

# JOURNÉE TECHNIQUE 2023

**Les matériaux alternatifs :**  
L'innovation au service de  
l'économie circulaire



# L'utilisation du verre de recyclage dans les matériaux cimentaires et alcali-activés

Rachida IDIR

pour

Louise Lemesre, Bathyle Hery, Thomas Poinot,  
André Carles-Gibergues, Arezki Tagnit-Hamou,  
Martin Cyr, Rachida Idir





**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



**Cerema**  
CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

Que recherchez-vous ?



Nous contacter

TERRITOIRES

RECHERCHE, INNOVATION & INTERNATIONAL

CENTRE DE RESSOURCES

LE MAG

# L'EXPERTISE PUBLIQUE POUR LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET LA COHÉSION DES TERRITOIRES

*Le Cerema, établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, accompagne l'État et les collectivités territoriales pour l'élaboration, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport.*

Rachida Idir

Chercheur – UMR MCD « Matériaux pour une Construction Durable » \_ Cerema

Développement de liants bas-carbone pour le Génie Civil

Analyse de cycle de vie des matériaux du Génie Civil



# Contexte

## Verre sodo-calcique

- Verre : matériau à plusieurs vies qui peut être recyclé plusieurs fois ∞



Pas toujours vrai, parfois ce n'est pas possible ↘ une partie n'est pas recyclée

Pourquoi ?

# Contexte

## Verre sodo-calcique

- Verre : matériau à plusieurs vies qui peut être recyclé plusieurs fois



Pas toujours vrai, parfois ce n'est pas possible ↘

une partie n'est pas recyclée

Pourquoi ?



Tri optique

- Difficulté à trier les petits morceaux de verre par couleur



Particules ultrafines (< 2 mm)

- Endommagement des fours
- Défauts sur les nouvelles bouteilles

# Contexte

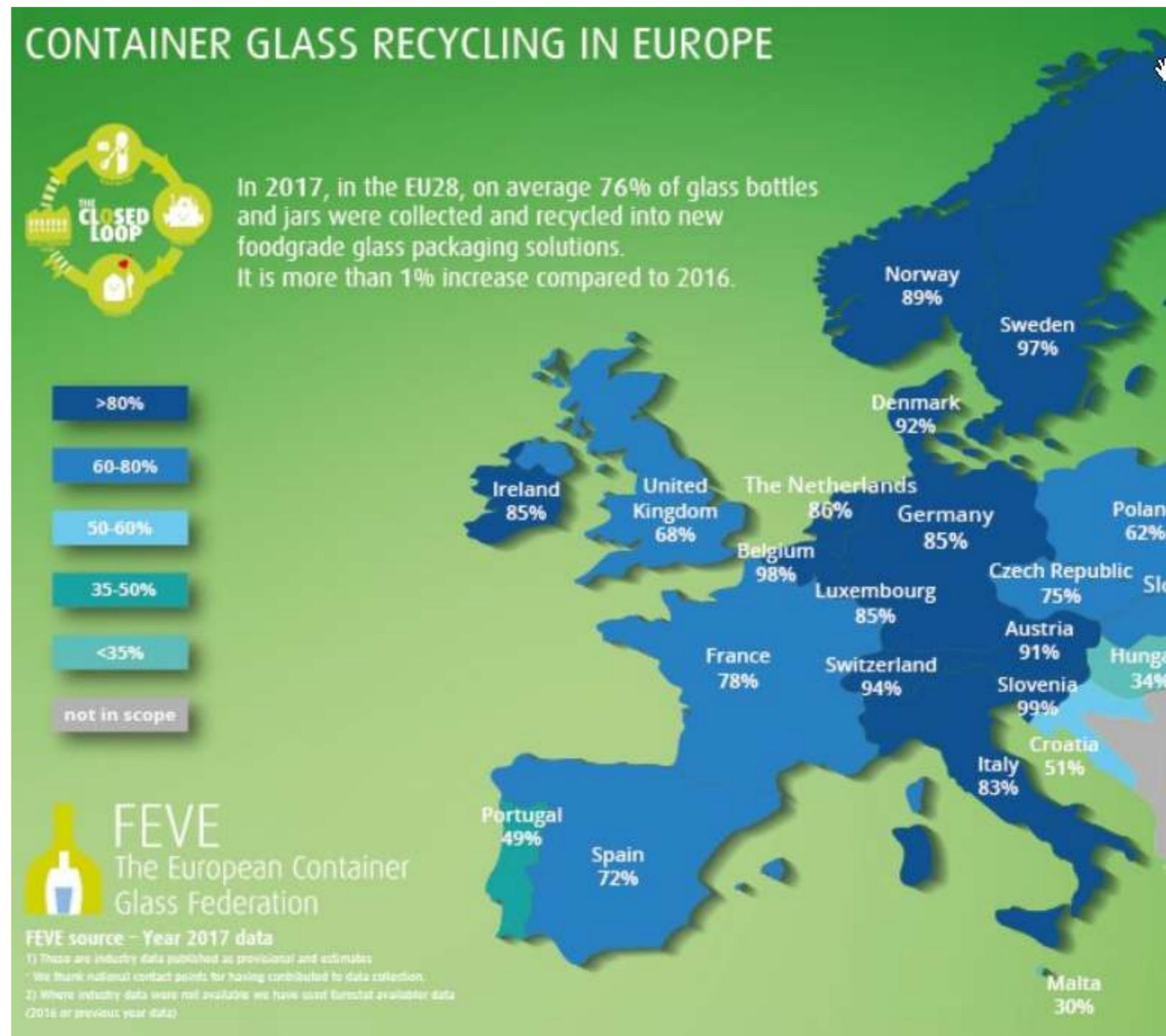


Bouteilles et bocaux...



-  Quantité verre non recyclé en France : 600 000 tonnes (2020)\*
  -  Coût mise en décharge : 150 € /tonne (2020)\*
  -  Coût économisé, si filière de valorisation : 90 millions €
  -  Seuls 78 % bouteilles mises sur marché sont recyclées (2017), chiffre en augmentation les années à venir pour des obligations de recyclage
- ↪ augmentation du taux destiné à la décharge

\* Croisement de données industrielles



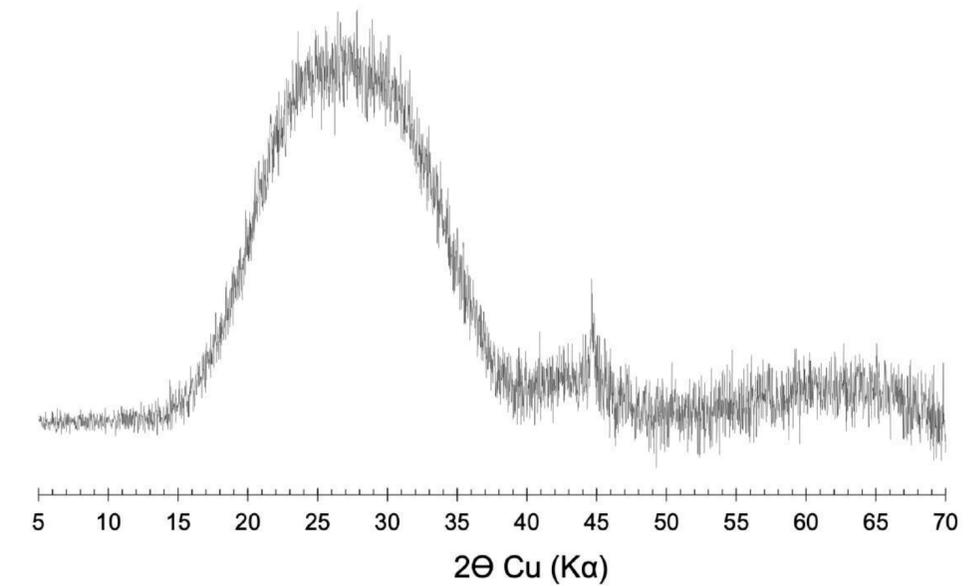
FEVE, Glass Recycling Statistics Final Updated Nov 2019

# Objectifs



## Composition chimique et minéralogique

% massique	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO
Verre	71.5	2.3	0.90	10.4	1.5	12.3	0.5	0.11	0.04

