



Valorisation du verre de recyclage dans le béton

22/09/2021

Rachida Idir

Analyse de cycle de vie _ Evaluation environnementale des matériaux du génie civil

Développement de liants bas carbone pour le génie civil

Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement)

DIMA (Durabilité, Innovation et valorisation des Matériaux Alternatifs)

Verre



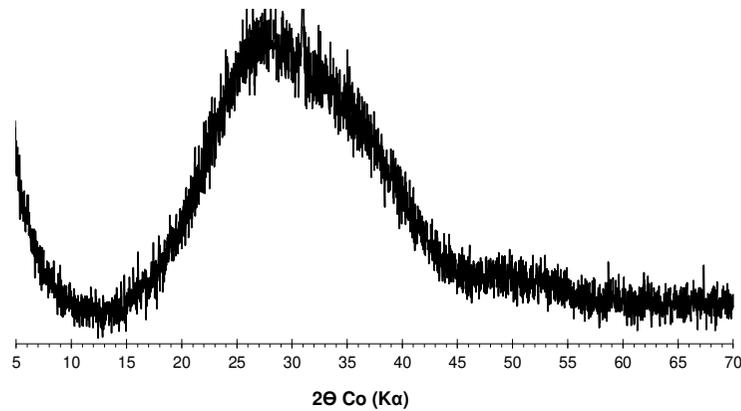
Partie du verre non destinée pour du calcin

Applications

- Fabrication de la laine de verre
- Filtrations pour piscines
- Industrie de la peinture
- Abrasion au jet ...

Non admis

- Décharge



Diffractogramme de rayon X du verre

Composition chimique (Masse%)							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
69.1	2.0	0.3	12.4	1.1	0.2	0.6	13.6

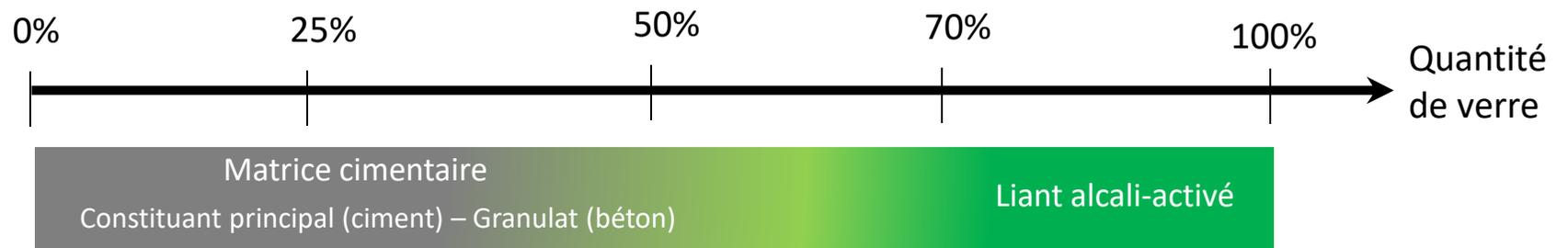
**Piste potentielle :
Valorisation dans les
bétons**





Le verre dans le béton

Littérature riche en travaux qui traitent de l'utilisation du verre dans le béton



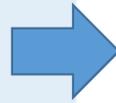
La littérature a montré...

Granulats
de verre



Dégradation de la structure

Réaction alcali-silice



Cracking

La littérature a montré...

