

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

Rachida Idir¹, Louise Lemesre¹, Bathyle Hery¹, Thomas Poinot², André Carles-Gibergues², Arezki Tagnit-Hamou³, Martin Cyr²

¹ Cerema, Univ Gustave Eiffel, UMR MCD, F-77171 Sourdun, France

² LMDC-INSA/UPS-Université de Toulouse, Toulouse, France

³ Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec), CANADA J1K 2R1

ABSTRACT Cet article présente un bilan de plusieurs travaux montrant qu'il est possible de valoriser le verre issu du recyclage dans les matériaux cimentaires et alcali-activés. En matrice cimentaire, le verre de recyclage présente une activité pouzzolanique qui augmente avec la finesse de ses particules. Néanmoins, il n'est pas nécessaire de l'utiliser uniquement sous forme de fines pour sa valorisation. Ainsi, jusqu'à un diamètre moyen de grain voisin de 1mm, aucun gonflement dû à la réaction alcali-silice n'apparaît. Pour des diamètres supérieurs, la combinaison de sable de verre avec des fines de verre permet de limiter les expansions des mortiers dus à l'alcali-réaction des grosses particules supérieures à 1mm. L'utilisation combinée des fines et des granulats de verre permet donc de concilier les réactions pouzzolanique et alcali-silice au sein de la même matrice. En milieu alcali-activé, le verre permet d'obtenir de fortes résistances à long terme, mais parmi les 5 activants étudiés (ciment, silicate de sodium, carbonate de sodium, hydroxyde de sodium, hydroxyde de potassium), seul le ciment permet d'obtenir des résistances à la compression à jeune âge (2 et 7 jours) à température ambiante, probablement grâce à la seule activité hydraulique du ciment. Avec les autres activants, une température de 40°C ou 60°C est nécessaire mais suffisante pour obtenir des résistances à jeune âge très élevées, essentiellement quand du verre très fin est utilisé.

Keywords verre de recyclage, fines de verre, granulats de verre, matrice cimentaire, liant alcali-activé

I. INTRODUCTION

Le verre est un matériau à plusieurs vies, il peut être recyclé à l'infini. Cependant, pour ce faire, il est nécessaire que le verre provenant de la collecte sélective et qui constitue le calcin respecte un cahier des charges strict. Ceci signifie qu'il ne doit pas contenir de contaminants (porcelaine, faïence, grès, carrelage...) ni de verre spéciaux (pare-brise, écrans de télévision, miroir et verre non transparent et coloré). Les poussières de verre ne sont également pas utilisées car elles nuisent au bon fonctionnement des fours¹. Ainsi, une part importante de verre de la collecte se retrouve écartée du circuit de recyclage et une source non négligeable de verre est, à l'heure actuelle, non valorisée en France et dans le monde. Cet article a pour but de présenter des exemples de valorisation qu'offre le verre sodo-calcique de recyclage dans deux types de

¹ www.verre-avenir.fr

matrices, avec et sans clinker Portland. L'utilisation du verre en matrice cimentaire est une alternative étudiée depuis plusieurs décennies. Les études ont montré que la taille des grains de verre a son importance quant à l'orientation que prend la réaction du verre. En effet, des grains fins entraînent une réaction pouzzolanique aux propriétés liantes qui améliorent le comportement du béton alors que des grains plus grossiers entraînent un gel gonflant par réaction alcali-silice qui dégrade le béton. Les travaux de Idir [2009] ont repris en détail ces effets.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Matériaux

Le verre utilisé pour les tests d'alcali-réaction et de pouzzolanité est un verre à bouteille de nature sodocalcique de différentes couleurs. Différentes classes, notées C_x ($x=0$ à 8), ont été obtenues après tri, lavage, séchage, broyage et tamisage. Pour les tests d'alcali-activation, trois finesses de verre ont été obtenues par broyage d'un verre à bouteille sodocalcique (F1, F2, F3). L'effet du type de verre a été étudié sur trois catégories de verre : du verre à vitre plat Vv, du verre à bouteille creux Vc et du verre à pare-brise Vp. Les **Tableaux 1** et **2** donnent les finesses de ces verres, leur densité ainsi que leurs compositions chimiques.

Le ciment utilisé est un ciment Portland de type CEM I 52,5 R conformément à la norme NF EN 197-1 [2001]. Sa masse volumique et sa surface spécifique sont respectivement $3,15 \text{ g/cm}^3$ et $440 \text{ m}^2/\text{kg}$. Sa composition chimique est donnée au **Tableau 2**.

