

21^e édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Polytechnique Montréal, Montréal, Canada
5 et 6 juillet 2023

STABILITÉ CHIMIQUE DE LA POUDRE DE VERRE DANS UNE SOLUTION POREUSE SYNTHÉTIQUE DE BÉTON ADAPTÉE DE LA MÉTHODE R³

Wena de Nazaré do Rosario Martel¹, Josée Duchesne¹ et Benoît Fournier¹

¹ Département de géologie et génie géologique, Université Laval, Québec QC G1V 0A6, Canada

RÉSUMÉ : La poudre de verre (PV) est généralement classée comme un ajout cimentaire hautement alcalin par sa composition riche en chaux sodée. Dans les matrices cimentaires, la solution poreuse alcaline déclenche la libération des alcalins du verre, induisant potentiellement une réaction alcali-silice (RAS). La stabilité chimique de la PV est déterminée par l'équilibre thermodynamique de la solution poreuse. Dans ce contexte, cette étude a analysé la dissolution des éléments critiques dans une solution synthétique R³ alcaline, en considérant le temps de réaction, la taille des particules et le rapport liant/solution. Malgré l'atteinte de l'équilibre chimique à l'état initial d'hydratation, le C-S-H produit reste instable en raison de la lixiviation/absorption dynamique des alcalins dans sa structure. L'étude a montré que l'augmentation du rapport L/S et la diminution de la taille des particules favorisent la précipitation des hydrates et réduisent la concentration en alcalins de la solution, qui sont également liés à la présence de calcium dans la solution

1. INTRODUCTION

Au fil des ans, la quantité de déchets de verre a augmenté de manière significative. Selon les estimations des Nations Unies, environ 200 millions de tonnes de verre sont déversées annuellement sur la planète (Mirzahosseini & Riding, 2015; Mohammadyan-Yasouj & Ghaderi, 2020). Au Québec, en 2020, plus de 70 % des déchets de verre récupérés sont encore destinés à d'autres fins que le recyclage (Recyc-Québec & Gouvernement du Québec, 2021). Parallèlement, la production mondiale de ciment a augmenté d'environ 43 % au cours de la dernière décennie (Global Cement Directory 2021). La réduction de la teneur en clinker dans les ciments mélangés est l'un des moyens les plus pertinents de réduire l'empreinte carbone de la production de ciment. Par conséquent, la poudre de verre (PV) émerge comme un des matériaux pouzzolaniques capables de remplacer partiellement les matériaux cimentaires traditionnels tels que le clinker, offrant ainsi une solution pour ces deux problèmes environnementaux majeurs (Jiang et al., 2019; Naaamandadin et al., 2020; Omran & Tagnit-Hamou, 2016; Shao et al., 2000). Malgré les améliorations des propriétés mécaniques du béton grâce à l'incorporation de la PV, certaines études ont souligné les défis majeurs liés à sa durabilité (Hendi et al., 2019; Islam et al., 2017; Ke et al., 2018; Nassar & Soroushian, 2012; Taha & Nounu, 2008a; Vaitkevicius et al., 2014; Wang et al., 2023). Bien que la PV post-consommation contienne environ 70 % de silice amorphe réactive, sa concentration élevée en alcalins peut potentiellement engendrer la réaction alcalis-silice (RAS), en fonction de son potentiel de lixiviation alcaline et de sa stabilité chimique en présence de granulats réactifs (Jiang et al., 2019; Naaamandadin et al., 2020; Omran & Tagnit-Hamou, 2016; Tohoué Tognonvi et al., 2018). La RAS et les réactions pouzzolaniques impliquent les mêmes composés (silice, alcalins et hydroxydes) et produisent des gels silico-alcalins (Idir et

al., 2011; Shayan & Xu, 2006; Taha & Nounu, 2008b). Le gel C-S-H produit lors des réactions pouzzolaniques possède des propriétés structurales, tandis que le gel de silice formé par la RAS fissure l'intérieur du béton et affecte sa rigidité, sa résistance et sa durabilité (Zheng, 2016). Divers aspects tels que la distribution de la taille des particules, niveau de polymérisation du réseau silicieux du verre, bien que leur composition chimique influencent la cinétique des réactions et, par conséquent, la probabilité de développement de la RAS (Schöler et al., 2017). Une des alternatives plus fréquemment adoptées pour contourner ce problème est la réduction de la taille des particules de la PV, pour augmenter la surface spécifique et ainsi, sa réactivité pouzzolanique. Dans ce contexte, Il n'est toujours pas clair quel type de réaction prévaut en raison de la complexité qu'il y a à isoler la dissolution des alcalis et de la silice de la PV dans une matrice cimentaire, sans l'interférence des phases hydratées du ciment Portland.