**Granulats
de verre**



Dégradation de la structure

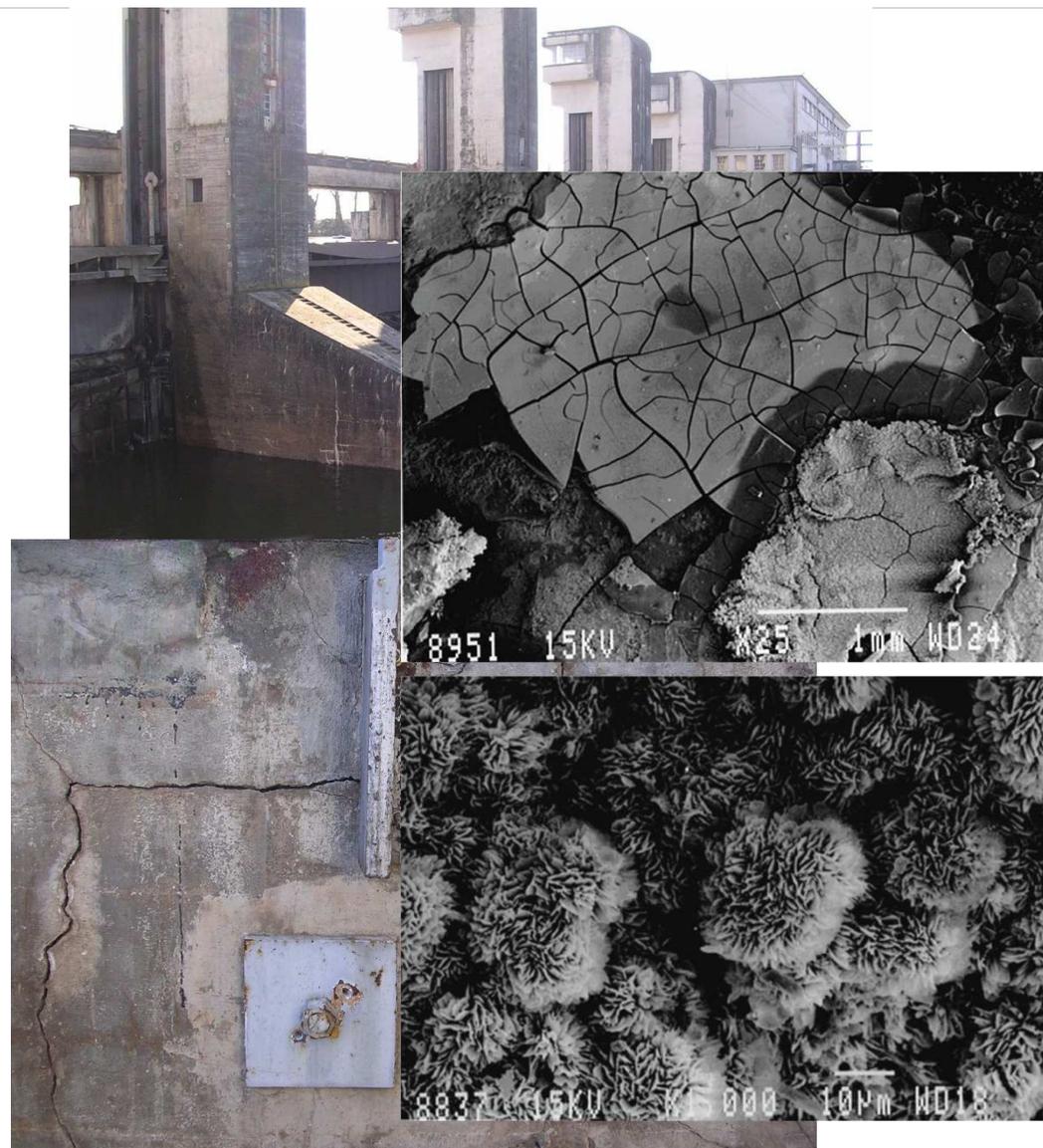
Réaction alcali-silice

Silice réactive
(Granulats)
+
Ions hydroxyles et alcalins
en solution dans le béton
+
Eau



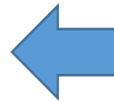
Gel Gonflant →
Fissuration du béton

Cracking
...and typical reaction products



La littérature a montré...

Mais solution avec un inconvénient
Faibles propriétés mécaniques à jeune âge





Utiliser le verre en tant que granulats

Peut altérer le béton, mais son utilisation a au moins trois avantages :

- un faible coût de broyage
- utilisation en grande quantité (sable)
- Effet esthétique



Utiliser le verre en tant que fines

Peut améliorer les propriétés du béton, mais son obtention a au moins deux inconvénients :

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



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Valorisation du verre de recyclage dans le béton

2006-2021



Rachida IDIR,
Chercheur-HDR
Co-directeur



Martin CYR,
Professeur
Co-directeur



Arezki TAGNIT-HAMOU,
Professeur
Co-directeur

Louise LEMESRE, PhD degree on the optimization of geopolymers based on recycled glass, 2021

**Louise
LEMESRE**

**Bathylle
HERY**

Bathylle HERY, Master degree on the durability geopolymers based on recycled glass coming from different sources, 2012

Thomas POINOT, Master degree on the formulation and durability of geopolymers based on recycled glass, 2010

**Thomas
POINOT**

**Raphaël
BUCHER**

Raphaël BUCHER, Master degree on the durability and LCA of geopolymers based on recycled glass and metakaolin, 2011

Nora IZZA, Master degree on the development of glass binder containing metakaolin, 2010

**Nora
IZZA**

**Ndriana
Rakotovao-
Ravahatra**

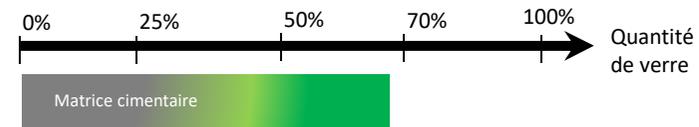
Ndriana RAKOTOVAO-RAVAHATRA, Master degree on the optimization of glass binder containing metakaolin, 2011

Nos travaux sur la valorisation du verre de recyclage dans le béton

Domaines potentiels



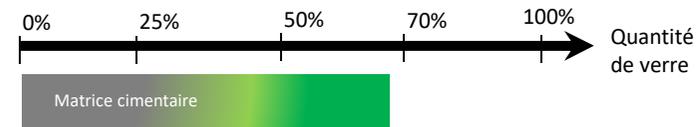
Le verre dans la matrice cimentaire



Questions principales traitées

- A partir de quelle taille les particules de verre ont-elles un effet néfaste/bénéfique ?
- S'agit-il d'un passage graduel d'une réaction à l'autre ou existe-t-il un effet de seuil ? Si seuil, est-il fixe ou dépend t-il de la formulation du matériau (mortier, béton) ?
- Est-il possible de concilier les deux réactions ➡ tirer profit de l'effet bénéfique des fines pour contrer l'effet néfaste des grosses ?
- Quels sont les mécanismes qui expliquent le passage d'une réaction à l'autre ?
- Que deviennent les alcalins du verre ?
- Comment améliorer les faibles performances mécaniques que présentent les bétons de verre à jeune âge ?

Le verre dans la matrice cimentaire



Questions principales traitées

- A partir de quelle taille les particules de verre ont-elles un effet néfaste/bénéfique ?
- S'agit-il d'un passage graduel d'une réaction à l'autre ou existe-t-il un effet de seuil ? Si seuil, est-il fixe ou dépend-t-il de la formulation du matériau (mortier, béton) ?
- Est-il possible de concilier les deux réactions ➔ tirer profit de l'effet bénéfique des fines pour contrer l'effet néfaste des grosses ?
- Quels sont les mécanismes qui expliquent le passage d'une réaction à l'autre ?
- Que deviennent les alcalins du verre ?
- Comment améliorer les faibles performances mécaniques que présentent les bétons de verre à jeune âge ?