Un sable de marbre non réactif a été utilisé pour compléter la granulométrie du verre dans l'étude d'alcali-réactivité. Sa masse volumique est $2,7 \text{ g/cm}^3$. Quatre classes granulaires ont été préparées après broyage et tamisage. Les tailles s'étalent entre 160 et $2500 \mu\text{m}$. Les fines inférieures à $160\mu\text{m}$ ont été éliminées pour éviter toute interaction avec les particules de verre. Le sable utilisé pour l'étude de pouzzolanité est un sable quartzéux conforme à la norme NF EN 196-1 [2006].

Différents activateurs ont été utilisés pour les matrices alcali-activées. De l'hydroxyde de sodium (NaOH) et de potassium (KOH) qui proviennent de la société Honeywell. Ils se présentent sous forme de pastilles dont la pureté est supérieure à 98% . Pour la fabrication des solutions activantes (1 , 3 , 5 , 7 et 10M), les pastilles ont été dissoutes dans de l'eau à température ambiante. Le silicate de sodium (Na_2SiO_3) utilisé provient de la société Woellner sous l'appellation Betol 39 T. Il est composé (%massique) de $27,5 \%$ de SiO_2 , de $8,3 \%$ de Na_2O et de $64,2 \%$ d'eau et son rapport molaire ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) est de $3,42$. Le carbonate de sodium (Na_2CO_3) provient de chez Honeywell. Il est conditionné sous forme de poudre dont la pureté de 99% .

B. Méthodes

1. Tests d'alcali-réaction (RAS)

Pour les essais d'alcali-réactivité, les tests ont été conduits sur des mortiers confectionnés d'une part de ciment et de trois parts de sable. Le rapport eau-ciment était de 0.6 . La teneur en alcalins des mélanges a été ajustée par ajout de pastilles de KOH à l'eau de gâchage. Trois dosages ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) ont été étudiés : $2,5$; $5,6$ et 8 kg/m^3 de mortier en $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ($\text{Na}_2\text{O}+0,658x\text{K}_2\text{O}$), $2,5 \text{ kg/m}^3$

étant la teneur en alcalins amenée par le ciment seul. Pour chaque dosage, neuf types de mortiers contenant différentes classes de verre (C0 à C8) ont été préparés conformément à la norme NF EN 196-1 [2006]. Après 24h de cure, les éprouvettes (2x2x16 cm) ont été démoulées puis conservées dans un réacteur (60°C-100% HR). Le test est basé sur la Norme NF P 18-454 [2004] conçue pour les bétons qui a été validée sur des mortiers [Moisson, 2005] et sur des éprouvettes de tailles 2x2x16 cm [Idir 2009].

Pour évaluer le potentiel alcali-réactif traduit par des gonflements de chacune des classes de verre, 20% des granulats non réactifs ont été remplacés dans chaque mortier par la même classe de verre. L'efficacité des fines de verre à contrer la RAS des grosses particules (C0 et C1) a été testée en utilisant trois classes de fines (C5, C6 et C8) avec 20 et 40% de remplacement de sable.

2. Tests de pouzzolanicité

Les tests d'activité pouzzolanique ont été conduits sur des mortiers composés de trois parts de sable et d'une part de liant (ciment et verre). Le rapport eau-liant était de 0.5. Quatre types de mortiers ont été préparés avec différents remplacements (10, 20, 30 et 40%) de ciment par les classes de verre C1, C2, C4, C6 et C8. Les mortiers ont été réalisés conformément à la norme NF EN 196-1 [2006]. Après démoulage, les éprouvettes (4x4x16 cm) ont été conservées dans de l'eau à 20°C jusqu'aux échéances des tests (1, 7, 28, 90 et 210 jours). Chaque résultat d'essai en compression est la moyenne de 6 à 9 valeurs.

3. Tests d'activation alcaline

Les tests d'activation alcaline ont été conduits sur des mortiers et des pâtes. Les mortiers sont composés de trois parts de sable et d'une part de poudre de verre. Le rapport solution alcaline-poudre de verre était de 0,5. Les mortiers ont été réalisés conformément à la norme NF EN 196-1 [2006]. Les moules ont été scellés dans des sacs en plastique pour minimiser la perte d'humidité, puis stockés directement à 40 ou 60 °C pendant 7 jours, puis à température ambiante dans des sacs étanches jusqu'aux échéances des tests (7, 28, 56 jours). Les pâtes sont composées d'une part de fines de verre et de 5, 10, 15 ou 25% d'activants (CEM I, Na₂SiO₃, Na₂CO₃). Une solution de 3 mol/l a été utilisée pour l'activant hydroxyde de sodium (NaOH). Le rapport eau/solide (solide = verre+activant) était de 0.3. Les pâtes ont été fabriquées suivant la norme la norme NF EN 196-1 [2006]. Après le démoulage, les éprouvettes (20x20x20 mm) ont été conservées dans des sacs étanches à 20°C jusqu'aux échéances des tests (1, 7, 28, 90, 180 et 360 jours).