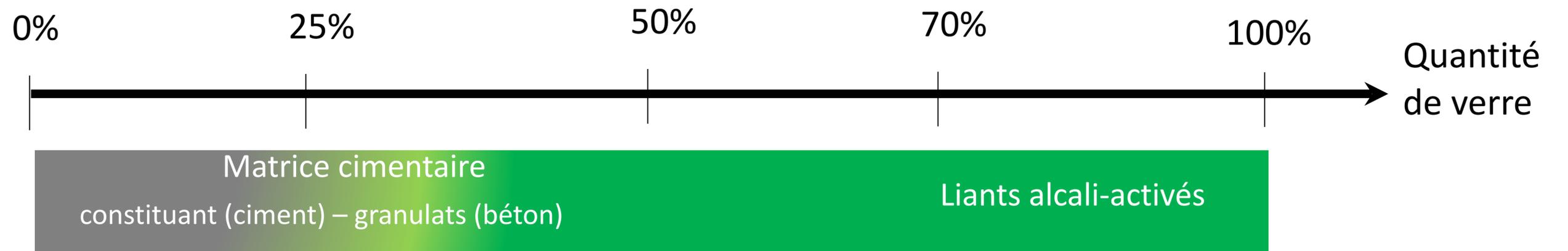


Piste potentielle de valorisation dans le béton

# Objectifs



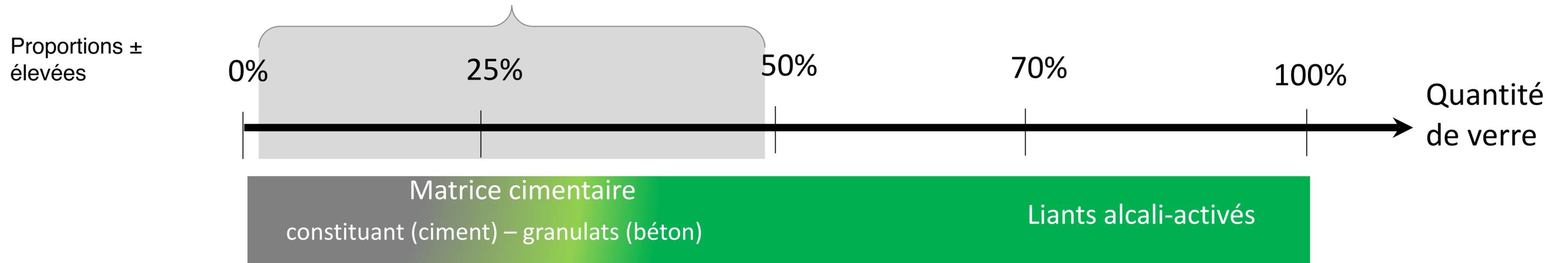
## Le verre dans le béton



# Objectifs



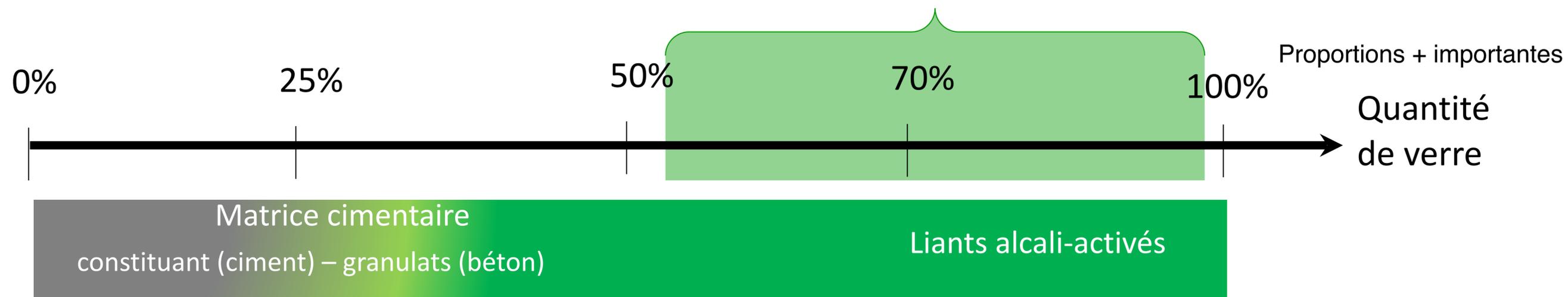
## Le verre dans le béton



# Objectifs



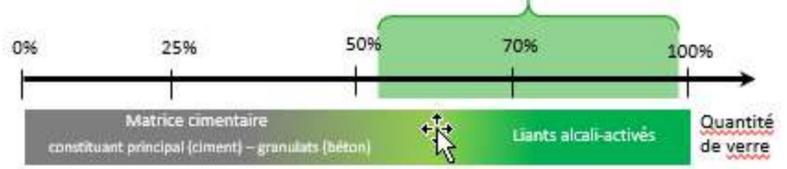
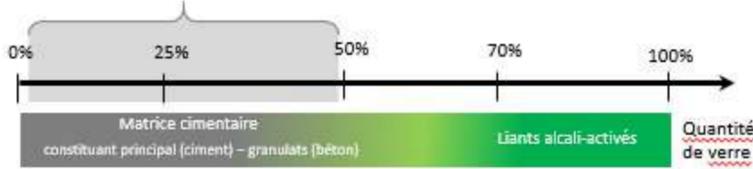
## Le verre dans le béton



# Objectifs

Matériaux non conventionnels

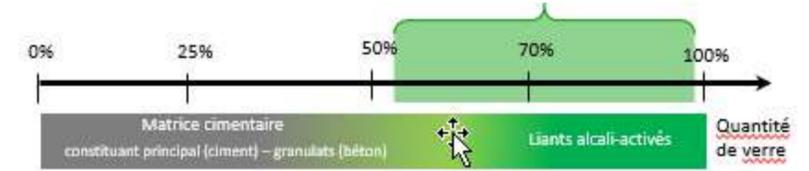
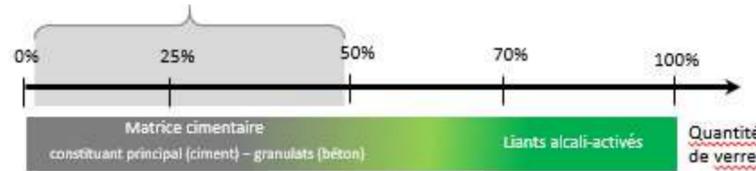
Différents défis et verrous à relever



# Objectifs

Matériaux non conventionnels

Différents défis et verrous à relever

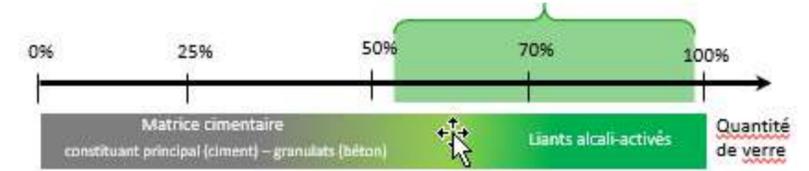
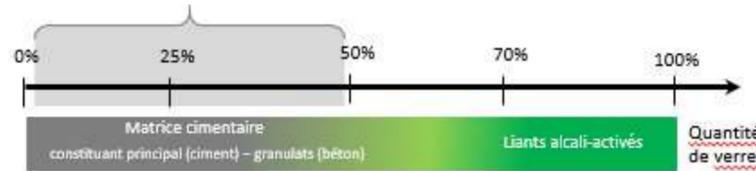


- Pourquoi deux granulométries différentes entraînent des comportements différents :  
réaction alcali-silice (granulats) vs réaction pouzzolanique (fines)?

# Objectifs

Matériaux non conventionnels

Différents défis et verrous à relever



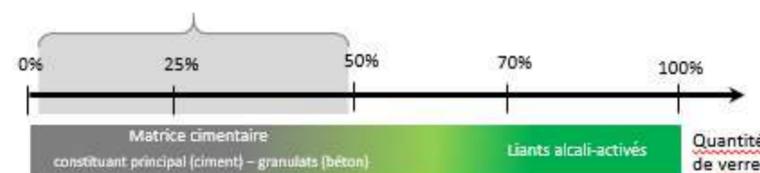
- Pourquoi deux granulométries différentes entraînent des comportements différents :  
réaction alcali-silice (granulats) vs réaction pouzzolanique (fines)?

- Peut on formuler (paramètres) des matériaux alcali-activés à base de verre ?
- Quelles sont leurs propriétés mécanique (comportement) à court et long termes ?

# Objectifs

Matériaux non conventionnels

Différents défis et verrous à relever



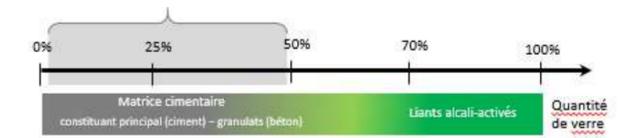
- Pourquoi deux granulométries différentes entraînent des comportements différents :

**réaction alcali-silice (granulats) vs réaction pouzzolanique (fines)?**

Mettre en évidence :

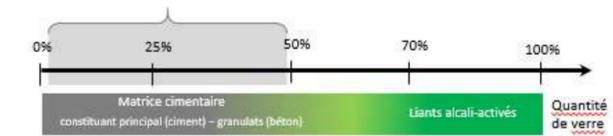
- 1) l'influence de la taille des granulats sur le gonflement provoqué par la réaction alcali-silice
- 2) le diamètre des grains qui permet le passage de la réaction pouzzolanique à la réaction alcali-silice

# Le verre en tant que substituant du granulat



Dénominations	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	
Fractions [ $\mu\text{m}$ ]	2500- 5000	1250-2500	630-1250	315-630	160-315	80-160	< 80	< 46	< 41	
S. Spécifiques [ $\text{m}^2/\text{kg}$ ]	1.1	2.2	4.5	11	18	35	182	389	538	
	$D_{50} = 3.5 \text{ mm}$								$D_{50} = 7 \mu\text{m}$	

# Le verre en tant que substituant du granulat



Dénominations	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Fractions [µm]	2500- 5000	1250-2500	630-1250	315-630	160-315	80-160	< 80	< 46	< 41
S. Spécifiques [m <sup>2</sup> /kg]	1.1	2.2	4.5	11	18	35	182	389	538

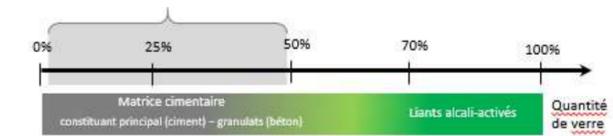
## Mortier (réaction alcali-silice)

<b>3 parts</b>	Sable calcaire reconstitué à partir de différentes tailles	<b>1 part</b>	Ciment (CEM I 52.5R)	Eau (0.6)
----------------	--	---------------	----------------------	-----------

Verre

C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
----	----	----	----	----	----	----	----	----

# Le verre en tant que substituant du granulat



Dénominations	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Fractions [ $\mu\text{m}$ ]	2500- 5000	1250-2500	630-1250	315-630	160-315	80-160	< 80	< 46	< 41
S. Spécifiques [ $\text{m}^2/\text{kg}$ ]	1.1	2.2	4.5	11	18	35	182	389	538

## Mortier (réaction alcali-silice)

<b>3 parts</b>	Sable calcaire reconstitué à partir de différentes tailles	<b>1 part</b>	Ciment (CEM I 52.5R)	Eau (0.6)
----------------	--	---------------	----------------------	-----------

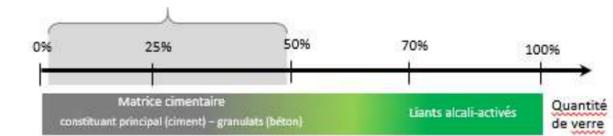


C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
----	----	----	----	----	----	----	----	----

Teneur en KOH :

- 2.5 kg / $\text{m}^3$
  - 5.6 kg / $\text{m}^3$
  - 8 kg / $\text{m}^3$
- } Dopage

# Le verre en tant que substituant du granulat



Dénominations	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Fractions [µm]	2500- 5000	1250-2500	630-1250	315-630	160-315	80-160	< 80	< 46	< 41
S. Spécifiques [m <sup>2</sup> /kg]	1.1	2.2	4.5	11	18	35	182	389	538

## Mortier (réaction alcali-silice)

**3 parts** Sable calcaire reconstitué à partir de différentes tailles

**1 part** Ciment (CEM I 52.5R)

Eau (0.6)

Verre



### Teneur en KOH :

- 2.5 kg /m<sup>3</sup>
  - 5.6 kg /m<sup>3</sup>
  - 8 kg /m<sup>3</sup>
- } Dopage

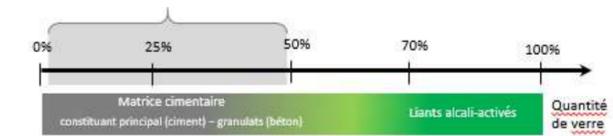


60°C-100%HR



Suivi de variation dimensionnelle sur plusieurs semaines

# Le verre en tant que substituant du ciment



Dénominations	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Fractions [ $\mu\text{m}$ ]	2500-5000	1250-2500	630-1250	315-630	160-315	80-160	< 80	< 46	< 41
S. Spécifiques [ $\text{m}^2/\text{kg}$ ]	1.1	2.2	4.5	11	18	35	182	389	538

## Mortier (effet pouzzolanique)

**3 parts**

Sable siliceux

**1 part**

Ciment  
(CEM I 52.5R)