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^2/kg]	1,1	2,2	4,5	11	18	35	182	389	540

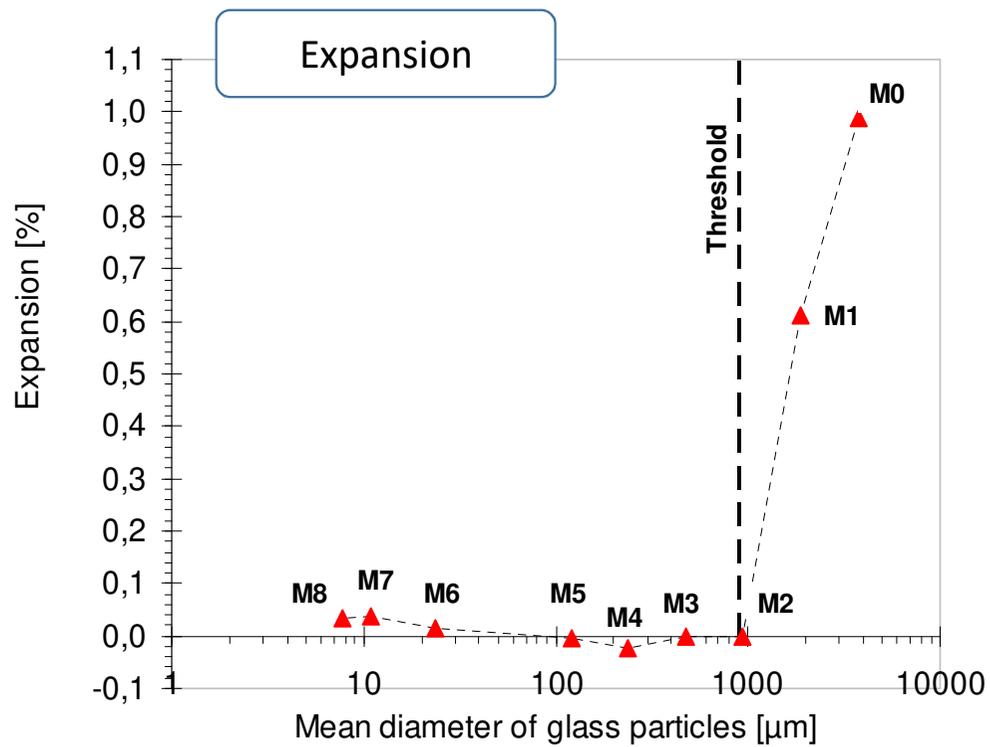


- *Variations dimensionnelles*
- *Résistances à la rupture par compression*

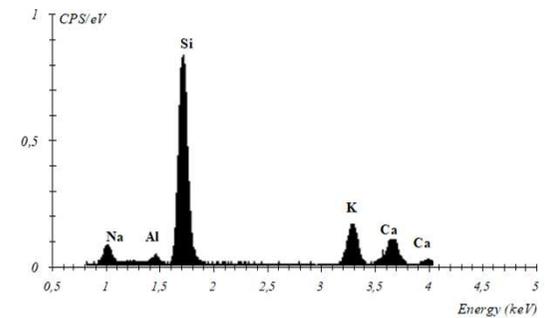
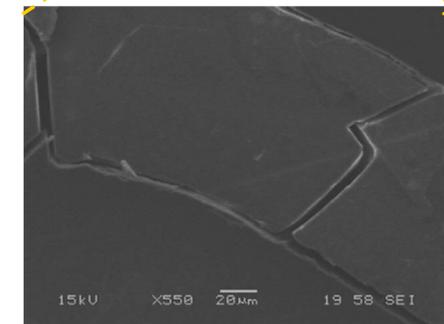
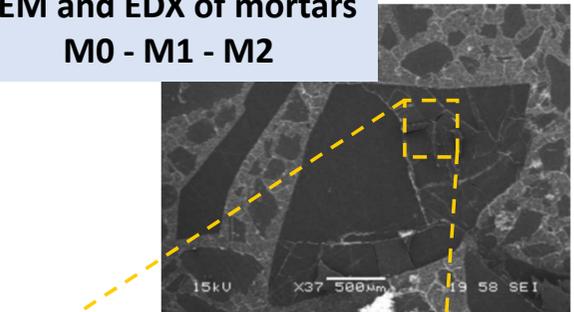
Principaux résultats