TABLE 1. Propriétés physiques des matériaux utilisés

	Types de verre (V), Finesses de verre (F) et Classes de verre (C)												
	V _v , V _c V _p	F1	F2	F3	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Surface spécifique (m ² /kg)	400	108	208	417	-	-	-	-	-	-	200	350	540
Taille des gains (µm)	<80	<80	<80	<80	2500-5000	1250-2500	630-1250	315-630	160-315	80-160	<80	<46	<41
M. vol. (g/cm ³)							2,5						

TABLE 2. Compositions chimiques des matériaux utilisés

	Composition chimique (% massique)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Perte au feu
Ciment	19.8	5.6	2.5	63.6	1.8	3.1	0.1	0.7	1.7

Vv	72.2	0.7	0.1	7.8	4.3	0.2	0.2	-
Verre creux	70	1.9	1.0	12.3	1.4	0.1	0.2	-
Vp	70	1.9	1.0	11.7	1.4	0.1	0.1	-

Verre creux : rassemble Vc, C0 à C8 et F1, F2 et F3

III. VERRE EN TANT QUE SUBSTITUANT DU GRANULAT

En subissant un léger concassage, le verre peut être utilisé comme granulats dans le béton. Ce traitement a l'avantage de présenter un faible coût mais peut entraîner une réaction néfaste pour la structure. Qualifiée de "cancer des bétons", la réaction alcali-silice (RAS) est le résultat de la réaction de la silice amorphe d'un granulats avec les ions hydroxyles et alcalins présents dans la solution interstitielle du béton et qui proviennent du ciment. Cette réaction donne naissance à un gel gonflant provoquant la fissuration du béton et dans certains cas sa destruction. Cette réaction est étroitement liée à la taille des grains de verre et la quantité d'alcalins disponibles dans la solution interstitielle. Cela est illustré par la **Figure 2**, qui présente l'influence de la granularité du verre sur le gonflement à l'infini (ϵ^∞) déterminé par le modèle de Larive [1997] d'éprouvettes de mortiers (de M0 à M8). Sur la figure, on constate l'existence d'un seuil critique de taille de grains que nous pouvons fixer à 0,9-1 mm. Il est à rappeler que ce diamètre critique qui provoquerait des gonflements a déjà été évoqué dans la littérature. Byars et al., [2004] l'ont estimé entre 0,60 et 1,18mm. Pour Yamada et al., [2005] ce seuil se situerait entre 0,150 et 0,300mm. Quant à Meyer et al., [1996] elle serait de 0,038 mm.

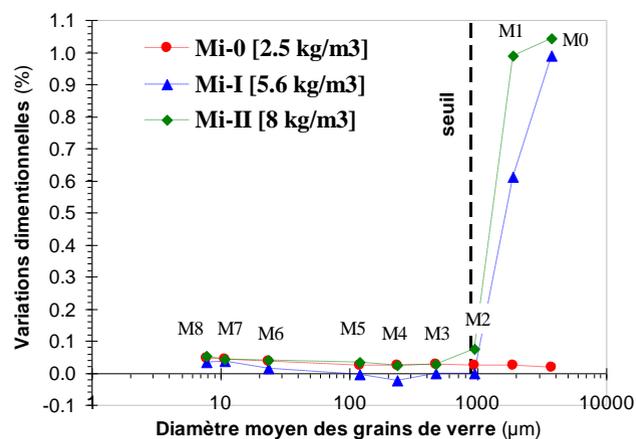


FIGURE 1. Influence de la granularité du verre sur le gonflement à l'infini (ϵ^∞) d'éprouvettes de mortiers (M0 à M8), fabriqués selon les caractéristiques suivantes : remplacement de 20 % du sable par du verre ; cure : T = 60°C, 100 % HR (humidité relative) ; dosage en alcalins (en kg/m³) : 2,5 (0) ; 5,6 (I) et 8 (II). [Idir, 2009].