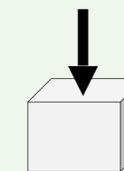
Eau  
(0.6)

Verre  
10-20-30 et 40%

C1 C2 C4 C6 C8



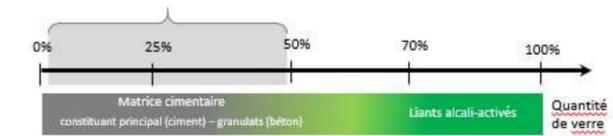
20°C-dans eau



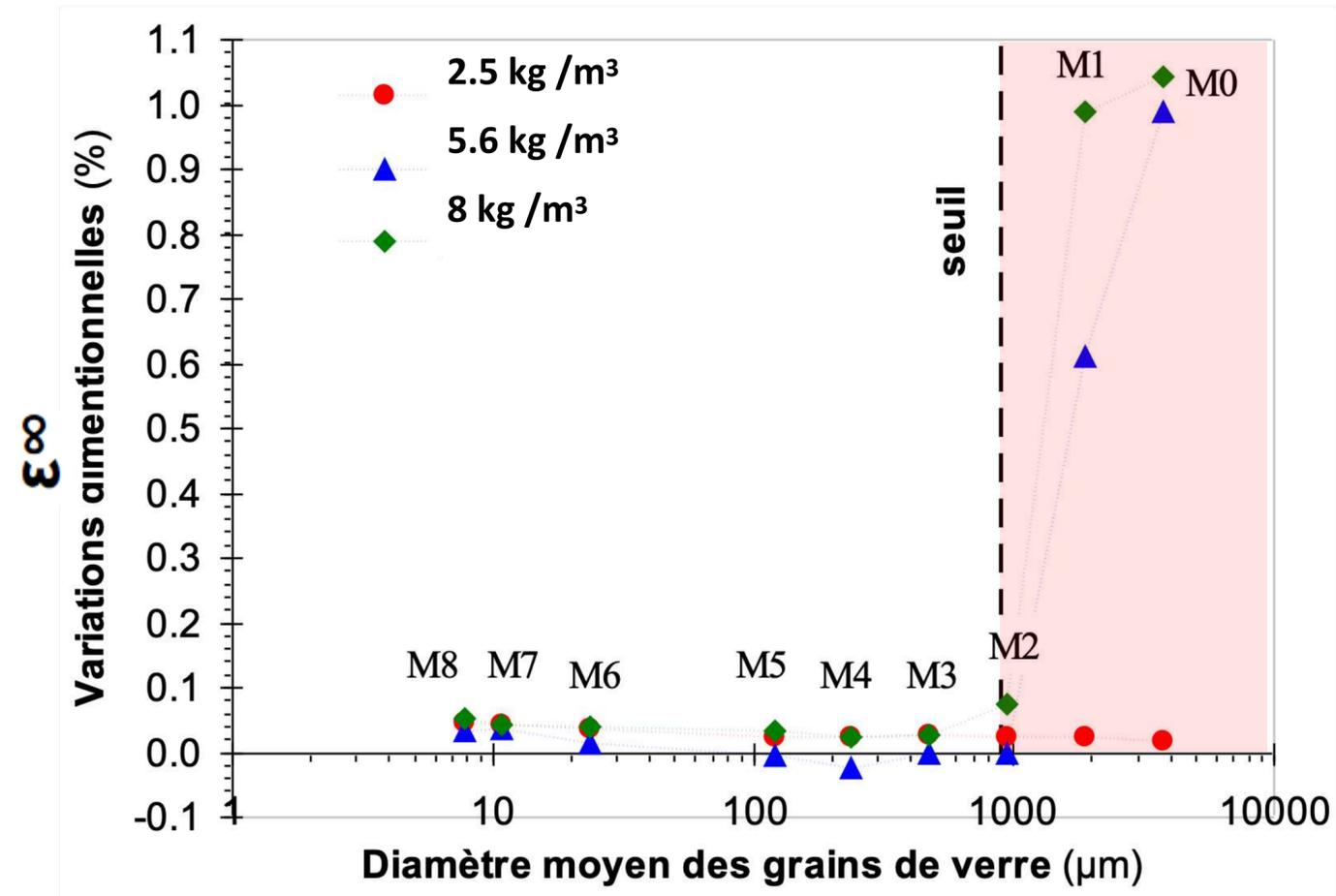
1-7-28 et 210 jours

Essais de résistance à la compression

# Le verre en tant que substituant du granulat



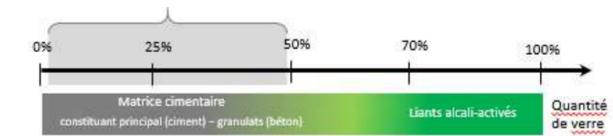
## Résultats



Eprouvettes de mortier contenant 20% de différentes classes granulométriques (cure : 78 semaines -60°C-100%HR)

Mise en évidence d'un seuil critique : ~1mm

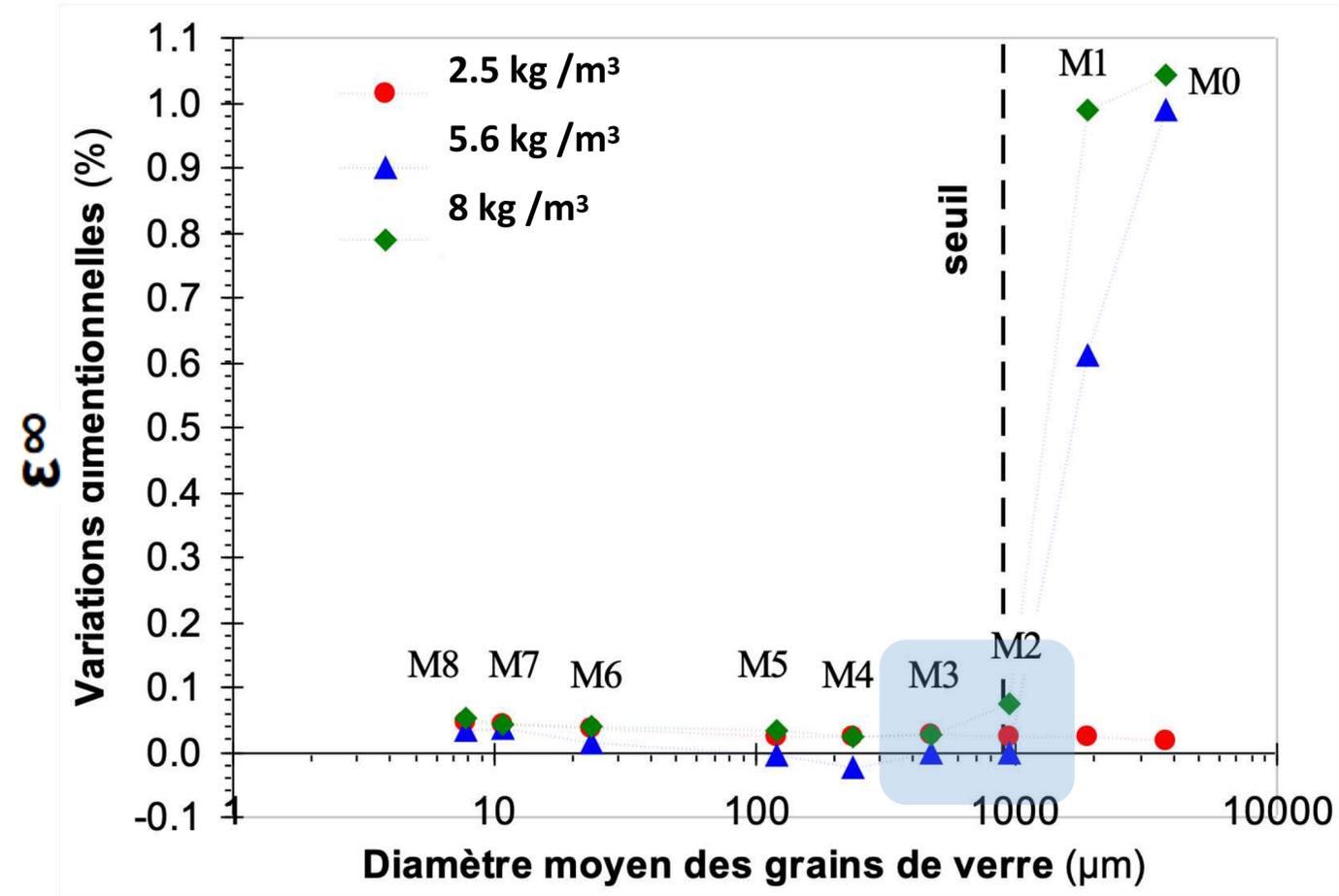
# Le verre en tant que substituant du granulat



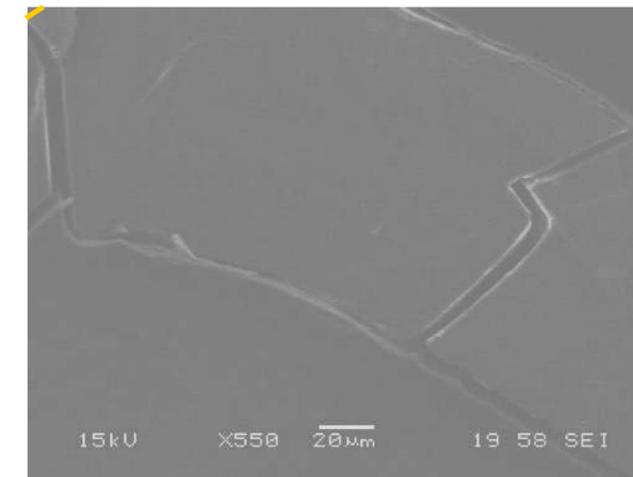
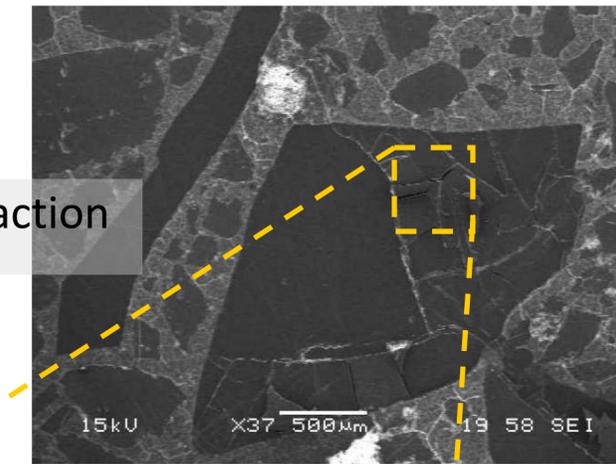
## Résultats