Comprendre la stabilité chimique de la PV au sein d'une matrice cimentaire est crucial pour évaluer l'utilisation potentielle du verre recyclé dans la production de bétons durables fabriqués avec des ajouts cimentaires alternatifs. Pour cette fin, l'objet de cette étude est l'analyse des mécanismes de dissolution de la PV dans une solution synthétique mimant la solution interstitielle du béton conçue selon la méthode R³ (SR³). Le programme expérimental a été élaboré afin d'identifier les espèces chimiques dissoutes qui réagiront avec la portlandite Ca(OH)₂, pour simuler simultanément les réactions d'hydratation du ciment et les réactions pouzzolaniques. Tout en tenant compte des paramètres tels que le temps de contact, la taille des particules et le rapport massique liant/solution (L/S). La composition chimique du lixiviat a été quantifiée pour comprendre l'évolution de la libération des éléments clés majeurs tels que le sodium, le calcium et le silicium, en solution.

2. MATÉRIAUX

Deux poudres de verre de différentes granulométries et compositions chimiques ont été analysées dans cette étude, PV₁ et PV₂. Elles proviennent d'une installation de recyclage située dans la province de Québec (Canada). Le premier type de poudre de verre (PV₁) a été incorporé dans tous les tests comme pouzzolane de référence. La composition chimique des deux PV utilisées a été obtenue par fusion des principaux éléments, suivie d'analyses par ICP-OES. Les caractéristiques physiques ont été évaluées à l'aide de la granulométrie laser (Malvern 2000 *particle size analyzer*). Les résultats sont présentés dans le Tableau 1. Concernant la SR³ et les réactants, l'hydroxyde de potassium (KOH) d'une pureté ≥ 85,0%, du sulfate de potassium (K₂SO₄) d'une pureté de 99,43%, ainsi que de la calcite purifiée (CaCO₃) en association avec de la portlandite (Ca(OH)₂ ou CH) ont été fournis par le laboratoire MAT, situé à Québec (Canada).

Tableau 1. Propriétés chimiques et physiques des poudres de verre utilisées.

wt %	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O _{eq}	TiO ₂	Blaine m ² /g	D ₀ μM
PV ₁	68,98	10,88	2,09	0,46	1,09	0,02	12,49	0,66	12,92	0,06	1,23	19,95
PV ₂	71,46	10,62	1,86	0,30	1,19	0,02	13,34	0,65	13,77	0,05	1,74	10,00

3. MÉTHODES

3.1 Solution poreuse synthétique R³ (SR³).

Dans le but de simuler l'environnement réactionnel de la PV dans une matrice cimentaire réelle, la formulation SR³ est basée sur la composition de la pâte conçue pour les tests de la méthode R³. Cette méthode a été élaborée par Avet et al. (2016) et validée par le comité RILEM TC 267-TRM et le rapport technique de Snellings et al. (2019) (Li et al., 2018; Snellings et al., 2019), et regroupe un ensemble de techniques adaptées pour mesurer la réactivité pouzzolanique des argiles calcinées dans une pâte synthétique identique à une pâte cimentaire ordinaire sans l'ajout des phases de clinker. Dans le cadre de la conception du mélange optimal, différentes combinaisons de rapports de masse ont été étudiées pour

les alcalins et les sulfates (KOH et K_2SO_4), en fonction de la quantité de pouzzolane utilisée. Par ailleurs, afin d'évaluer l'influence du rapport entre les quantités de CH et de calcaire et la quantité de pouzzolane, cinq rapports de masse distincts CH+Calcite/pouzzolane ont été testés. En conséquence, une pâte idéale a été obtenue où la concentration molaire de la phase liquide a été fixée à 0,071 M KOH et 0,114 M K_2SO_4 et où les solides sont ajoutés dans des proportions de 11,11 g de pouzzolane, 33,33 g de CH et 5,56 g de $CaCO_3$, ce qui entraîne un rapport L/S de 0,83.