IV. VERRE EN TANT QUE SUBSTITUT DU CIMENT

Un broyage prononcé du verre laisse envisager une utilisation en tant que liant [Shayan et Xu 2004]. Dans ce cas-ci, la silice du verre réagit avec la chaux produite par la réaction du ciment, créant ainsi des composés dotés de propriétés liantes : c'est la réaction pouzzolanique. La **Figure 3** présente les résistances relatives (rapport des résistances des mortiers avec et sans verre) en fonction de la surface spécifique du verre jusqu'à 210 jours de cure pour des mortiers avec

différents taux (10, 20, 30 et 40%) de remplacement de ciment par du verre. Les courbes inertes ont été calculées avec la loi de Bolomey (Equation 1). Afin de quantifier l'effet apporté par le verre, nous avons comparé les résistances obtenues avec des résistances théoriques calculées par le biais de la loi empirique de type Bolomey. Cette loi relie des résistances mécaniques aux rapports C/E par l'intermédiaire d'un coefficient k qui tient compte du ciment utilisé et du squelette granulaire. Ce coefficient K est soit fixé ou soit calculé à partir du témoin et on prend comme hypothèse qu'il ne change pas suivant la classe de verre. Ceci permet de calculer la résistance attendue en fonction de la composition. La différence entre les résistances mesurées et calculées permet alors de quantifier l'effet apporté par le verre. On peut voir que jusqu'à 30% de verre, les résistances relatives sont plus élevées que les courbes inertes (sauf pour 1 jour), ce qui signifie qu'il y a une activité non négligeable pour toutes les tailles de particules de verre, y compris les plus grossières. A 1 jour et pour une teneur de 10% de verre, l'effet de la finesse est limité, toutes les classes de verre ont des résistances relatives comparables à la courbe de dilution. Seule la classe la plus fine se détache des autres courbes à long terme (90 et 210 jours). Cela signifie que le ciment peut être remplacé par n'importe quelle taille de verre sans pour autant nuire à l'activité, la résistance relative restant toujours supérieur à 0.9 dans tous les cas. Avec 20, 30 et 40% de verre, un changement progressif de comportement, lié à l'effet de taille du verre est observé. Cet effet devient plus important avec l'augmentation de la teneur en verre.

$$\sigma = K_b \left(\frac{C}{W+V} - 0.5 \right) \quad (\text{Equation 1})$$

où σ est la résistance à la compression du mortier, C, W et V sont respectivement les masses du ciment (sans tenir compte du verre), d'eau et des vides (pris égale à 10% de la teneur en eau), et K_b est un coefficient qui prend compte la nature du ciment et des granulats. Ce coefficient a été calculé pour chaque échéance en utilisant la résistance en compression du mortier témoin sans verre (courbe inerte).

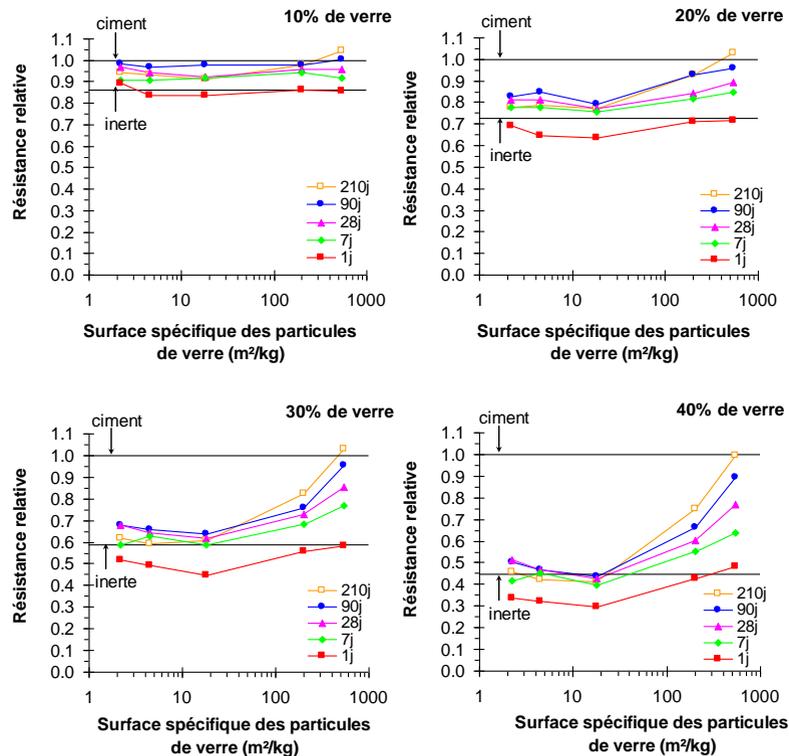


FIGURE 2. Résistances relatives (%) des mortiers en fonction des finesses du verre. Comparaison avec les courbes de dilution obtenues par la loi de Bolomey. Mortiers préparés avec différents remplacements (10, 20, 30 et 40%) de ciment par les classes de verre C1, C2, C4, C6 et C8. cure : T = 20°C, 100 % HR. [Idir et al., 2011]