- Taille des particules
- Effet de seuil

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



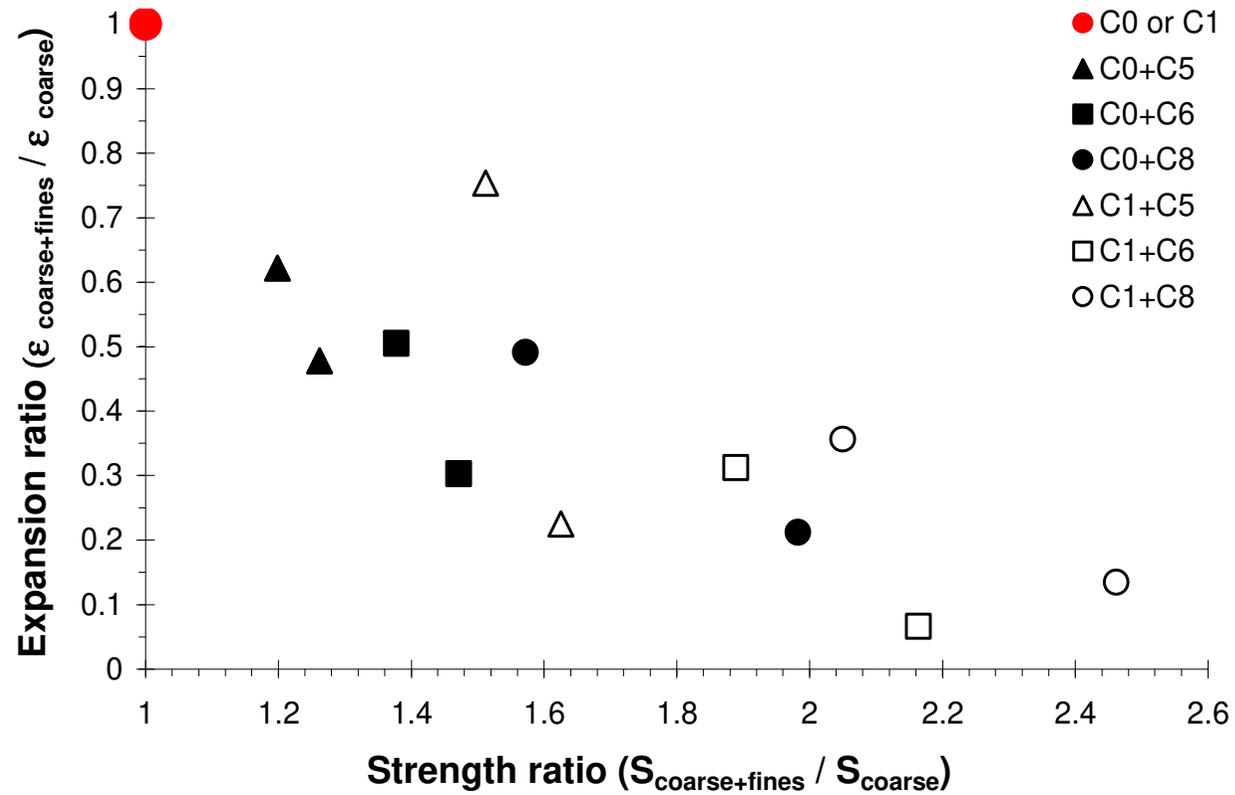
SEM and EDX of mortars M0 - M1 - M2



Principaux résultats

■ Combinaison des fines et des granulats

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



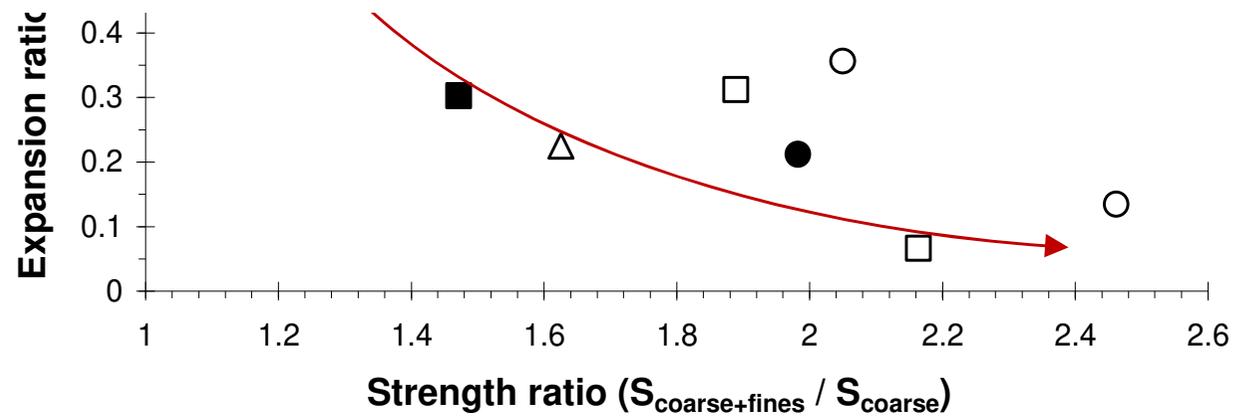
■ Combinaison des fines et des granulats

Principaux résultats

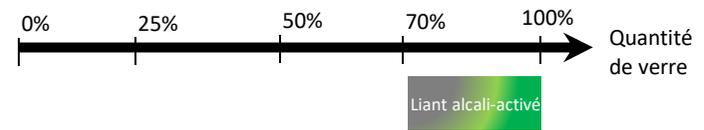
Lorsque les fines et les granulats de verre sont combinés dans le même mortier (cure : 78 semaines -60°C-100%HR)