Dans cette étude, afin de garantir une suspension continue de la phase solide, le rapport entre la solution et le liant a été ajusté de manière que la fluidité de la solution n'entrave pas la diffusion ionique. Ainsi, les deux types de poudre de verre, PV_1 et PV_2 , ont été incorporés, avec les liants (CH et $CaCO_3$), dans la SR^3 . La composition de la solution a été fixée pour la production des échantillons et est la suivante : 0.47 g de KOH et 2.34 g de K_2SO_4 et 117.2 g d'eau déminéralisée (pH moyen de la solution est d'environ 13.3). Les phases solides ont été ajoutées selon des proportions spécifiques, variant selon trois ratios massiques L/S : 2.5%, 5% et 15%, tel qu'indiqué dans le Tableau 2. Par ailleurs, pour comprendre le mécanisme de dissolution du verre isolé dans un milieu alcalin, la libération des ions sodium et silicium issus de la PV_1 a été étudiée dans la solution SR^3 .

Tableau 2. Composition de la phase solide pour les essais de dissolution.

Échantillons	Rapport L/S	$Ca(OH)_2$ (g)	$CaCO_3$ (g)	PV^* (g)
$PV_{(1,2)}-SR^3CH-2.5\%$	2.5%	2	0.33	0.67
$PV_{(1,2)}.SR^3CH-5\%$	5%	4	0.67	1.33
$PV_{(1,2)}.SR^3CH-15\%$	15%	12	2	4
$PV.SR^3-2.5\%$	2.5%	-	-	3
$PV.SR^3-5\%$	5%	-	-	6
$PV.SR^3-15\%$	15%	-	-	18

*Deux types de PV ont été étudiés pour les échantillons contenant CH et $CaCO_3$.

3.2 Montage des essais de dissolution.

La configuration expérimentale pour les essais de dissolution implique un bain thermique maintenu à $40 \pm 1^\circ C$ ainsi qu'un agitateur mécanique cylindrique qui permet aux échantillons de tourner en continu, de sorte que la phase solide reste en suspension en permanence (Figure 1). Par la suite, les échantillons ont été filtrés et dilués en utilisant de l'acide nitrique à une concentration de 5 % en volume et conservés à une température de $4^\circ C$ jusqu'à la veille des analyses. À ce moment, les échantillons sont conservés à température ambiante pour stabiliser la température et le pH. Les concentrations élémentaires de calcium et de sodium ont été déterminées par le biais de spectromètres d'émission atomique à plasma micro-ondes (MP-AES), tandis que le silicium a été quantifié par spectrophotométrie avec une solution à base de molybdate d'ammonium.

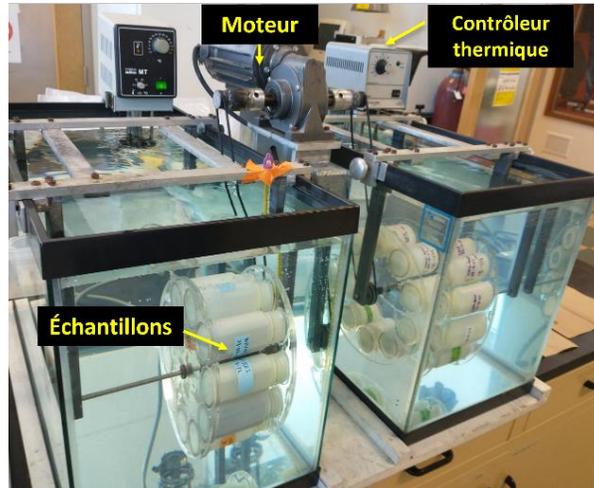


Figure 1. Montage de l'agitateur mécanique immergé dans un bain thermostatique à 40°C.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Effet de la taille des particules sur la dissolution des ions Na et Ca.

En contact avec une solution alcaline à pH élevé, saturée en CH, les particules de PV réagiront et se dissoudront pour précipiter le silicate de calcium hydraté, C-S-H, tout en entraînant la lixiviation des ions alcalins. La Figure 1 met en évidence l'effet de la taille des particules de (i.e. PV₁ vs PV₂) sur la variation des concentrations de calcium et de sodium au fil du temps, exprimées en mmol/L, en fonction de différents rapports L/S.