V. COMBINAISON DES FINES ET DES GRANULATS DE VERRE

En considérant la pathologie qu'entraînent les granulats de verre, il est vraisemblable que la valorisation du verre ne soit possible qu'à travers un broyage accentué. Cependant, le coût qu'engendre une telle opération peut freiner cette voie de valorisation. Pour contrer la RAS, des études ont proposé la combinaison du verre à des pouzzolanes tels que : les fumées de silice, les cendres volantes ou le métakaolin [Park 2001]. Il est vrai que ces pouzzolanes ont montré leur efficacité mais elles restent quelque fois couteuses et ne sont pas toujours disponibles localement. Nos travaux ont montré qu'il était possible de tirer profit de la réaction pouzzolanique apportée par les fines de verre pour contrer la réaction alcali-silice provoquée par les granulats de ce même matériau, dans le but d'une valorisation optimale du verre. La **Figure 3** présente les réductions de gonflements (en %) des mortiers (M0 et M1) avec 20% de de granulats C0 et C1 par 20% ou 40% de fines de verre (C5, C6, C7 et C8). On peut constater que même si globalement, l'augmentation de la finesse améliore la réduction des gonflements, il semble que l'augmentation de la teneur en fines soit le facteur prépondérant, particulièrement pour les fines C6 et C8. Ainsi, on peut conclure que les réductions peuvent atteindre 50 à 90 % lorsque 40 % de fines sont utilisés (toutes finesses confondues), contre 25 à 70 % pour 20 % de fines ; les fines C6 et C8 (utilisées à 40 %) peuvent mener à des réductions d'expansion d'environ 90 % ; l'effet de la finesse est moins marqué lorsque les fines ont une granularité inférieure à 80 μm . Cette figure permet également de

constater que 5 fois sur 6, les fines ont été plus efficaces à réduire les expansions dues à C1 par rapport à C0.

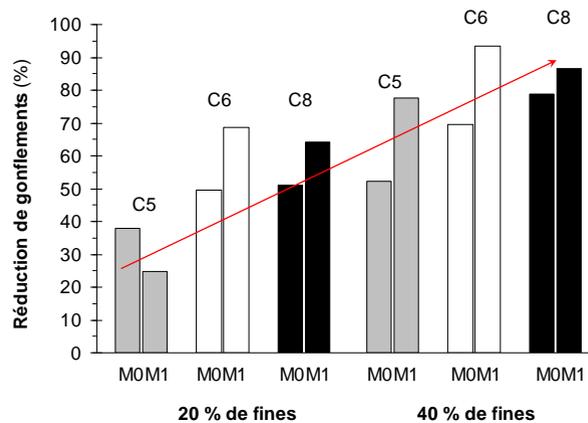


FIGURE 3. Effet des fines de verre (C5, C6, C7, C8) sur la réduction des gonflements de mortiers (M0, M1) fabriqués avec 20 % de granulats de verre (C0, C1), selon une cure de 43 semaines à $T = 60^{\circ}\text{C}$ et 100 % HR. Les fines de verre sont utilisées en remplacement de 20 et 40 % de ciment et les granulats de verre en remplacement de 20 % du sable). [Idir et al., 2010]

VI. FINES DE VERRE COMME PRECURSEUR EN MATRICE ALCALI-ACTIVEE

Quelques études ont été rapportées ces dernières années où de la poudre de verre est utilisée dans des liants activés par des alcalins. Ces types de matériaux sont basés sur des précurseurs d'aluminosilicates (avec plus ou moins de calcium) activés par des solutions fortement alcalines. Dans certaines études, le verre a été utilisé comme précurseur unique [Cyr et al., 2012 ; Torres-Carrasco et Puertas 2017] ou combiné à d'autres matériaux [Martinez-Lopez et Escalante-Garcia 2016]. Si beaucoup de littérature est connue pour les composés vitreux tels que le laitier de haut fourneau granulé, il est encore difficile de sélectionner un système d'activation approprié pour le verre. Afin de faciliter cette sélection, une évaluation de certains paramètres basée sur des critères mécaniques est proposée dans cet article. Pour les études entières se rapporter aux références données.

L'évaluation des résistances à la compression de quatre systèmes de fines de verre (F3) activés par différents activants (CEM I, Na_2SiO_3 , Na_2CO_3 et de NaOH) à différentes concentrations a été réalisée et présentée sur la **Figure 4**. La tendance générale est que plus la proportion de ciment (C) et de silicate de sodium (SS) dans la pâte est importante, plus la résistance de la pâte est élevée. Cependant, à jeune âge (0-7 jours), seuls les mélanges avec ciment présentent des résistances mécaniques mesurables quel que soit le dosage utilisé, probablement dû à l'hydraulicité du ciment. Les mélanges avec le silicate de sodium et l'hydroxyde de sodium ne commencent à développer des résistances mécaniques $> 2\text{MPa}$ qu'à partir de 28 jours de cure. Cette tendance est particulièrement différente pour le carbonate de sodium. En effet, les dosages de 15 et 25% entraînent des résistances dès 1 jour cure (mais un figeage rapide du mélange) et les deux dosages 5 et 10% seulement à partir de 7 jours. La tendance est inversée à long terme, où le mélange à 10% est celui qui présente les meilleures résistances.