C2	C3
630-1250 $\mu\text{m}$	315-630 $\mu\text{m}$

■ 5.6 kg / m<sup>3</sup>  
 ■ 8 kg / m<sup>3</sup> } Dopage



Gels d'alcali-réaction

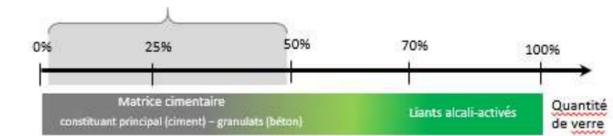


Traces d'exsudation



**absence de gonflement ≠ absence de réaction alcali-silice**

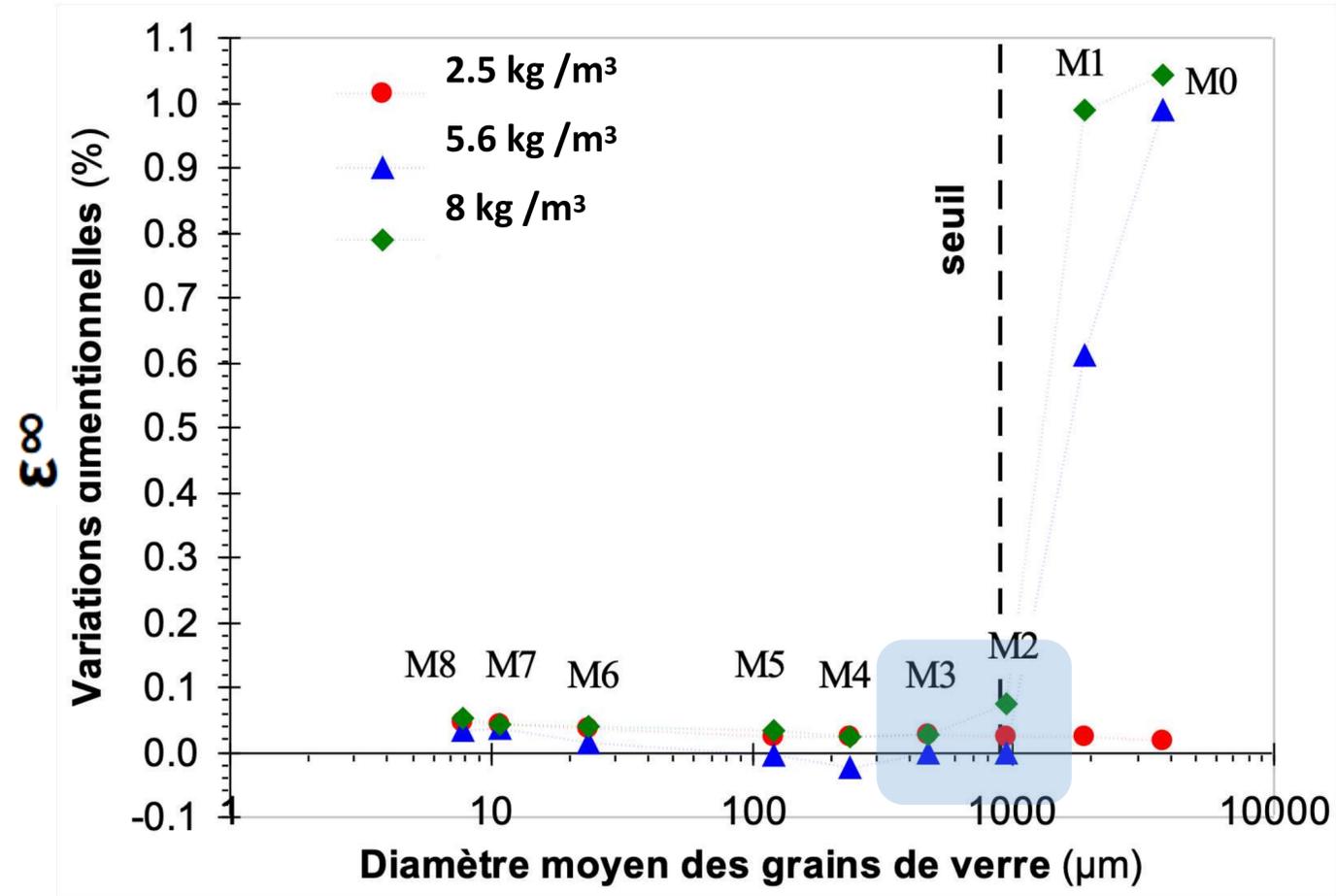
# Le verre en tant que substituant du granulat



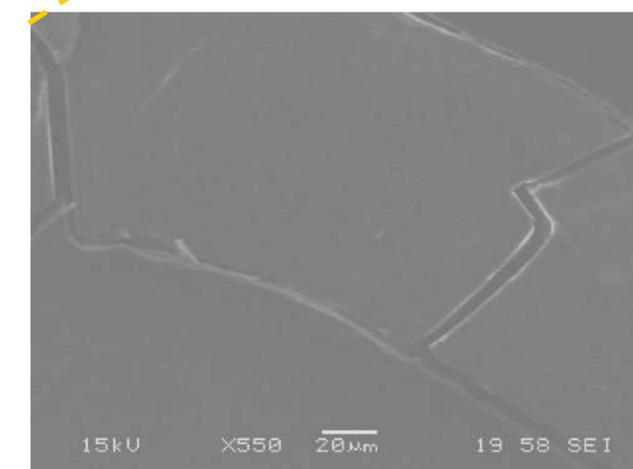
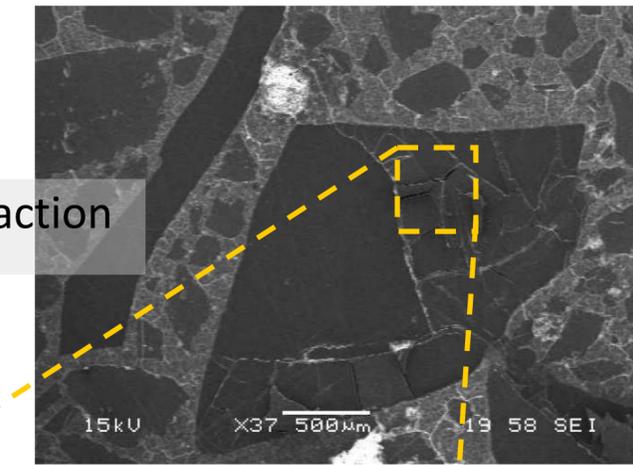
## Résultats

C2	C3
630-1250 $\mu\text{m}$	315-630 $\mu\text{m}$

■ 5.6 kg / m<sup>3</sup>  
 ■ 8 kg / m<sup>3</sup> } Dopage



Gels d'alcali-réaction



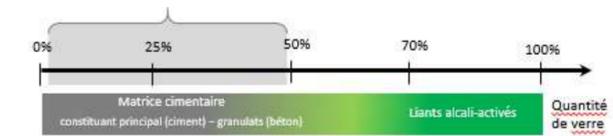
Distinction entre la présence de RAS et la manifestation macroscopique de cette réaction !

Traces d'exsudation



Eprouvettes de mortier contenant 20% de différentes classes granulométriques (cure : 78 semaines -60°C-100%HR)