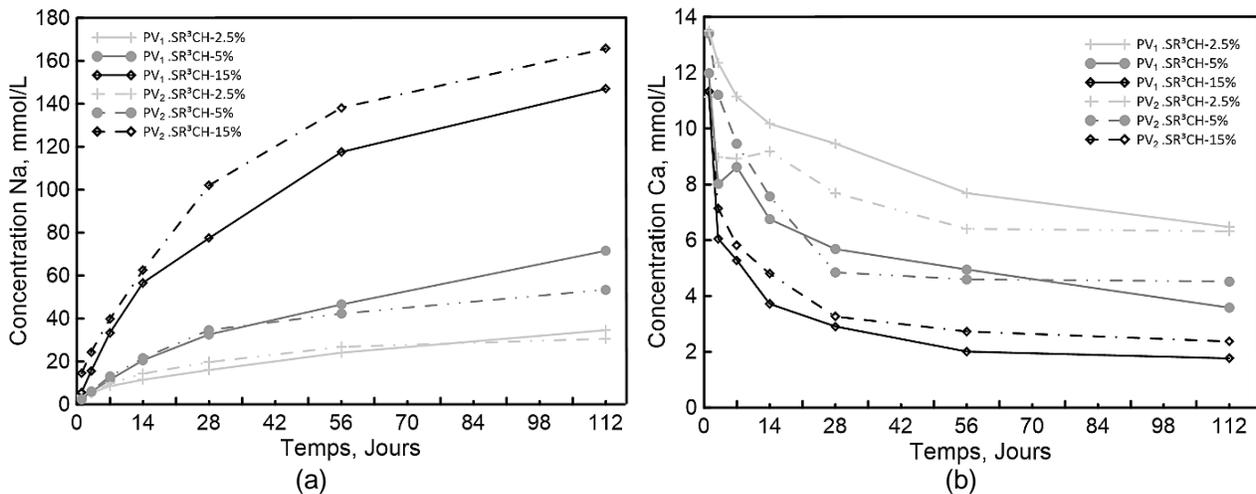


Figure 1. Évolution de la concentration du lixiviat en solution en fonction de la finesse des particules de PV pour différents rapports L/S dans le temps : a) sodium; b) calcium.

Les profils de concentration du sodium et du calcium révèlent une faible corrélation avec les rapports L/S, suggérant l'influence d'un contrôle minéralogique sur le système. De plus, l'effet de la variation des rapports L/S est plus évidente pour la libération du sodium, ce qui peut être attribué à sa présence plus abondante en solution. En chimie du ciment, malgré la concentration réduite des ions alcalins dans les anhydres, il est

bien établi que la solution poreuse du béton est principalement constituée de ces ions en raison de leur mobilité ionique élevée, favorisant ainsi leur diffusion.

En général, la concentration de calcium diminue avec le temps pour les échantillons PV₁ et PV₂ en raison de la précipitation des hydrates tels que le C-S-H, le CH et le gypse. Le taux de précipitation est plus élevé dans les 28 premiers jours suivi par un ralentissement des précipitations, ce qui se traduit par une concentration de calcium relativement constante à long terme, indiquant l'atteinte de l'équilibre thermodynamique. Par ailleurs, en raison de sa plus grande surface spécifique, PV₂ semble atteindre l'équilibre plus rapidement que PV₁. De plus, bien que les deux types de PV présentent un comportement très similaire, on observe que dans les échantillons moins concentrés, la précipitation du calcium est de 18% plus élevée pour PV₂.SR³CH-2.5%. Cette tendance ne se manifeste pas dans le cas des échantillons avec un rapport L/S de 15%, ce qui souligne l'existence d'autres facteurs capables de moduler la cinétique des réactions, tels que la saturation de la solution en ions calcium, ce qui limite leur diffusion où la formation d'amas des particules plus fines, ce qui entrave leur dissolution.

En ce qui concerne la libération du sodium, durant les premiers jours d'hydratation, les deux types de PV montrent un comportement similaire pour tous les rapports L/S. Cependant, les échantillons contenant PV₂ présentent une vitesse de dissolution plus élevée, ce qui entraîne une atteinte plus rapide de l'état d'équilibre pour PV₂.SR³CH-2.5% et PV₂.SR³CH-5%. À un rapport L/S de 15%, la quantité de sodium libérée dans la solution est considérablement plus élevée pour la PV₂ à partir du 14e jour. Ce comportement est corroboré par Reardon (1992), qui explique que contrairement au calcium, les ions alcalins sont fortement influencés par les rapports solide/solution. Un autre facteur à considérer est la composition chimique des deux PV, où la PV₂ présente une teneur en Na₂O supérieure de 7% par rapport à la PV₁.

