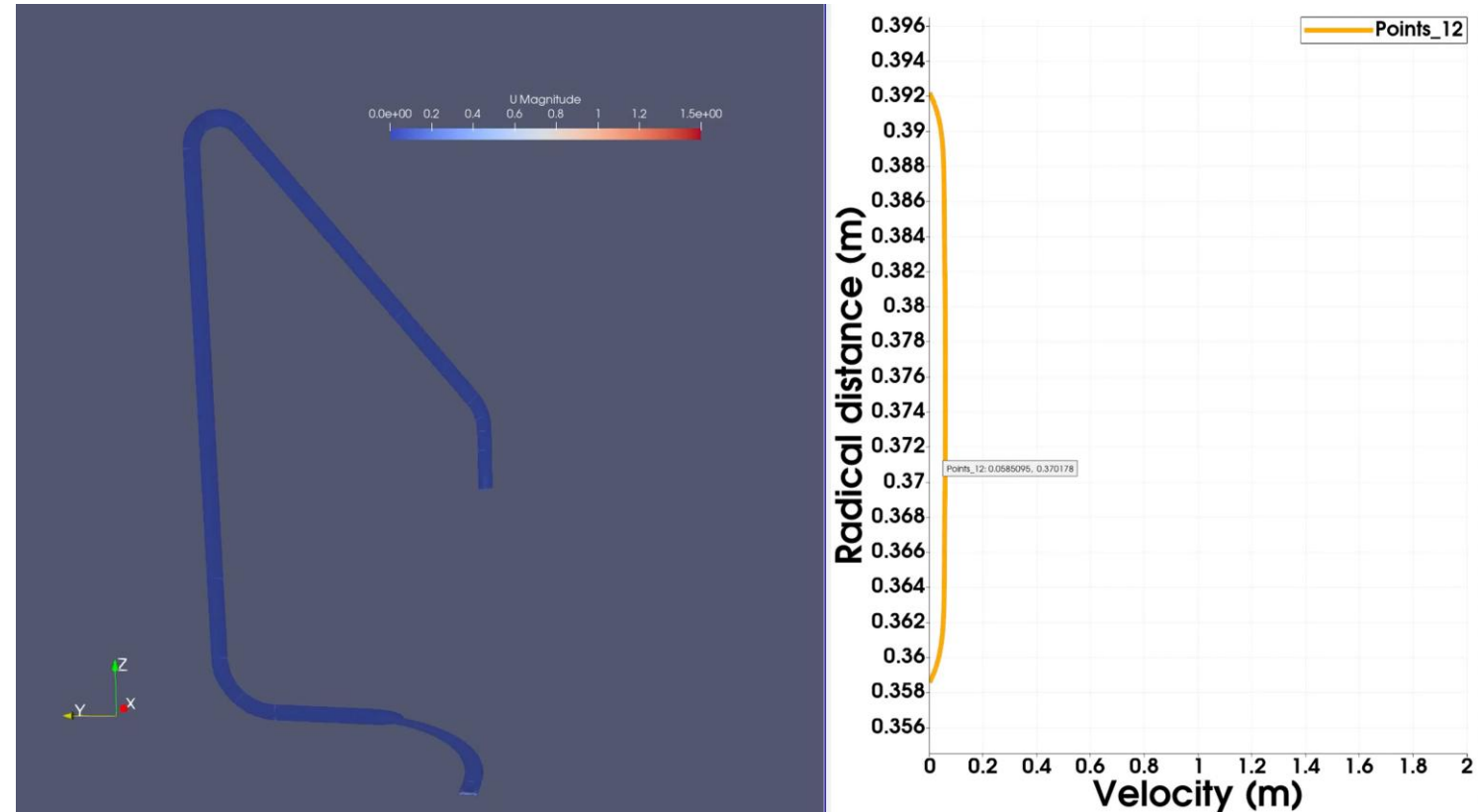


Results of flow table test



2. Numerical modeling

- Software : **OpenFOAM**, free, opensource
- Simulate the behavior of 3D printing cementitious materials
- Input value:
 - *rheological properties of mortar,*
 - *inlet pressure,*
 - *outlet pressure,*
 - *outlet high,*
 - *pipe distribution.*
- Output results: velocity of mortar, behavior of mortar in the pipe