# Le verre en tant que substituant du ciment

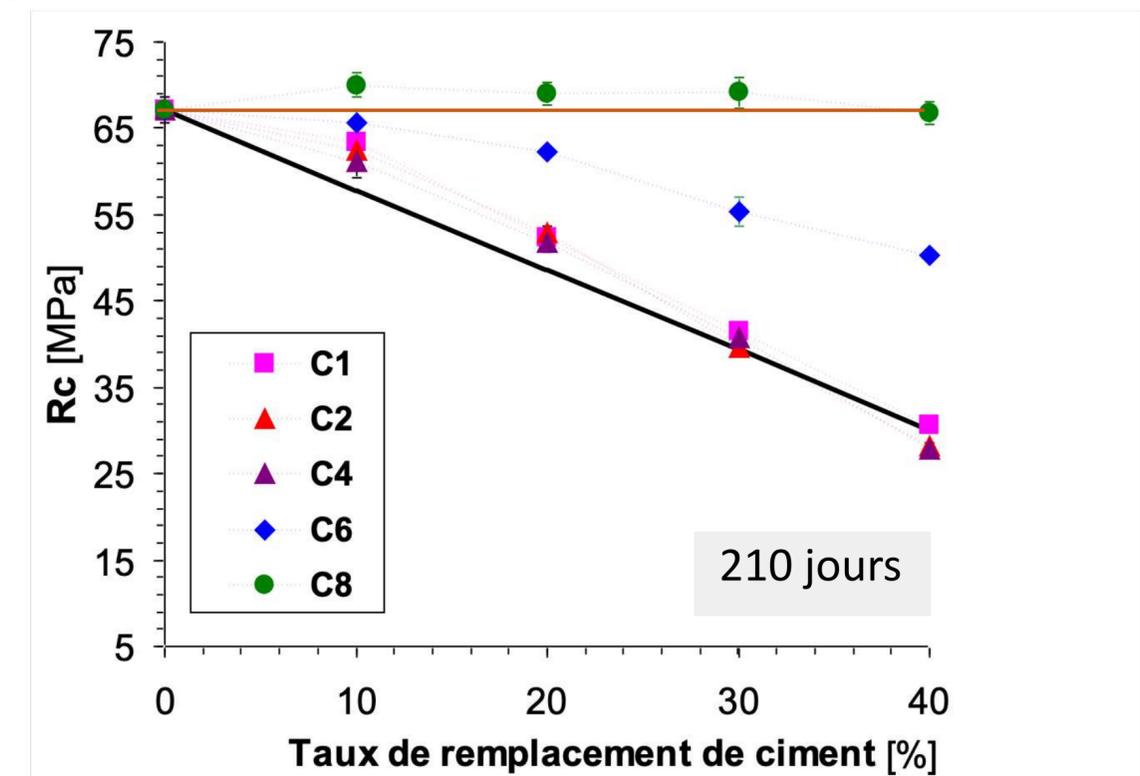
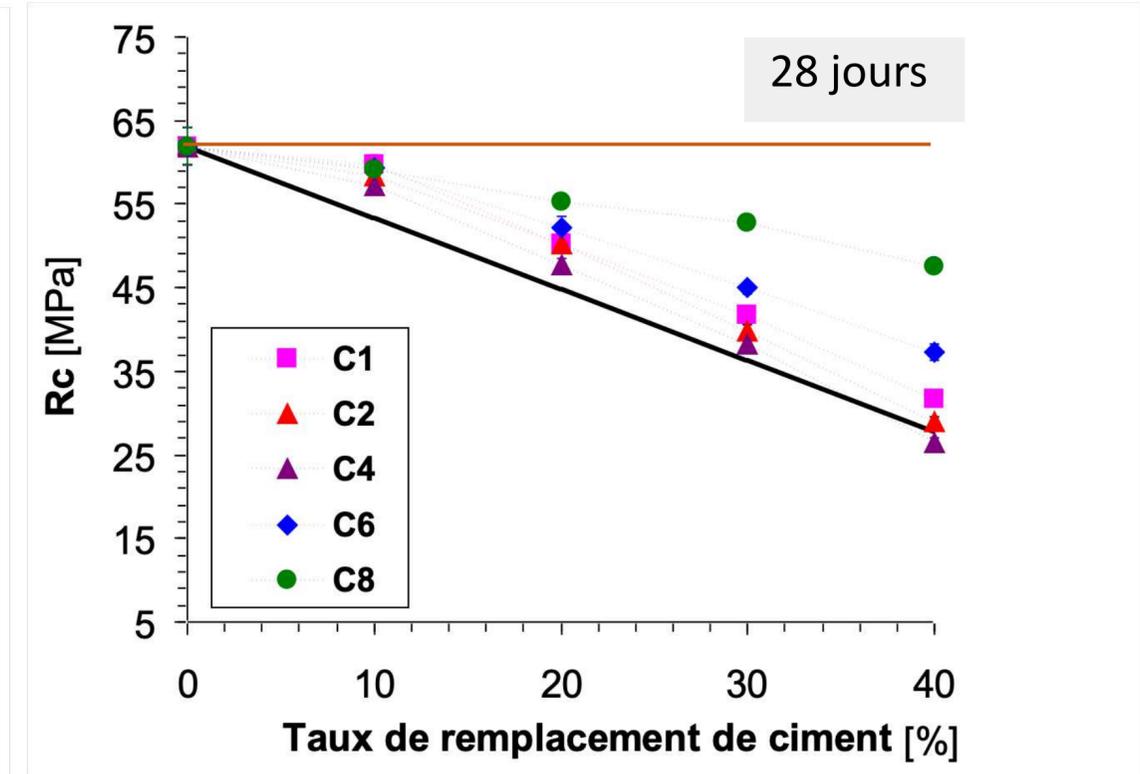
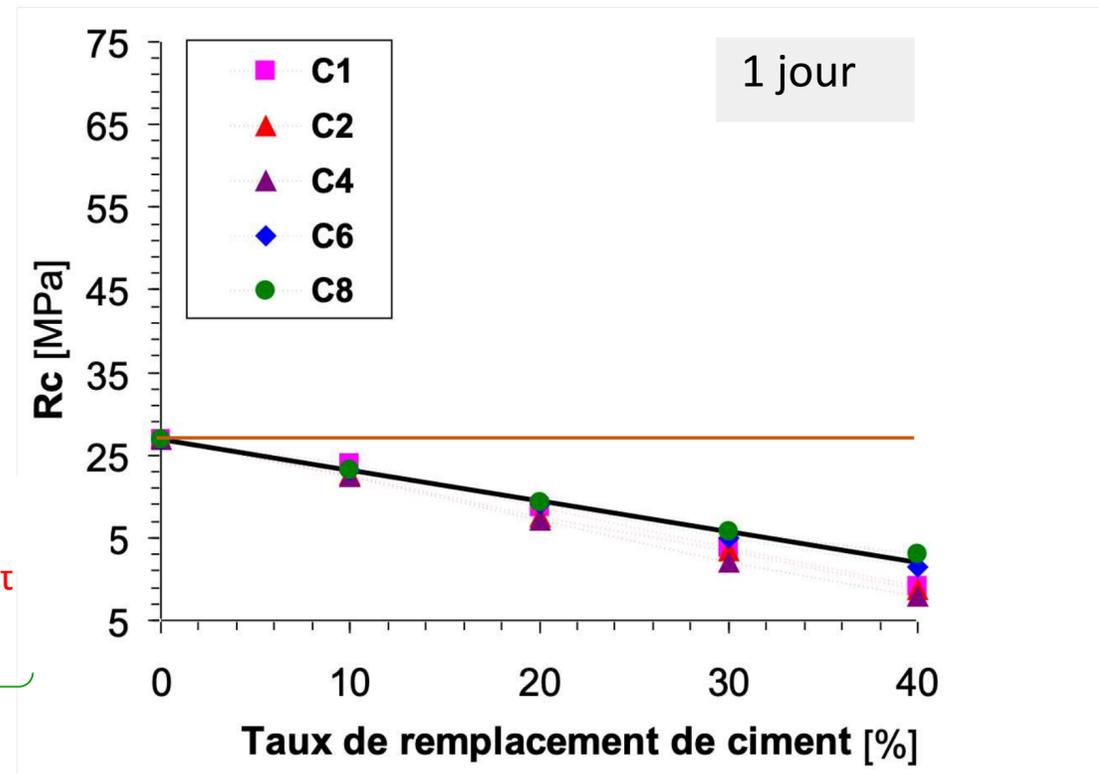


## Résultats

Eprouvettes de mortier contenant différentes classes en remplacement de ciment (cure: 20°C-100%HR)

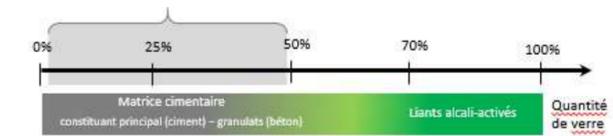
— mesure expérimentale 100% ciment  
— Calcul théorique (dilution)

Effet du verre



- 1 jour = Rc autour de la courbe de dilution  $\Rightarrow$  le verre n'a aucun effet
- 28 jours = début d'effet pour toutes les classes
- 210 jours = effet du ciment rattrapé par l'effet pouzzolanique (C8) même pour 40% de substitution

# Couplage des fines et des granulats de verre



Alcali-réactifs ←



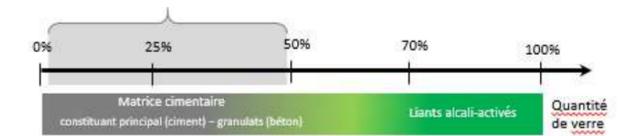
→ Pouzzolaniques

**Nécessité de broyer le verre pour une utilisation dans les bétons**

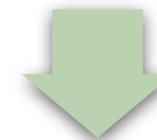


Faut-il abandonner l'idée d'utiliser des grosses particules de verre ?

# Couplage des fines et des granulats de verre



**Nécessité de broyer le verre pour une utilisation dans les bétons**



**Faut-il abandonner l'idée d'utiliser des grosses particules de verre ?**

Le verre grossier peut altérer le béton, mais son utilisation a au moins trois avantages :

- un faible coût de broyage
- utilisation en grande quantité (utilisation/sable)
- bel effet esthétique

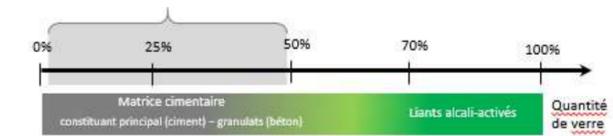
le verre fin peut améliorer les propriétés du béton, mais son obtention a au moins deux inconvénients :

- un important broyage
- utilisation en quantité réduite (utilisation/ciment)

**Est-il possible de concilier les deux réactions?**

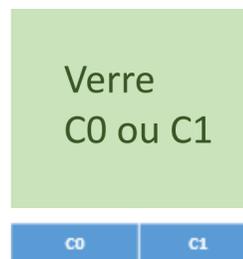
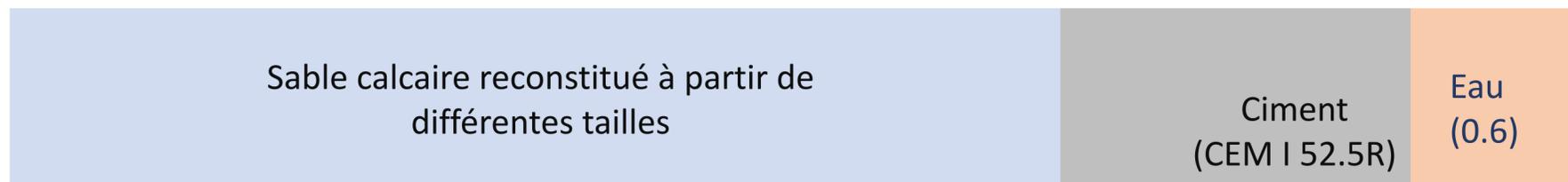
tirer profit de l'effet bénéfique des fines pour contrer l'effet néfaste des grosses

# Couplage des fines et des granulats de verre



Dénominations	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Fractions [µm]	2500- 5000	1250-2500	630-1250	315-630	160-315	80-160	< 80	< 46	< 41
S. Spécifiques [m <sup>2</sup> /kg]	1.1	2.2	4.5	11	18	35	182	389	538

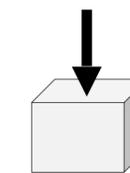
## Mortier



Teneur en KOH :