4.2 Évolution et cinétique de la mise en solution du Na et de la Si de la PV₁ en solution SR³.

La stabilité thermodynamique des phases siliceuses en solution alcaline, comme la PV, est gouvernée par l'équilibre entre la capacité des solides à maintenir une énergie constante et celle de la solution à libérer son énergie en liant ses ions excédentaires aux chaînes de silice. En d'autres termes, cela dépend du degré de polymérisation de la silice, ainsi que de la présence des ions OH⁻, Na⁺, K⁺ et Ca²⁺ dans la solution (Chappex & Scrivener, 2013). De plus, l'évolution du relargage du sodium de la PV est d'un grand intérêt pour mieux comprendre son comportement face à la RAS. Ainsi, la Figure 2 illustre la variation de la concentration chimique en silicium et en sodium du lixiviat en fonction du temps de contact entre la PV₁ et la solution SR³. Il est pertinent de mentionner que la concentration en calcium a également été surveillée; cependant, ces valeurs sont de l'ordre des traces, inférieures à 0.02% du total des solides dissous.

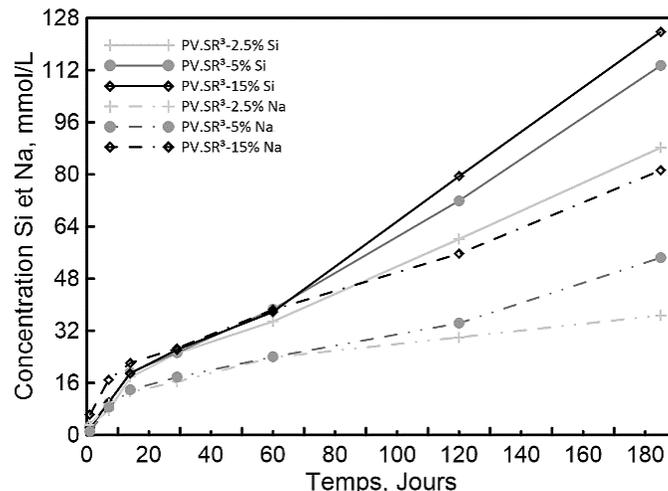


Figure 2. Libération des ions sodium et silicium provenant de la dissolution de la PV₁ dans la solution SR³.

Dans les premiers 14 jours, on observe une libération accélérée de la silice dans la solution, probablement due à la dissolution de particules de verre où la silice est facilement accessible, notamment les particules plus fines, également appelées "silice soluble". Cette dissolution conduit à la libération de molécules de silanols chargées négativement, qui contribuent à la diminution du pH de la solution (Hong & Glasser, 2002; L'Hôpital et al., 2016; Multon et al., 2008). On remarque ensuite, de 14 à 56 jours, un changement de pente dans la courbe de concentration, suggérant un ralentissement de la libération des ions Si. Cet effet est probablement aussi lié à la formation de petits amas de particules de verre anhydre enveloppées dans des composés aqueux hydratés, ce qui rend plus difficile l'hydratation des particules situées au centre des amas. Ce phénomène a également été observé lors des études de Goetschius et al. (2018) et Hou et al. (2004). Durant cet intervalle, il est également possible de déduire que les différents rapports L/S ont peu d'influence sur le taux de dissolution. Cela indique que la silice relarguée jusqu'à ce stade est la silice libre en suspension dans la solution. Après 56 jours, on remarque que l'équilibre dynamique de la solution change, entraînant l'hydratation des molécules de silice piégées dans les amas. Cela est clairement observable dans les courbes de concentration des échantillons PV.SR³-5% et PV.SR³-15%, qui présentent un taux de dissolution plus élevé que par le PV.SR³-2.5%. Selon la littérature, ce changement dans l'équilibre peut être dû à l'augmentation de la concentration en OH⁻ causée par la libération continue des ions Na⁺ en solution, ce qui favorise la dissolution de la silice (Bagheri et al., 2022; Dove et al., 2008; Vollpracht et al., 2016).