DUN³ES

Development and Upcycling of Natural and Non-Natural E-circular Sands



Introduction

Contexte

Forte **pression** économique et environnementale sur les sables :

1. Hausse de la **demande** → extraction intensive
2. **Ressources limitées**
3. Déchets de construction et de démolition (**C&DW**) à valoriser

Centre de recyclage de Namur (Recynam)

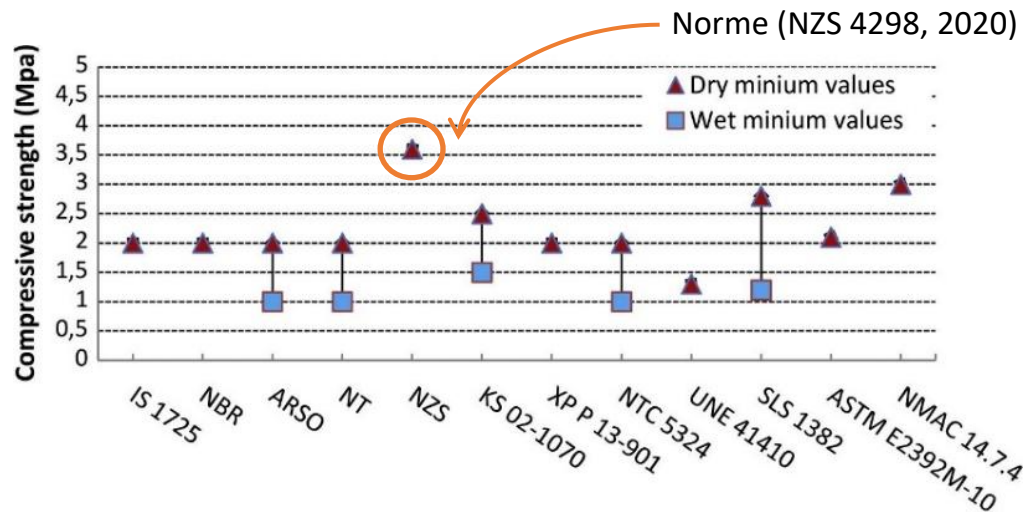


Objectifs

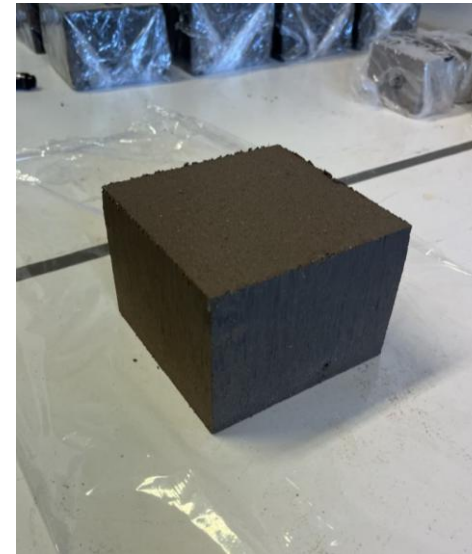
- Identification de flux de **sables primaires** et **secondaires** (sables de déconstruction, sables de fonderie, etc.).
- **Traitement** des flux **primaires**.
- **Valorisation** des flux **secondaires** dans des applications de construction (béton prêt à l'emploi, briques comprimées, BUHP, impression 3D, etc.) et des **fractions fines non valorisables** (sables fillérisés et fillers de carrière).

Briques comprimées à base de sable recyclé et de fines de lavage

Optimiser la **résistance en compression** des briques tout en minimisant leur **impact environnemental** (teneur en ciment < 10%) et les **comparer** à des briques/blocs de construction existants.