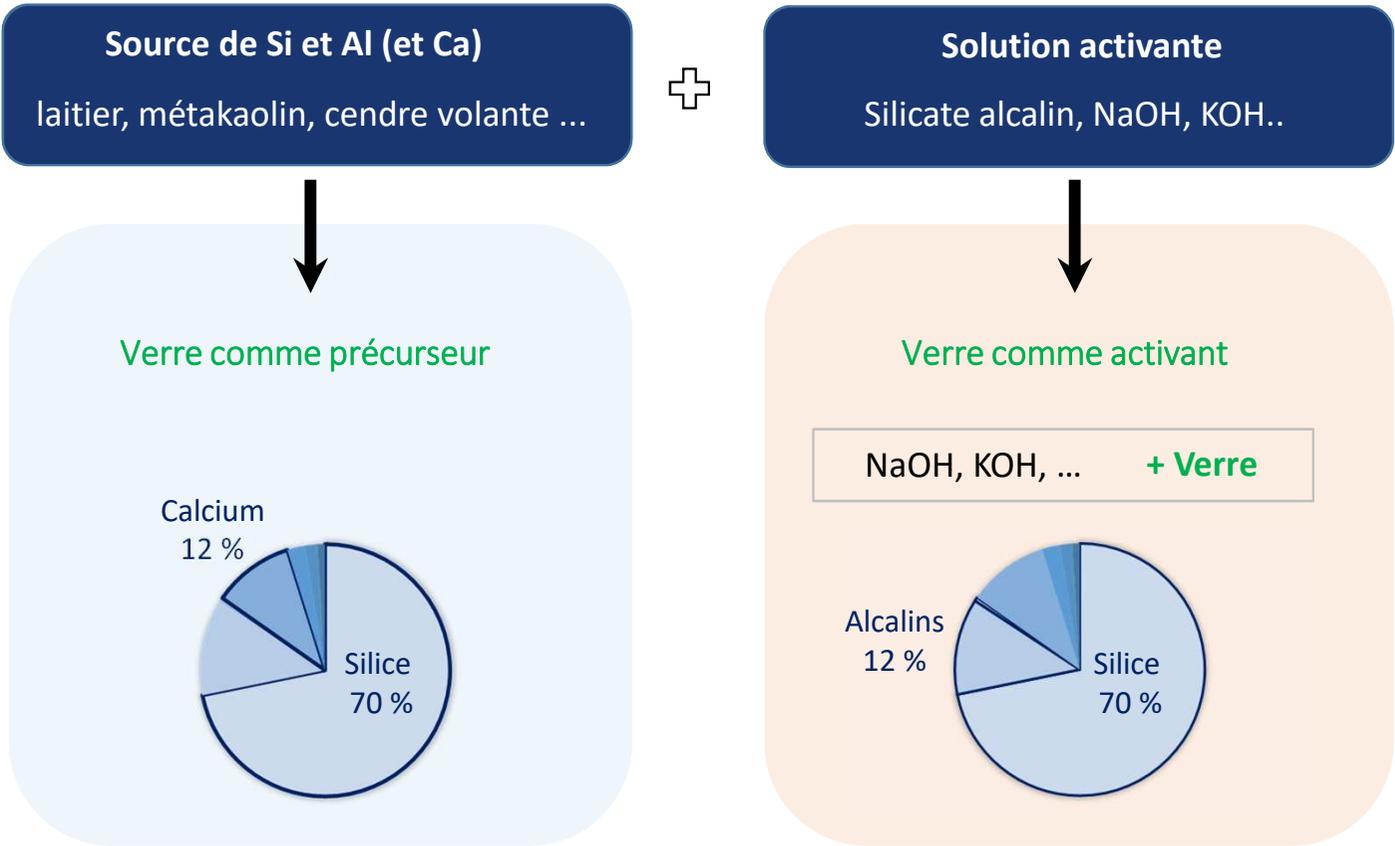
Glass powder acts as a **vaccine** against **glass aggregate ASR**



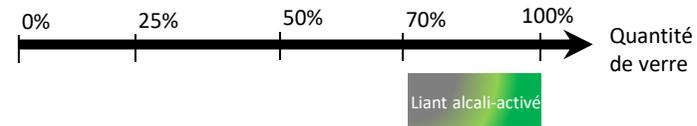
Le verre dans la matrice alcali-activée



C'est quoi un matériau alcali-activé ? (zéro ciment)



Le verre dans la matrice alcali-activée



Questions principales traitées

- Peut-on utiliser le verre dans les liants alcali-activés ?

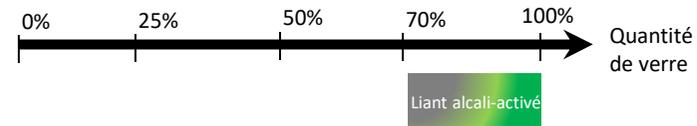
- Comme précurseur

- Quelle est la nature de l'activant et la finesse du verre qui permettent d'obtenir les meilleures performances mécaniques et environnementales des systèmes à base de verre ?
- Quels sont les leviers (finesse du verre, taux d'activant, température de cure,...) qui permettent d'améliorer les performances à court terme ? Et Quelles sont les conséquences de l'utilisation de ces leviers à long terme (résistances à la compression, microstructure) ?
- Quels sont les mécanismes de réaction qui régissent les différents systèmes à base de poudre de verre ?
- Quels sont les impacts environnementaux des différents systèmes fabriqués à base de poudre de verre ?

- Comme activant

- Dans quelle mesure le verre peut-il être utilisé comme activant à la place des silicates de sodium du commerce ?
 - Quelles sont les méthodes optimales pour dissoudre le verre ?
- Quelle est la durabilité de ces matériaux vis-à-vis des attaques internes et externes ?

Le verre dans la matrice alcali-activée



Questions principales traitées

- Peut-on utiliser le verre dans les liants alcali-activés ?

- Comme précurseur

- Quelle est la nature de l'activant et la finesse du verre qui permettent d'obtenir les meilleures performances mécaniques et environnementales des systèmes à base de verre ?
- Quels sont les leviers (finesse du verre, taux d'activant, température de cure,...) qui permettent d'améliorer les performances à court terme ? Et Quelles sont les conséquences de l'utilisation de ces leviers à long terme (résistances à la compression, microstructure) ?
- Quels sont les mécanismes de réaction qui régissent les différents systèmes à base de poudre de verre ?
- Quels sont les impacts environnementaux des différents systèmes fabriqués à base de poudre de verre ?

- Comme activant

- Dans quelle mesure le verre peut-il être utilisé comme activant à la place des silicates de sodium du commerce ?
- Quelles sont les méthodes optimales pour dissoudre le verre ?
- Quelle est la durabilité de ces matériaux vis-à-vis des attaques internes et externes ?