La libération des ions sodium, contrairement à celle du silicium, semble atteindre une limite de réaction pour l'échantillon le moins saturé, PV.SR³-2.5%, vu que la tendance de la courbe montre des signes de plafonnement. Ce phénomène peut être attribué au pourcentage de dissolution de la PV, qui est fortement influencé par le rapport L/S. La Figure 3 présente un histogramme illustrant l'évolution du taux de libération du sodium au fil du temps pour différents rapports L/S. On observe une augmentation progressive du pourcentage de sodium libéré sans signes de stabilisation. À 180 jours, PV1.SR³-2,5% libère jusqu'à 35% de Na dans la solution, tandis que PV1.SR³-15% n'en libère que 14%, soit un taux de libération d'environ 2,5 fois plus élevé lorsque le rapport L/S est réduit. Cela met en évidence une plus grande mobilité des ions sodium dans les solutions moins saturées. Un comportement semblable a été rapporté par Tohoué Tognonvi et al. (2018) et Okhrimenko et al. (2022) qui ont étudié la dissolution de la PV en milieu aqueux.

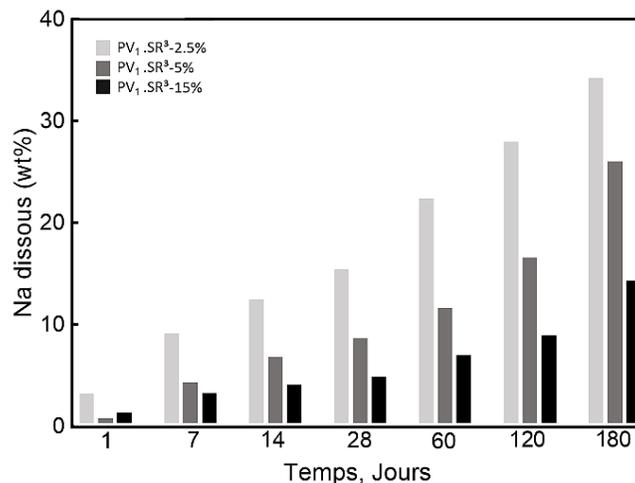


Figure 3. Évolution du pourcentage de libération du sodium en fonction du rapport L/S.

4.3 Influence de la présence de CH et de Calcite dans la dissolution des ions Ca et Na.

La Figure 4 montre les données normalisées de libération de sodium, où les concentrations d'ions en solution sont divisées par les masses respectives de la PV₁ pour chaque rapport L/S.

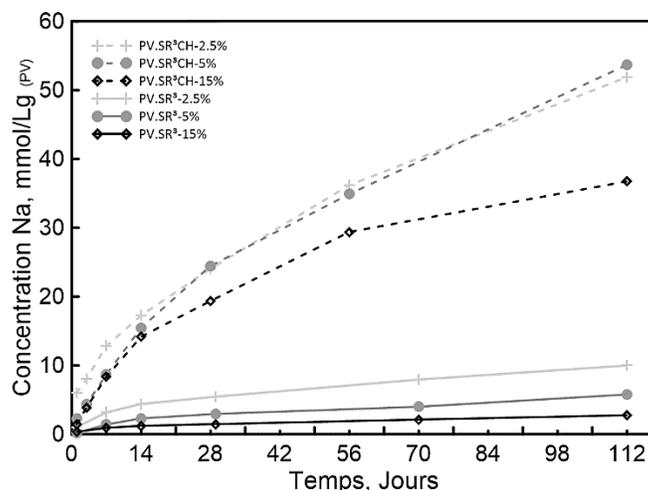


Figure 4. Courbe de l'évolution de la concentration de sodium normalisée par gramme de PV.

Les données montrent que lorsque la concentration de sodium est normalisée par gramme de PV, tout comme illustré à la Figure 3, la libération du sodium est plus importante dans les solutions moins saturées, ce qui met en évidence le contrôle minéralogique.

Les courbes de concentrations montrent que la libération du sodium est étroitement liée à la présence des ions calcium en solution, ce comportement a été rapporté précédemment dans la littérature (Goetschius et al., 2018; Hou et al., 2004; L'Hôpital et al., 2016). La cinétique des réactions d'hydratation indique un ordre de dissolution ionique lié à l'évolution des compositions des phases hydratées, qui se catégorise fondamentalement comme une réaction pouzzolanique, où un gel C-S-H dépolymérisé se forme, jusqu'à ce que la consommation complète des ions Ca se produise. Cela permet aux ions alcalins d'être finalement adsorbés dans les chaînes du gel C-S-H, ce qui peut être observé dans le cas du PV.SR³CH-15%, où l'on constate un ralentissement de la libération de Na après 56 jours. Ce phénomène peut être expliqué par la différence de densité de charge entre ces ions. En effet, les ions calcium ont une densité de charge plus élevée que les ions alcalins, ce qui leur permet de former des attractions électrostatiques plus fortes avec les sites chargés négativement présents dans les structures siliceuses du gel C-S-H. Par conséquent, la concentration de calcium dans la solution poreuse joue un rôle important en permettant la libération des ions Na issus de la PV qui peuvent ensuite attaquer la silice réactive au sein des granulats réactifs et entraîner la formation du gel RAS dans le béton.