Normes de résistance en compression des BTC selon les pays



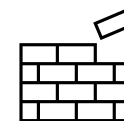
Brique comprimée



Presse manuelle TERSTARAM

→ Minimum requis : 3,5 MPa

→ Objectif visé : **6 MPa**



Applications :
Murs extérieurs/intérieurs et cloisons

Matériaux et méthodologie

Matériaux

- ❖ Sable mixte recyclé non-lavé (SMR 0/2)
- ❖ Fines de lavage (< 63 μm)
- ❖ CEM III/B 32,5 N

Procédé de fabrication

1. **Malaxage** des composants
2. Fabrication des briques par **compaction** → 1,5 tonne
3. **Cure** sous film protecteur pendant 28 jours (23°C et 60% R.H.)

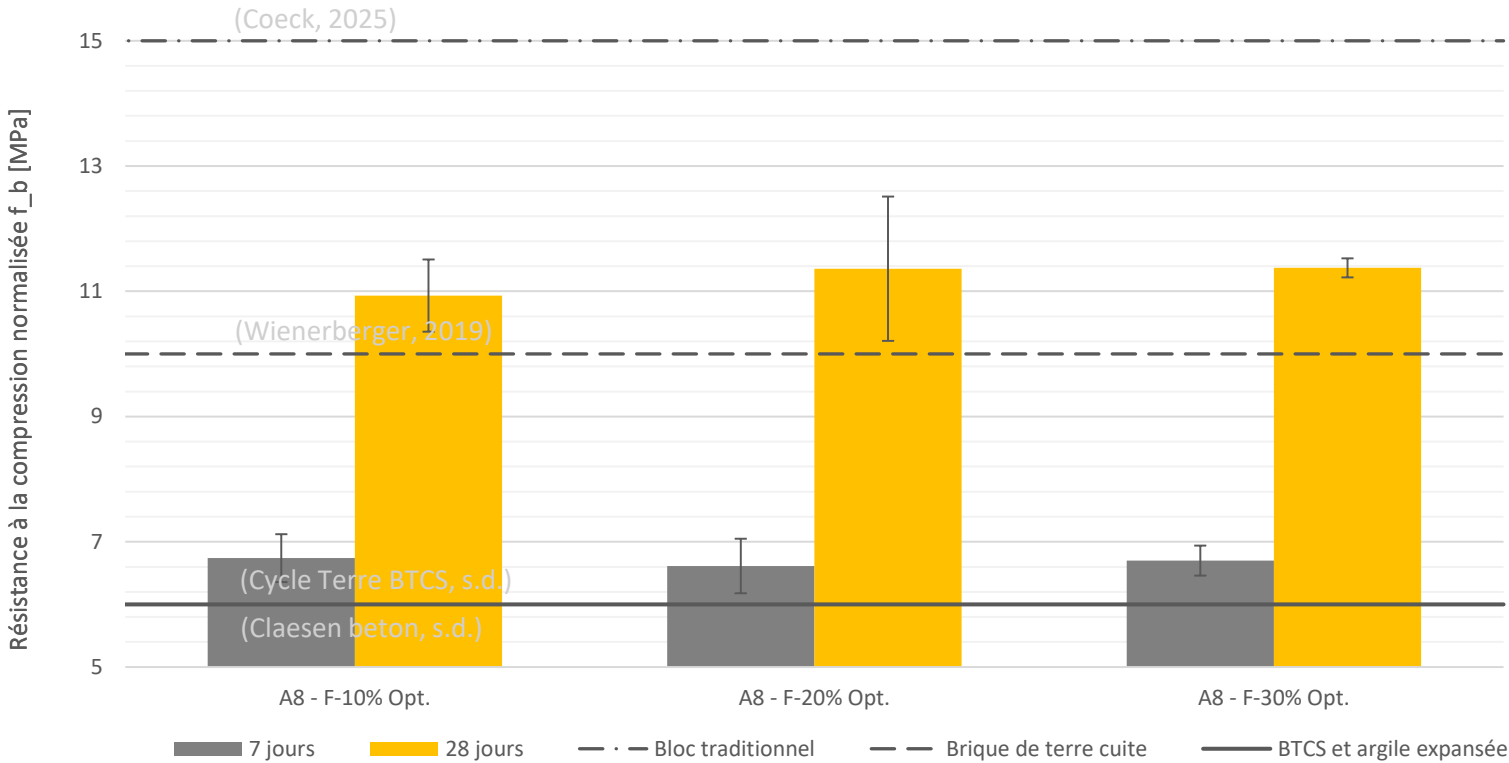
Caractérisation des briques

- ❖ **Teneur en eau réelle** des mélanges frais au micro-ondes
- ❖ **Masse volumique** à 28 jours
- ❖ **Résistance en compression** à 28 jours
- ❖ **Absorption d'eau**



Résultats – Recettes optimisées (10%, 20% et 30% de fines)

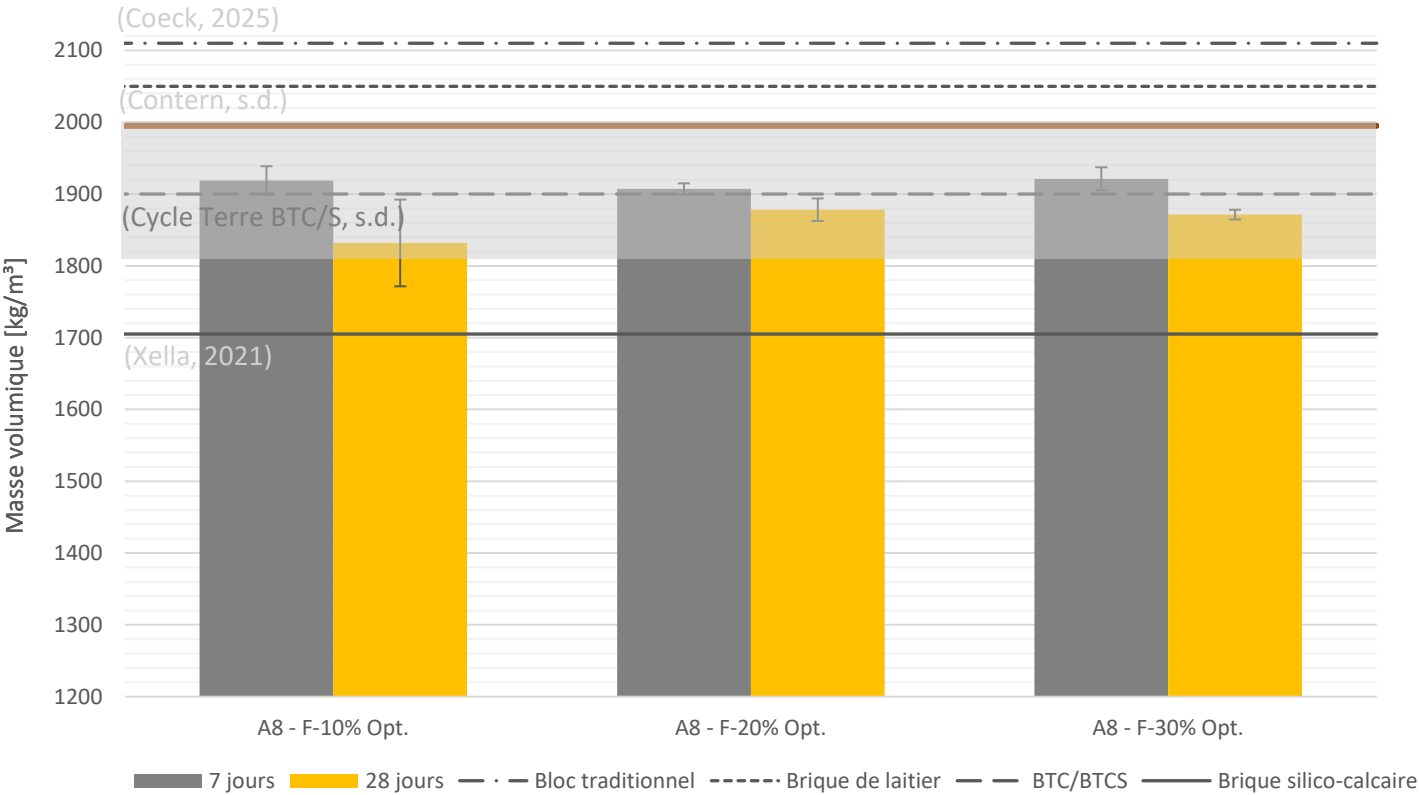
Résistances en compression à 28 jours (quantité de ciment = 180 kg/m³)