- 2.5 kg /m<sup>3</sup>
- 5.6 kg /m<sup>3</sup>
- 8 kg /m<sup>3</sup>

} Dopage

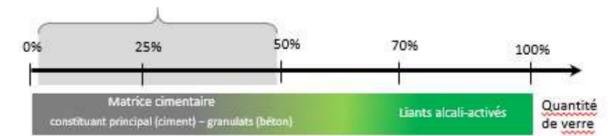


60°C-100%HR

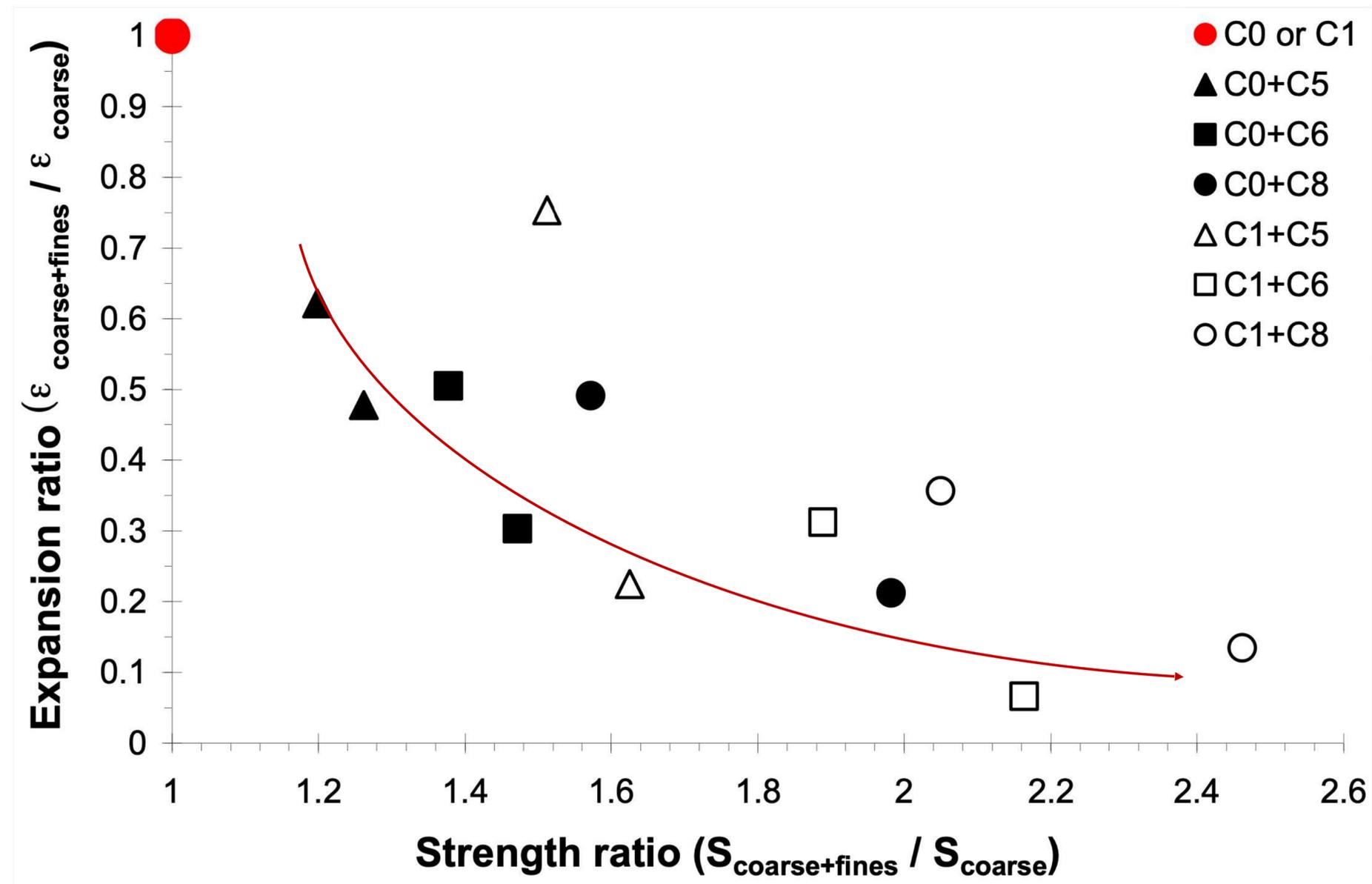


Essais de résistance à la compression  
Suivi de variation dimensionnelle sur plusieurs semaines

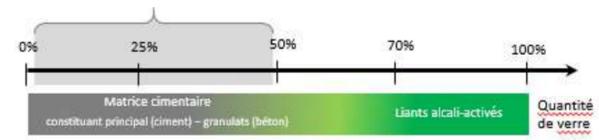
# Le verre en tant que substituant du granulats et du ciment



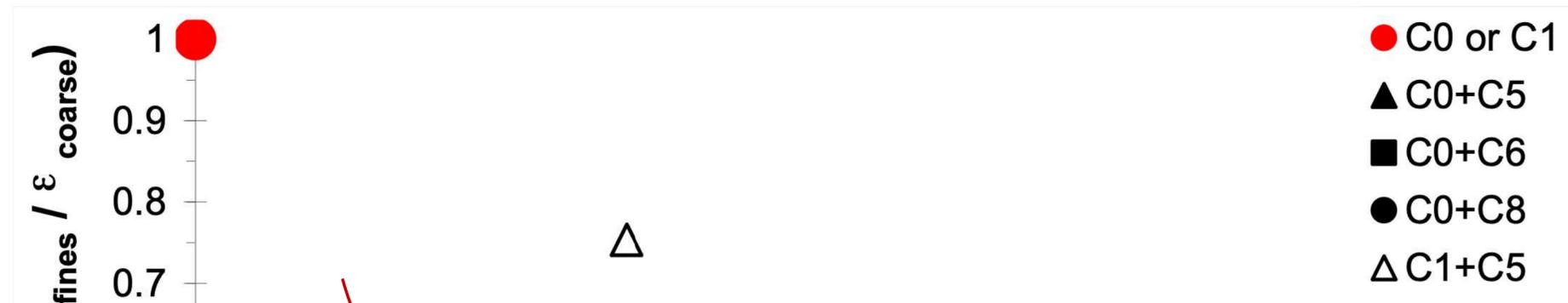
Lorsque les fines et les granulats de verre sont combinés dans le même mortier (cure : 78 semaines -60°C-100%HR)



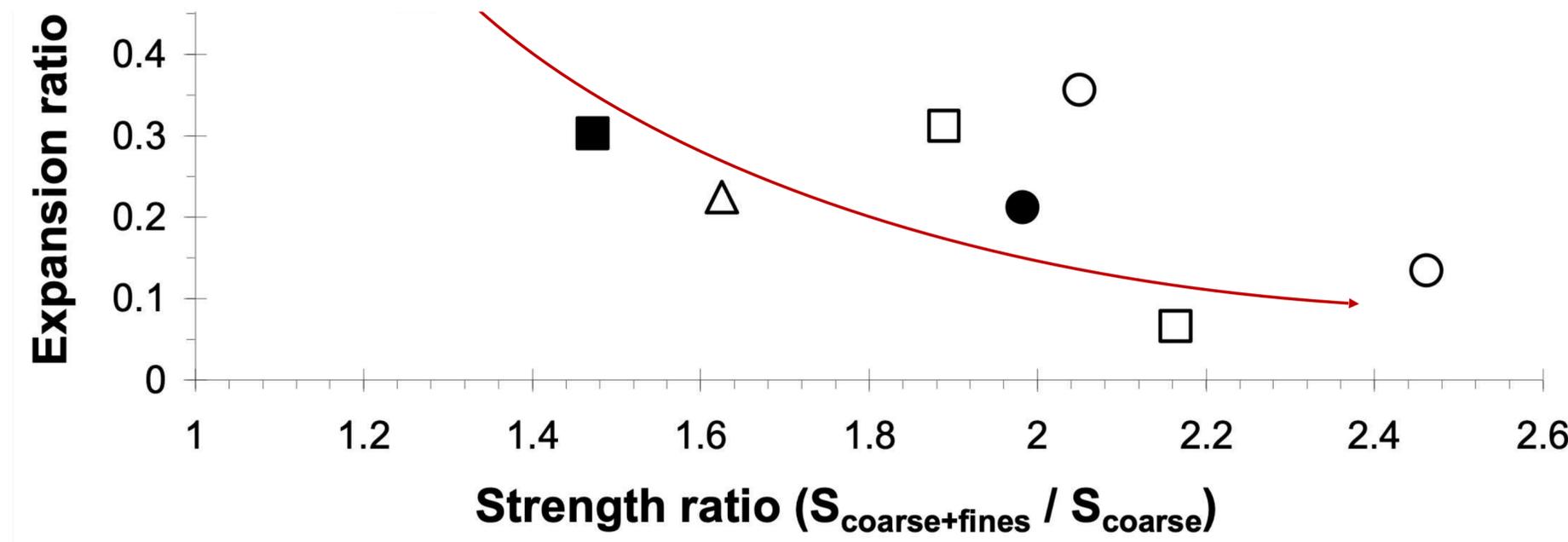
# Le verre en tant que substituant du granulats et du ciment



Lorsque les fines et les granulats de verre sont combinés dans le même mortier (cure : 78 semaines -60°C-100%HR)



**Poudre de verre** agit comme un vaccin contre la **RAS** des granulats de verre

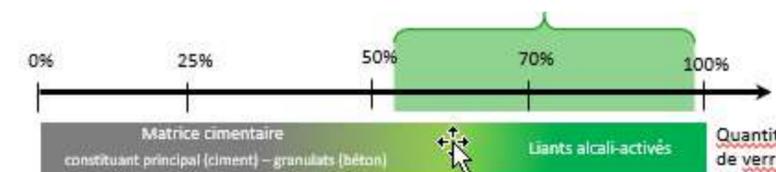


# Objectifs



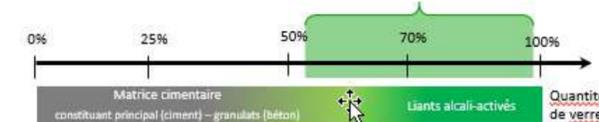
Matériaux non conventionnels

Différents défis et verrous



- Peut on formuler (paramètres) des matériaux alcali-activés à base de verre ?
- Quelles sont leurs propriétés mécanique (comportement) à court et long termes ?

# Le verre en matrice alcali-activée



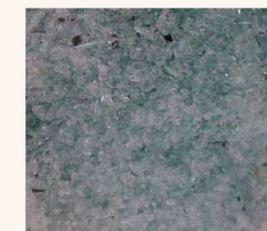
## Types d'études:

- Formulation
- Mécanismes des réactions
- Durabilité

## Paramètres



**à vitre**

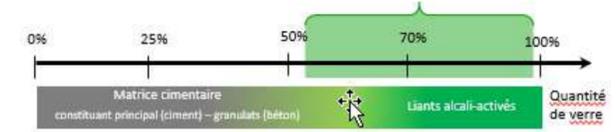


**de pare brise**



**à bouteille**

Type de verre	<b>à vitre</b>	<b>de pare brise</b>	<b>à bouteille</b>
Finesse du verre (Blaine)	1080 - 2070 - 3000 - 4170 - 6000 (cm <sup>2</sup> /g)		
Type d'activant	KOH – NaOH - Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> – CEM I		
Concentration de l'activant	1 – 3 – 5 - 10M et 5 – 10 – 15 - 25%		
Température de cure	40 - 60°C		



## Précurseur



Verre

## Activant



en solution



en poudre

Ou



Malaxage

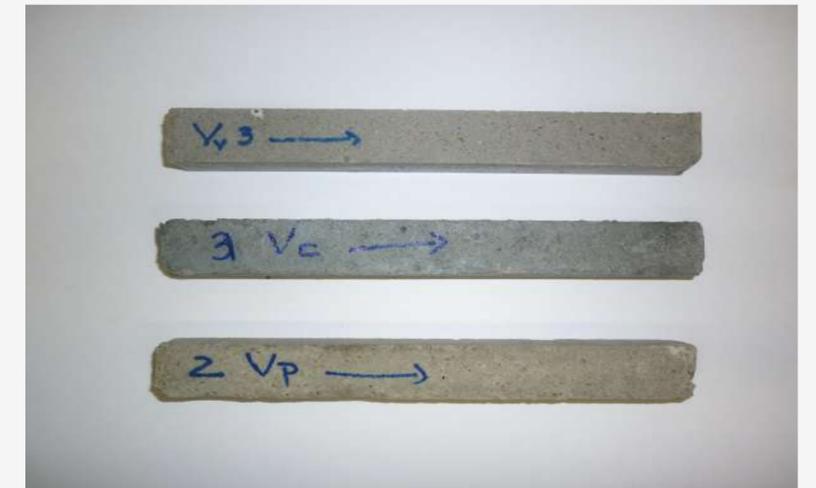


Coulage

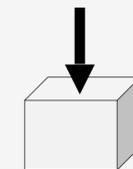


Démoulage

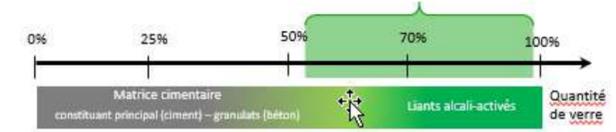
Conservation dans sacs étanches à température spécifique