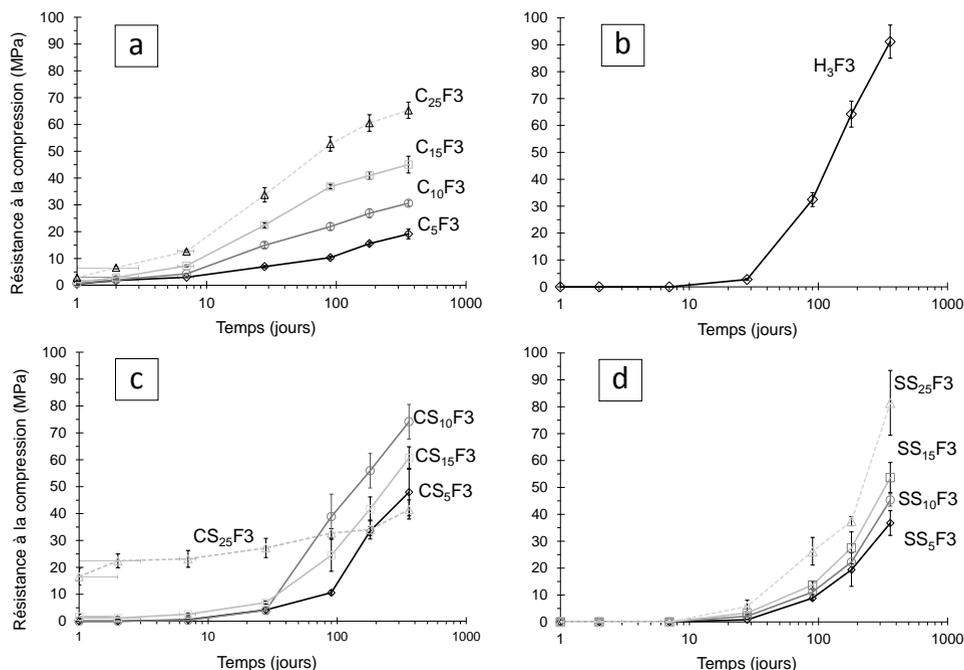


FIGURE 4. Influence de la nature et de la quantité d'activant sur les résistances à la compression de pâtes alcali activées. Cure 20 °C, dans sacs étanches. (Échelle logarithmique). [Lemesre, 2021]

a- Activation au CEM I (C) 5, 10, 15 et 25% b- Activation à l'hydroxyde de sodium (H) 3 mol/l c- Activation au silicate de sodium (SS) 5, 10, 15 et 25% d- Activation au carbonate de sodium (CS) 5, 10, 15 et 25%

Il est clair (**Figure 5**) que la finesse du verre a une influence marquée sur le développement des performances mécaniques des mortiers : plus la finesse est grande, plus la résistance à la compression du mortier est élevée. Quel que soit le terme, la température de cure, le type et la concentration de la solution alcaline, les mortiers à base de verre de finesse F3 ont eu la plus grande résistance. La finesse F1 conduit systématiquement à des résistances à la compression plus faibles.

La **Figure 6** montre que l'augmentation de la température de cure a un effet sur les résistances à la compression des mortiers. La température favorise la dissolution des espèces réactives. A court terme (7 jours), la résistance à la compression a été systématiquement améliorée avec la température. Au fur et à mesure que le temps de cure augmentait, une température optimale est mise en évidence. Ceci se confirme à long terme (56 jours), où la résistance à la compression obtenue à 40 °C était supérieure à celles enregistrées à 20 et 60 °C. Ce phénomène est similaire à celui observé dans les matériaux à base de ciment, c'est-à-dire une réaction très rapide du verre à cette température, conduisant à la formation d'une couche de produit autour des grains qui ralentirait ou empêcherait toute réaction ultérieure [Verbeck et Helmuth, 1968].