Brique/Bloc	(MPa)
Bloc de béton cellulaire	2-5
BTC	4
BTCS & argile expansée	6
Brique de terre cuite	10
Brique comprimée	~11
Bloc béton traditionnel	15
Brique de laitier et silico-calcaire	> 20

Résultats – Recettes optimisées (10%, 20% et 30% de fines)

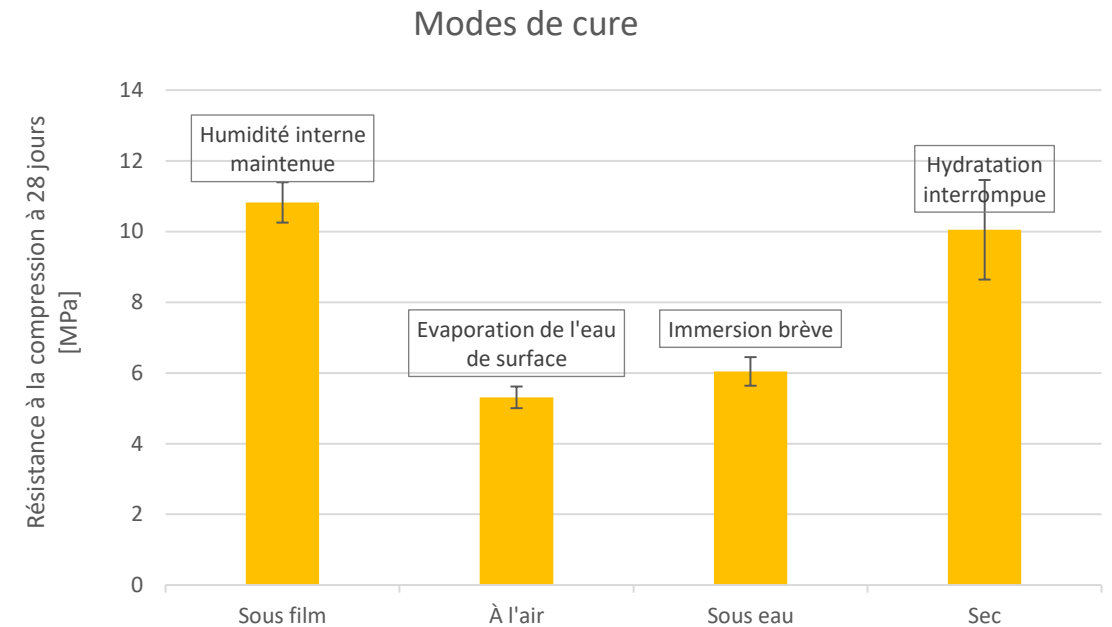
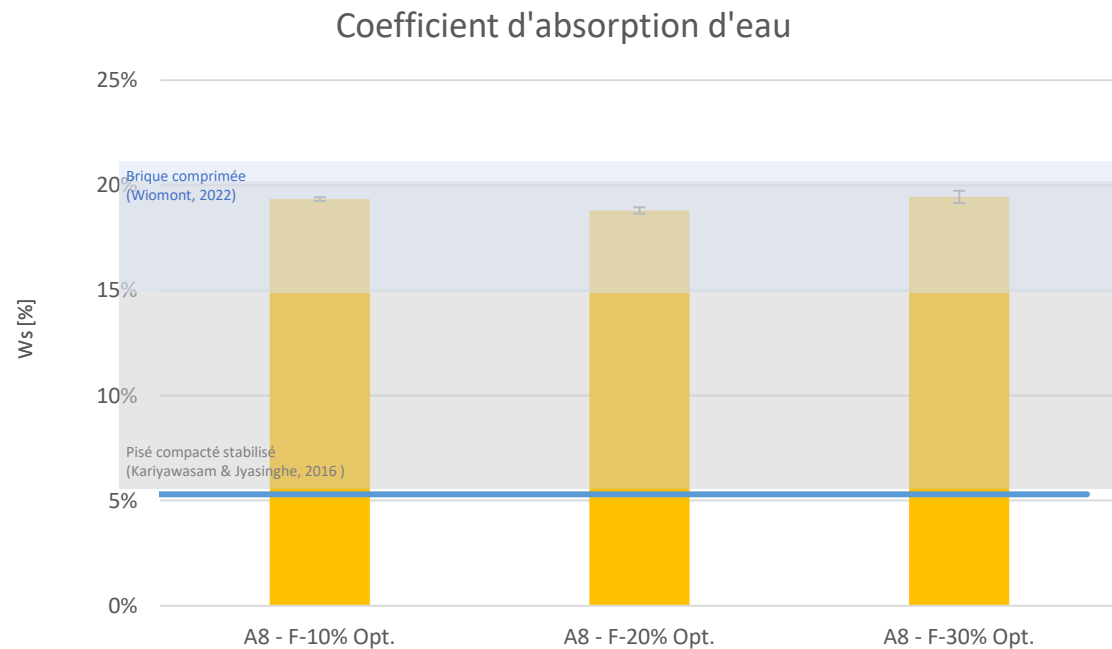
Masses volumiques à 28 jours