Essais de résistance à la compression

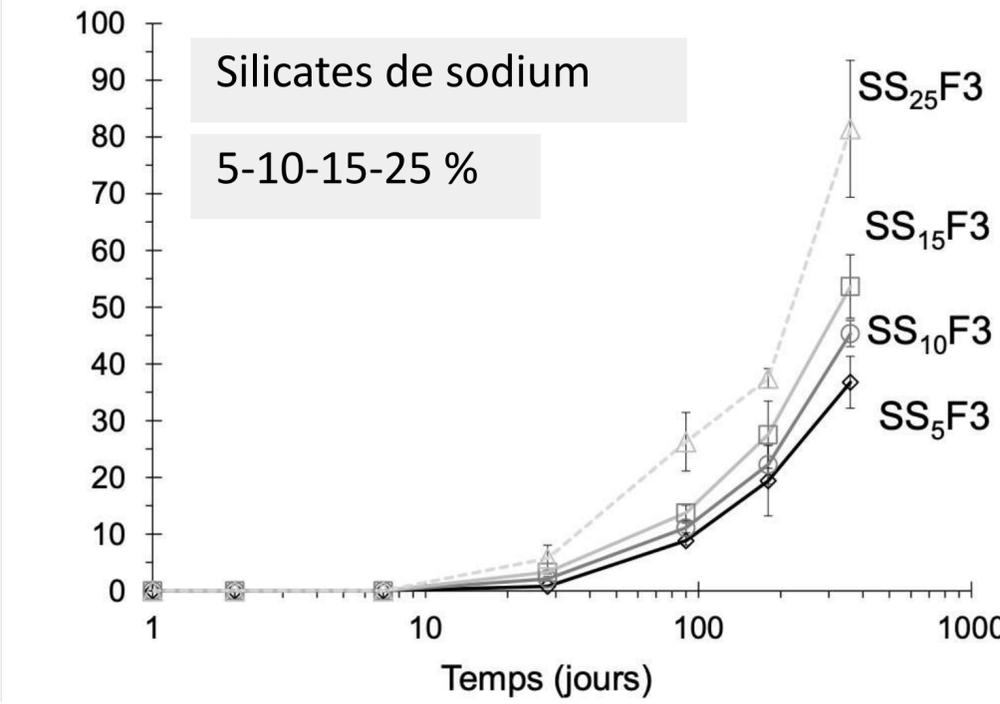
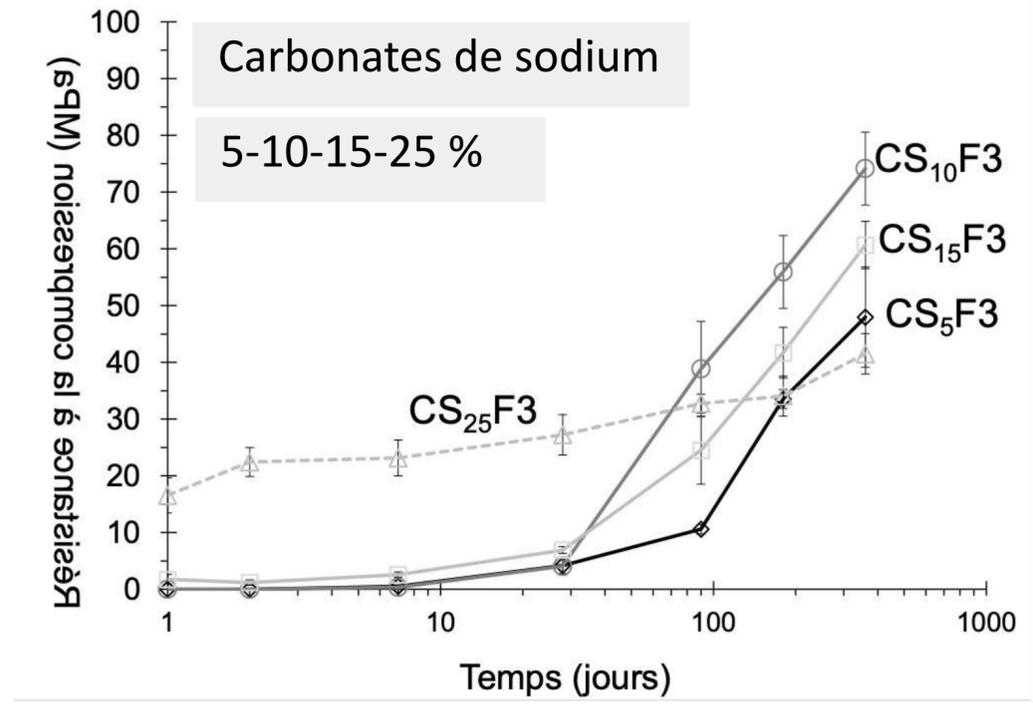
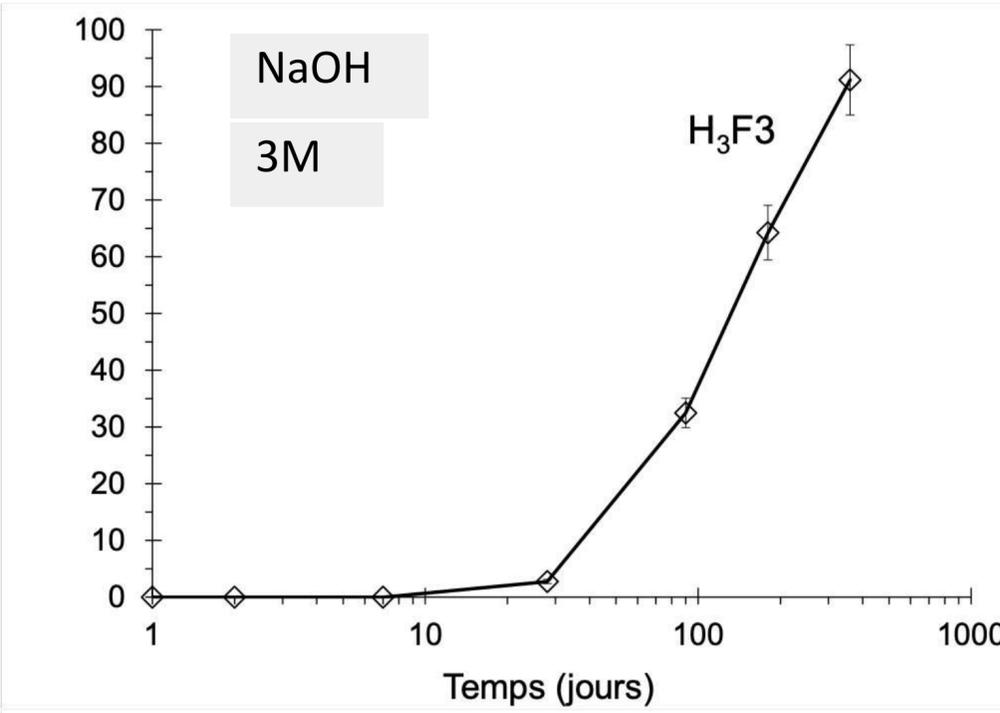
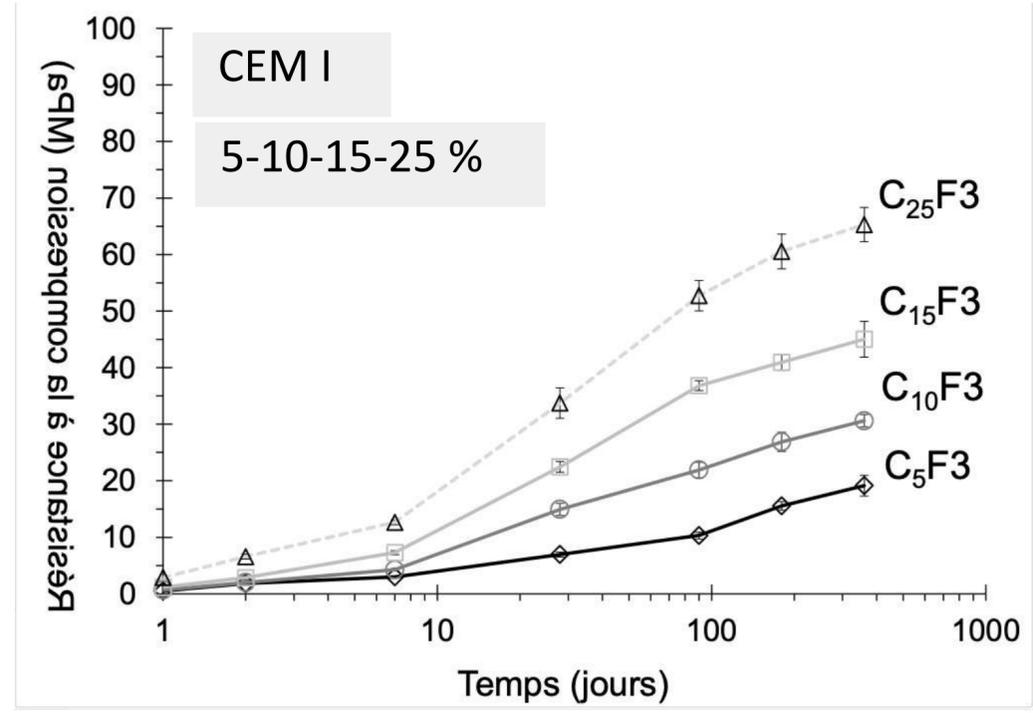


# Influence du type et de la concentration de l'activant



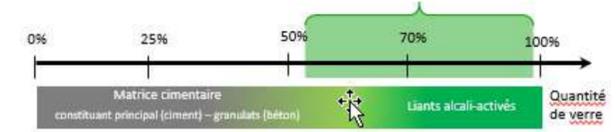
Conservation à 20°C - 100%RH

- Pour les 4 activateurs:**
- Obtention de matériaux consolidés
  - Résistances proportionnelles à la concentration des activateurs
- Hormis le CEMI**
- Les activateurs n'ont pas d'effet à court terme