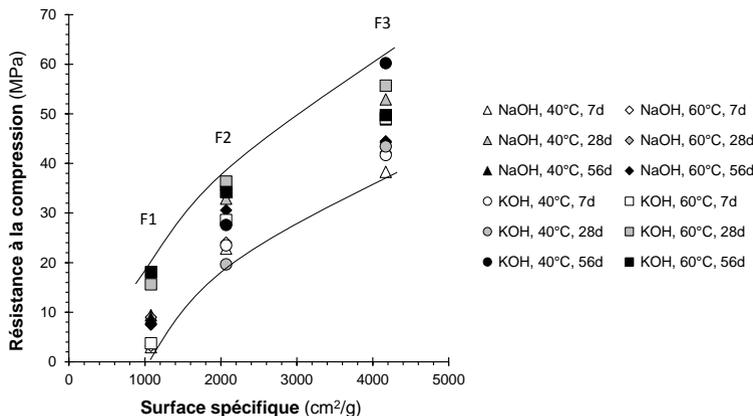


FIGURE 5. Effet de la finesse des particules de verre (F1, F2, F3) sur les résistances à la compression des mortiers-alcali-activés. Solutions alcalines 5 M NaOH ou KOH – conservation à 40 ou 60°C – 100%HR pendant 7 jours puis à 20°C. [Cyr et al., 2012]

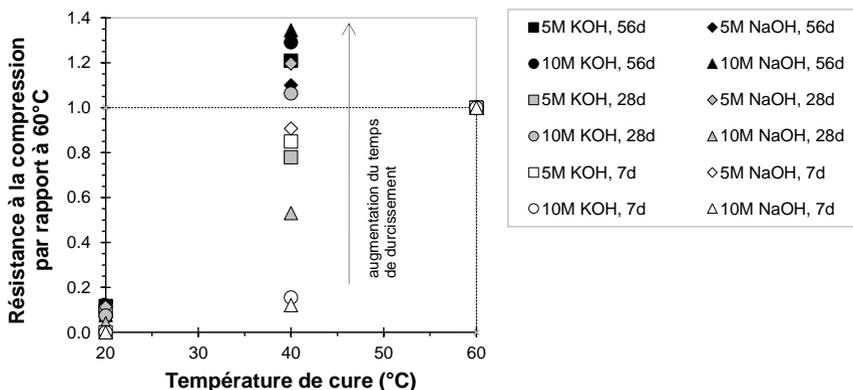


FIGURE 6. Effet de la température de cure sur les résistances à la compression des mortiers-alcali-activés. Solutions 5 M NaOH ou KOH – fines de verre F1, F2, F3 – conservation à 40 ou 60°C – 100%HR pendant 7 jours puis à 20°C. [Cyr et al., 2012]

Sur la **Figure 7**, on peut voir que la résistance à la compression n’est pas proportionnelle à la concentration de KOH, puisqu’une concentration optimale a été obtenue à 3 mol/l. Lorsque la concentration dépasse cette valeur, la résistance à la compression diminue. Ce constat est le même pour les trois verres recyclés. Cet effet optimal avait déjà été mis en évidence par d’autres auteurs. Par exemple, Wang et al., [2005] ont montré que les métakaolins alcali-activés avaient une plus grande résistance à la compression à une concentration de 10 M de NaOH. L’optimum pour les cendres volantes a été déterminé comme étant de 12 M pour Palomoa et al., [1999] et 14 M de NaOH pour Phair et Van Deventer [2002]. On peut constater également sur cette même figure que le comportement des trois types de verre étudié est pratiquement le même. Ceci n’est pas réellement étonnant car la composition chimique des trois verres était relativement la même.

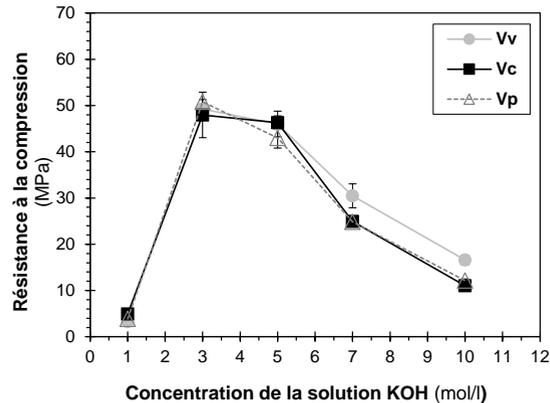


FIGURE 7. Effet de la concentration de l'activant (KOH) sur les résistances à la compression à 7 jours des mortiers-alcali-activés. Fines de verre Vv, Vc, Vp — conservation à 60°C – 100%HR pendant 7 jours. [Idir et al., 2020]