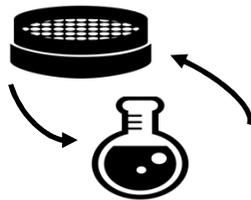
Le verre comme précurseur

Le verre comme activant



Types d'études :

- Formulation
- Mécanismes des réactions
- Durabilité



Paramètres

Type de verre	 à vitre	 de pare brise	 à bouteille
Finesse du verre (Blaine)	F1 (1080) - F2 (2070) - F3 (4170) (cm ² /g)		
Type d'activant	KOH -NaOH		
Concentration de l'activant	1 - 3 - 5 -10 M		
Température de cure	40 - 60°C		

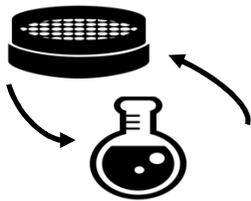
Le verre comme précurseur

Le verre comme activant



Types d'études :

- Formulation
- Mécanismes des réactions
- Durabilité



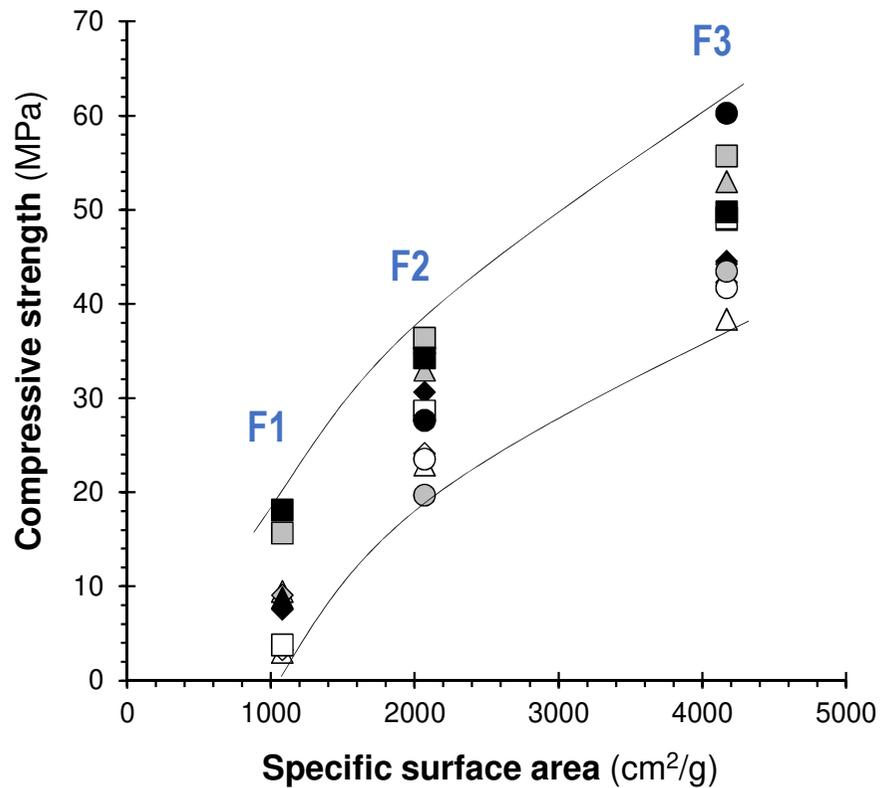
Eprouvettes (2x2x16 cm) de poudre de verre activée avec une solution 3M NaOH

	à bouteille
	2070) - F3 (4170) (n ² /g)
	-NaOH
	- 5 -10 M
	- 60°C

Principaux résultats

Effet de la finesse

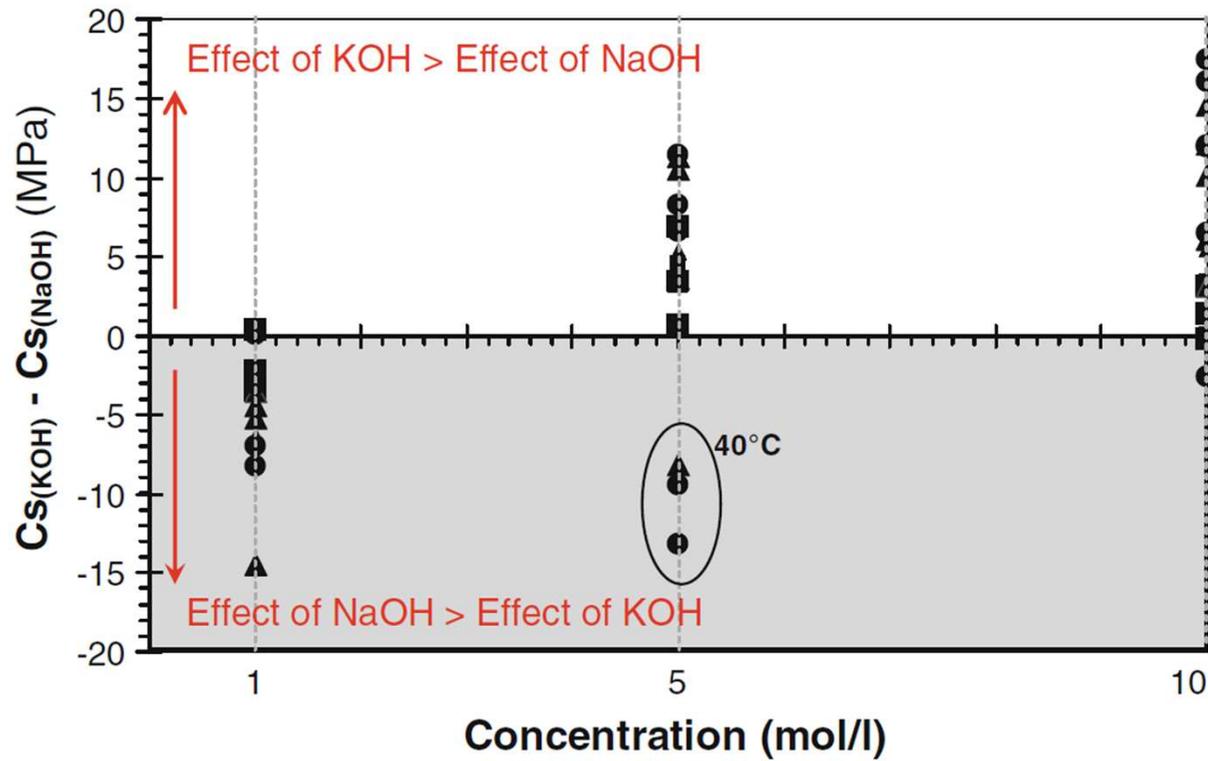
Solutions alcalines 5M NaOH ou KOH - Conservation à 40°C ou 60°C - 100%RH