Brique/Bloc	MV (kg/m³)
Brique silico-calcaire	1610-1800
Brique comprimée	~1850
BTC/BTCS	1900
Brique de laitier	2050
Bloc béton traditionnel	2110

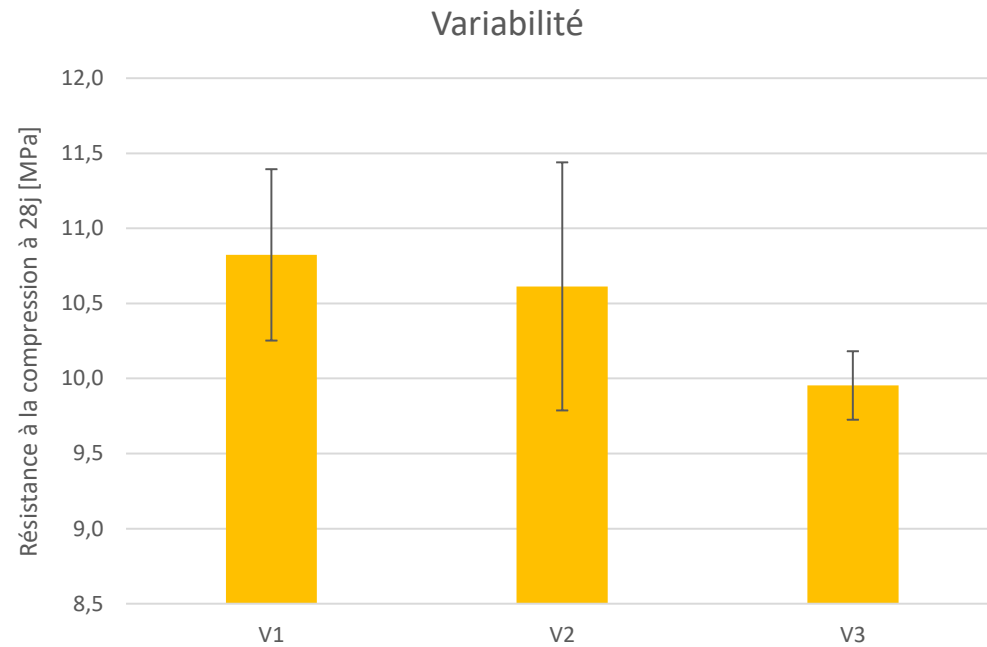
Résultats – Recettes optimisées (10%, 20% et 30% de fines)