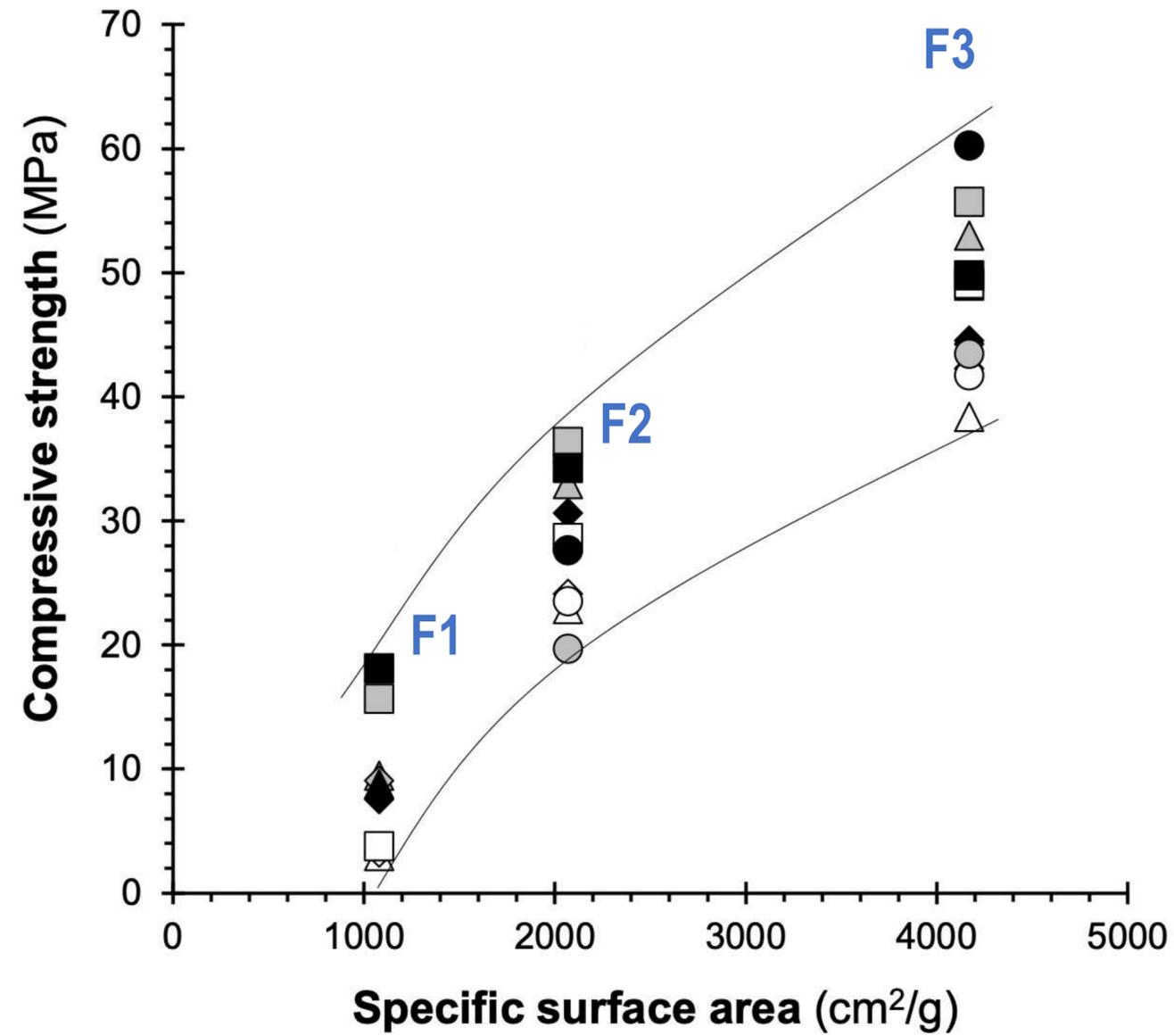


# Influence de la finesse du verre

Solutions alcalines 5M NaOH ou KOH - Conservation à 40°C ou 60°C - 100%RH



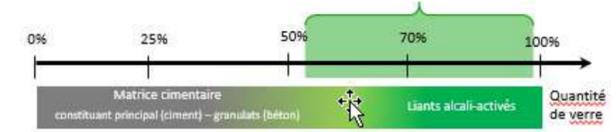
Importance du facteur finesse



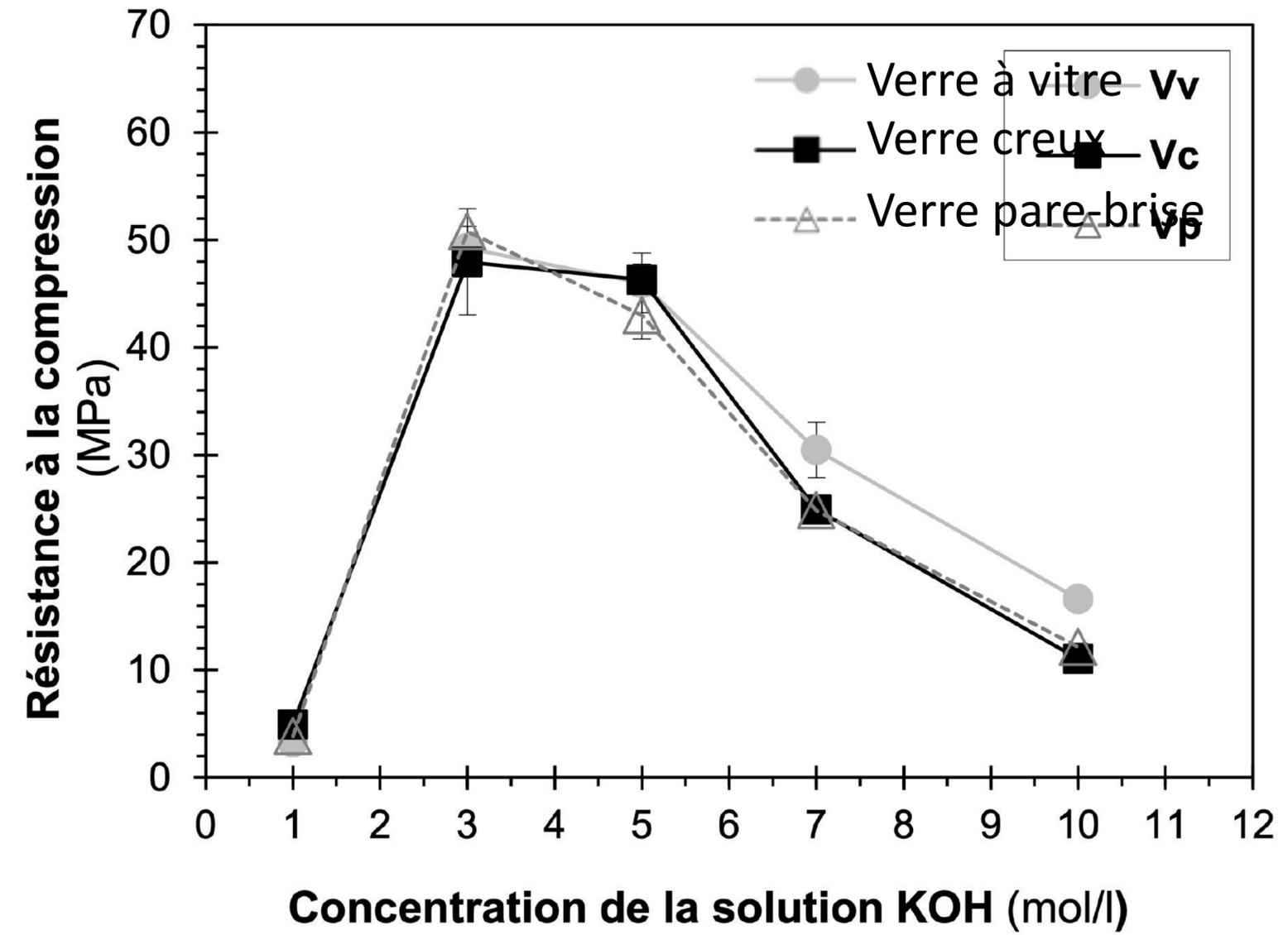
- △ NaOH, 40°C, 7d
- △ NaOH, 40°C, 28d
- ▲ NaOH, 40°C, 56d
- KOH, 40°C, 7d
- KOH, 40°C, 28d
- KOH, 40°C, 56d
- ◇ NaOH, 60°C, 7d
- ◇ NaOH, 60°C, 28d
- ◆ NaOH, 60°C, 56d
- KOH, 60°C, 7d
- KOH, 60°C, 28d
- KOH, 60°C, 56d

# Influence du type de verre

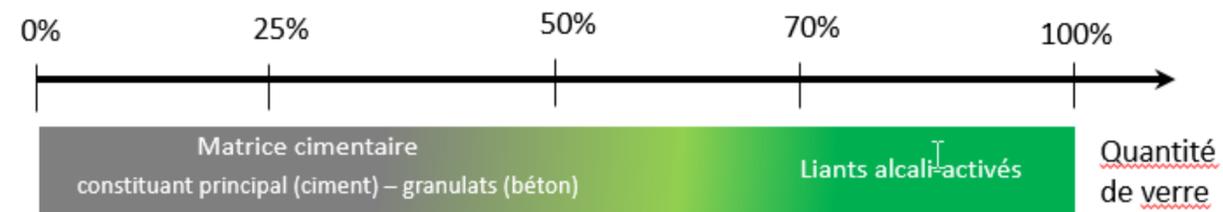
Solution KOH - Conservation 7 jours à 60°C - 100%RH



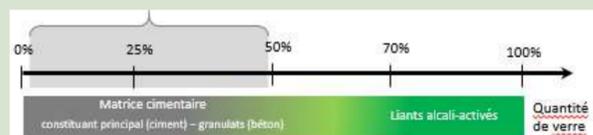
Pas d'effet du type de verre



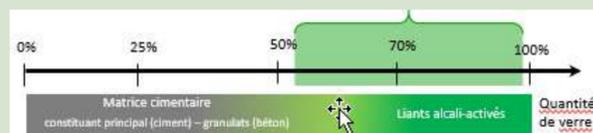
# Conclusions



**But :** L'utilisation du verre de recyclage dans les matériaux cimentaires et alcali-activés



- Le verre peut présenter suivant la taille de ses grains une réaction alcali-silice ou une réaction pouzzolanique
- 1 mm est la taille seuil au-delà de laquelle se manifestent la réaction alcali-silice (gonflement)
- Des gels de RAS sont tout de même présents pour les tailles inférieures à 1 mm ( $630\mu\text{m}$ )
- Il est possible d'utiliser les fines de verre pour contrer la réaction alcali-silice provoquée par les granulats de verre



- Il est possible d'utiliser le verre comme précurseur dans les matériaux alcali-activés
- Cette utilisation dépend de différents paramètres dont : la température de cure, la finesse du verre, le type de l'activant et sa concentration
- Il est possible d'obtenir à température ambiante des matériaux consolidés à 2 jours de cure (ciment)



# Valorisation du verre dans les matériaux du génie civil

Impliqués dans le programme présenté aujourd'hui :



André Carles-  
Gibergues



Arezki  
Tagnit-Hamou



Martin  
Cyr



Rachida  
Idir



Thomas  
Poinot



Bathyle  
Hery



Louise  
Lemesre