- △ 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

Principaux résultats

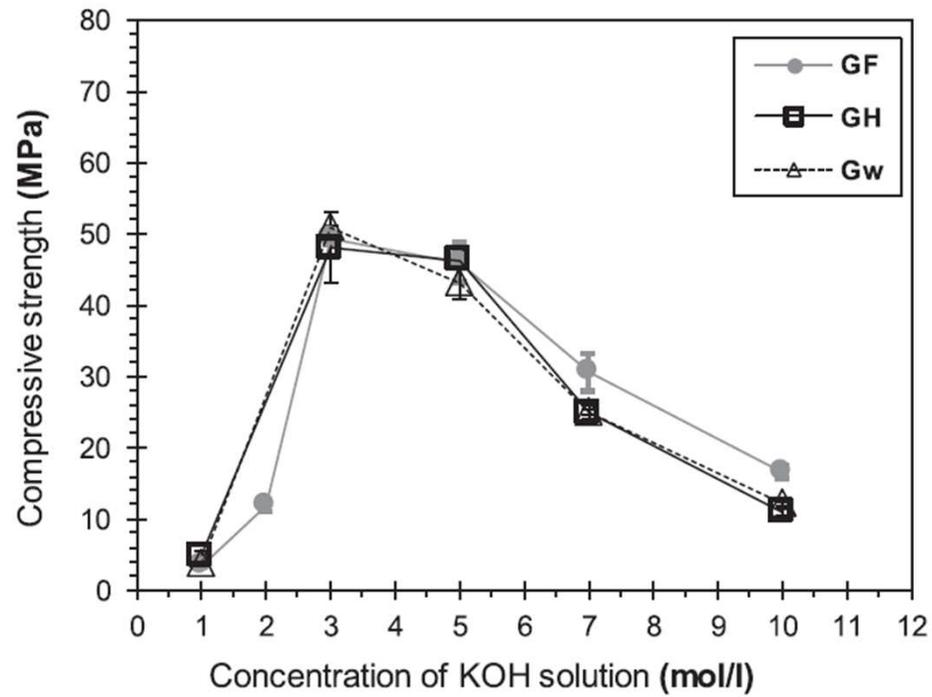
Effet du type de l'activant



- (F1.F2.F3)-(40°C.60°C)- 7days
- (F1.F2.F3)-(40°C.60°C)- 28days
- ▲ (F1.F2.F3)-(40°C.60°C)- 56days

Principaux résultats

Effet de la concentration de l'activant



Solutions alcalines KOH - Conservation à 60°C - 100%RH

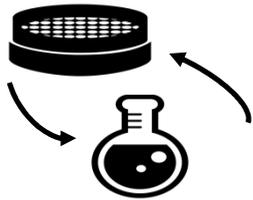
Le verre comme précurseur

Le verre comme activant = silicate alcalin



Types d'études:

- Formulation



Silicates de sodium du commerce

Paramètres variés

Mode de synthèse

Paramètre spécifique au mode de synthèse

Finesse du verre

Type d'activant

Concentration de l'activant

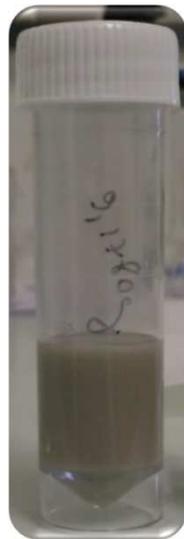
Temps de préparation

Le verre comme précurseur

Le verre comme activant = silicate alcalin



Avec filtration

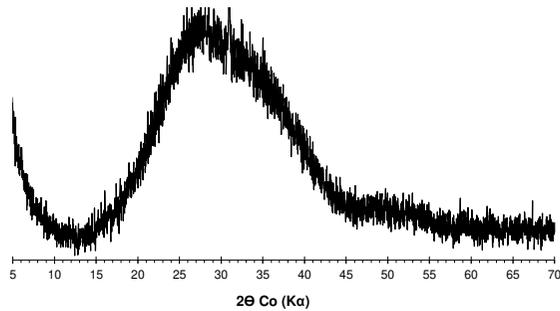


Sans filtration



Cure 24h-T°20C

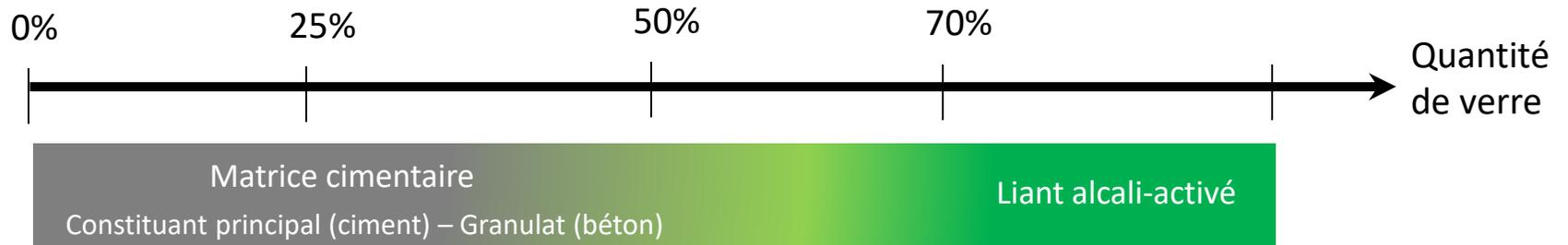
Conclusions



Diffractogramme de rayon X du verre

Composition chimique (Masse%)							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
69.1	2.0	0.3	12.4	1.1	0.2	0.6	13.6

- Un bon potentiel technique
- De bonnes caractéristiques de durabilité aux attaques internes (réaction alcali-silice) et attaques externes (sulfatiques, acides)



Conclusions

D'un point de vue normatif, le verre a les caractéristiques d'un produit qui pourrait être normalisé, ce qui simplifierait son utilisation en tant que liant.

Normalisation française
ou européenne ?



This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.



Designation: C1866/C1866M – 20

Standard Specification for Ground-Glass Pozzolan for Use in Concrete¹

This standard is issued under the fixed designation C1866/C1866M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Cerema

Références

Le verre en matrice cimentaire

- Idir R., Cyr M. and Tagnit-Hamou A. **Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars**, Construction and Building Materials, vol.24, n°7, July 2010, p.1309–1312
- Idir R., Cyr M. and Tagnit-Hamou A. **Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet**, Cement and Concrete Composites, Cement and Concrete Composites, vol. 33, n° 1, January 2011, p. 19-29
- Idir R., Cyr M. and Tagnit-Hamou A. **Role of the nature of reaction products in the differing behaviours of fine glass powders and coarse glass aggregates used in concrete**, Materials and structures, vol. 46, January 2013, Issue 1, p. 233–243
- Idir R., Cyr M. and Tagnit-Hamou A. **Potential pozzolanicity of glass cullet fines and aggregates**, Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, Février 2011, p.28-34
- Idir R., Cyr M. and Tagnit-Hamou A. **Can we massively reuse glass in concrete? Properties of glass Concrete** (L'utilisation du verre dans les bétons, une alternative pour un recyclage massif), Revue Verre, vol.16, n°5-6, 2010, p.70-77
- Idir R., Cyr M. and Tagnit-Hamou A. **Use of waste glass in cement-based materials**, Déchets, Sciences et Techniques, Janvier-Février-Mars 2010, n° 57
- Idir R., Cyr M. and Tagnit-Hamou A. **Peut-on valoriser massivement le verre dans les bétons**, Technol Valoris 16 (5/6), 2010, p.70-77
- Idir R., Cyr M. and Tagnit-Hamou A. **Use of waste glass in cement-based materials**, Wascon 2009, Lyon (France)
- Idir R., Cyr M. and Tagnit-Hamou A. **Waste glass in cement-based materials : use of fine powders to counteract the alkali-silica reaction due to coarse aggregate**, (SBEIDCO 2009), The First International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries Topic- Durability of materials and structures, vol.3, p.109 October 12-14 2009, Oran (Algeria)

Références

Le verre en matrice alcali-activée

- Cyr M., Idir R. and Poinot T. **Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet**, Journal of Materials Science, 47 (6) (2012), p. 2782-2797
- Idir R., Cyr M. and Pavoine A. **Investigations on the durability of alkali-activated recycled glass**, Construction and Building Materials, Volume 236, 10 March 2020, 117477
- Idir R., Cyr M., Poinot T. and Khelil N. **Properties of geopolymer mortars made of glass cullet**, 13th International Congress on the Chemistry of Cement, 3-8 July 2011, Madrid (Spain)
- Idir R., Cyr M., Pavoine A. and Hery B. **Durabilité de géopolymères à base de différentes sources de verre de recyclage**, Colloque International Francophone NoMaD pp.156-167, 19 et 20 Novembre 2012, Toulouse (France)
- Idir R., Cyr M. and Poinot T. **Propriétés de géopolymères à base de verre de recyclage**, (CITEDUB 2 2012), Le 2ème Congrès International sur la Technologie et la Durabilité du Béton, 27-29 Novembre 2012, Alger (Algérie)
- Lemesre L., Idir R. and Cyr M. **Development, Development and characterization of glass composite system based on Ground Granulated Blast Furnace Slag and Glass Cullet Powder**, 11th ACI/RILEM International Conference on Cementitious Materials and Alternative Binders for Sustainable Concrete, 29 June-1 July 2020, Toulouse (France)
- Idir R., Pavoine A., Harbec D ; and Tagnit-Hamou A. **Peut-on remplacer les solutions de silicates de sodium par la poudre de verre de recyclage : Etude de faisabilité**, 5ème Colloque du GIS G3 (Groupement d'Intérêt Scientifique 'Géopolymères, Géocomposites, Géomatériaux à base d'argile), 16 et 17 juin 2017, Clermont-Ferrand