VI. CONCLUSION

Cet article a donné un aperçu des possibilités de valorisation du verre de recyclage dans matériaux cimentaires et alcali-activés. Il a montré les caractères alcali-réactif et pouzzolanique que peut présenter le verre en fonction de la taille des particules. Il a montré également qu'il était possible d'utiliser les fines et les granulats de verre dans une même matrice cimentaire afin de tirer profit du caractère inhibiteur de la réaction alcali-silice des fines de verre. Le broyage excessif du verre n'est pas nécessaire (mais une finesse minimale doit être visée), puisque le taux d'utilisation est le paramètre entraînant le plus d'effet sur la réduction des gonflements. Le travail a également montré qu'il était possible d'utiliser le verre comme précurseur dans les matériaux alcali-activés. Cette utilisation dépend de différents paramètres qui sont : la température de cure, la finesse du verre, le type de l'activant et sa concentration. Ces travaux ont permis de constater la faisabilité d'obtenir à température ambiante des matériaux consolidés à 2 jours moyennant 5% (masse) de ciment. Pour utiliser d'autres activateurs, il était nécessaire d'avoir recours à une activation thermique et que celle-ci n'était pas nécessairement importante, car avec 40° ou 60°C des résistances importantes sont obtenues. Le type d'activant utilisé ainsi que la finesse sont des facteurs essentiels à prendre en compte, alors que la nature de verre l'est moins, car les 3 types de verre sodocalciques étudiés ont mené aux mêmes résistances à la compression.

VII. REFERENCES

- AFNOR EN 197-1 Ciment - Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité, 2001
- AFNOR NF EN 196-1 Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques, 2006
- Byars, E.A, Zhu, H.Y. et Morales, B., Conglasscrete, the Waste and Resources Action Programme, 2004
- Cyr, M., Idir R. & Poinot T. Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet, Journal of Materials Science, 47 (6) (2012), 2782-2797

- Idir, R., Cyr M. & 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. & 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, 19-29
- Idir, R., Cyr M. & Tagnit-Hamou A. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars, *Construction and Building Materials*, vol.24, n°7, July 2010, 1309–1312
- Idir, R., Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali silice et la réaction pouzzolanique, *Thèse de doctorat*, INSA-Toulouse (France), 2009, 71-76
- Lemesre., L., Formulation et caractérisation de composites bas carbone à base de poudre de verre alcali-activée, *thèse de doctorat de l'Université Toulouse 3 - Paul Sabatier*, 2 juillet 2021
- Larive, C. (1997). Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali réaction et de ses effets mécaniques. Rapport issu de la thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées, 6 juin.
- Martinez-Lopez, R. & Ivan Escalante-Garcia, J. Alkali activated composite binders of waste silica soda lime glass and blast furnace slag: Strength as a function of the composition. *Constr. Build. Mater.* 119, 119–129 (2016).
- Meyer, C., Baxter, S., Jin, W. Alkali-silica reaction in concrete with waste glass as aggregate, *Mater for a New Millennium*, Proc ASCE Mater Eng Conf, Washington, 1996, 1388–1394
- Moisson, M., Contribution à la maîtrise de la réaction alcali-silice par ajout de fines de granulats réactifs dans le béton, *Thèse de doctorat*, INSA ; Toulouse, 2005
- NF P18-454. Béton - Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction - Essai de performance. December 2004
- Palomo, A. Grutzeck, M.W. Blanco M.T., Alkali-activated fly ashes: a cement for the future, *Cement and Concrete Research* 29 (1999) 1323–1329.
- Park, S.B., *Civil Engineering Material Science*, Munundang Publisher, Seoul, 2001, 109– 251
- Phair, J.W., & Van Deventer J.S.J., Effect of the silicate activator pH on the microstructural characteristics of waste-based geopolymers, *Int. J. Miner. Process.* 66 (2002) 121–143.
- Shayan, A. & Xu, A., Value-added utilization of waste glass in concrete, *Cement and Concrete Research*, 1 (2004), 34, 81-9
- Torres-Carrasco, M. & Puertas, F. (2017) Waste glass as a precursor in alkaline activation: Chemical process and hydration products. *Constr and Building Materials.* 139, 342–354.
- Verbeck, G. J, Helmuth RH (1968) Structures and physical properties of cement paste. *Proceedings of 5th Intern symp chemistry of cement*, vol 3. Cement Association of Japan, Tokyo, 1–31
- Wang H., Li H., Yan F., Synthesis and mechanical properties of metakaolinite based geopolymer, *Colloids Surf., A* 268 (2005) 1–6
- Yamada, K. et Ishiyama, S., Maximum dosage of glass cullet as fine aggregate in mortar", dans Dhir, R.K. Newlands, Dyer, T.D. (2005) *Achieving Sustainability in Construction*, Proc Intern Conf Held at the University of Dundee, Scotland, UK on 5-7 July 2005