Absorption d'eau et modes de cure

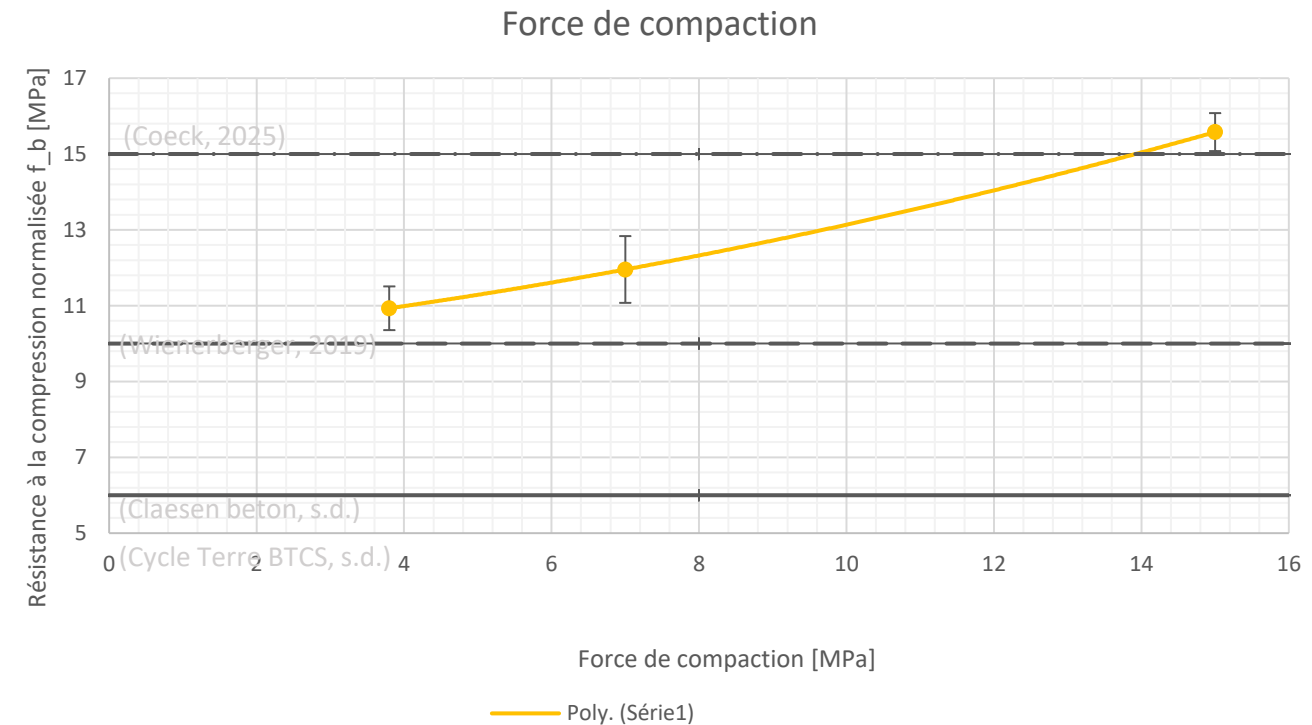


Résultats – Recettes optimisées (10%, 20% et 30% de fines)

Variabilité et force de compaction



Paramètre	Valeur
Moyenne [MPa]	10.46
E-T [MPa]	0.45
CV [%]	4.34



Merci pour votre attention