5. CONCLUSION

Cette étude a porté sur la dissolution isolée de la poudre de verre dans un environnement similaire à une solution poreuse de béton simplifiée afin d'évaluer sa cinétique d'hydratation et relargage des ions alcalins. Les données indiquent que la surface spécifique plus élevée de la PV₂ a accéléré la libération du sodium ainsi que la précipitation des hydrates pour les échantillons avec un rapport L/S jusqu'à 5%. Cependant, lorsqu'il s'agit d'un rapport L/S de 15%, une tendance opposée est observée, car une réduction de la concentration en calcium est légèrement plus évidente pour les échantillons qui contiennent la PV₁. Cela pourrait être dû à des obstacles physiques à la diffusion du calcium, tels que la formation d'amas dans les solutions plus saturées.

En général, la PV présente une capacité élevée à libérer des espèces silicium et sodium qui peut être influencée fortement par le niveau de saturation de la solution et la présence des ions calcium. Lors de l'analyse de la dissolution de la PV dans une solution SR³ pure, sans CH et calcaire, la concentration de sodium semble atteindre un équilibre pour les échantillons avec un rapport L/S de 2,5%, ce qui n'est pas le cas pour la libération de silicium, soulignant qu'en l'absence de CH, la libération du Na semble atteindre une limite de réaction. Cela est due à l'adsorption de ces ions dans le réseau de silice pour former des

complexes de silicate de sodium. Cette hypothèse est étayée lors de la comparaison des taux de Na libéré de la PV₁ entre une solution à un rapport L/S de 15% et une à un rapport L/S de 2.5%. Dans ce scénario, au lieu de Na, les ions Ca se combinent à l'acide silicique en solution pour précipiter le C-S-H, favorisant la forte concentration du sodium en solution.

6. REFERENCES

- Avet, F., Snellings, R., Alujas Diaz, A., Ben Haha, M., & Scrivener, K. (2016). Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cement and Concrete Research*, 85, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.015>
- Bagheri, M., Lothenbach, B., & Scrivener, K. (2022). The effect of paste composition, aggregate mineralogy and temperature on the pore solution composition and the extent of ASR expansion. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 55(7). <https://doi.org/10.1617/s11527-022-02015-6>
- Dove, P. M., Han, N., Wallace, A. F., & De Yoreo, J. J. (2008). Kinetics of amorphous silica dissolution and the paradox of the silica polymorphs. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(29), 9903–9908. <https://doi.org/10.1073/pnas.0803798105>
- Goetschius, K. L., Beuerlein, M. A., Bischoff, C. M., & Brow, R. K. (2018). Dissolution behavior of ternary alkali-alkaline earth-borate glasses in water. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 487, 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.02.011>
- Hendi, A., Mostofinejad, D., Sedaghatdoost, A., Zohrabi, M., Naeimi, N., & Tavakolinia, A. (2019). Mix design of the green self-consolidating concrete: Incorporating the waste glass powder. *Construction and Building Materials*, 199, 369–384. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.020>
- Hong, S. Y., & Glasser, F. P. (2002). Alkali sorption by C-S-H and C-A-S-H gels: Part II. Role of alumina. *Cement and Concrete Research*, 32(7), 1101–1111. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00753-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00753-6)
- Hou, X., Struble, L. J., & Kirkpatrick, R. J. (2004). Formation of ASR gel and the roles of C-S-H and portlandite. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1683–1696. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.03.026>
- Idir, R., Cyr, M., & Tagnit-Hamou, A. (2011). Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.013>
- Islam, G. M. S., Rahman, M. H., & Kazi, N. (2017). Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(1), 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.10.005>
- Jiang, Y., Ling, T., Hung, K., & Shi, C. (2019). A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products. *Journal of Environmental Management*, 242(November 2018), 440–449. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.098>
- Ke, G., Li, W., Li, R., Li, Y., & Wang, G. (2018). Mitigation Effect of Waste Glass Powders on Alkali – Silica Reaction (ASR) Expansion in Cementitious Composite. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(67), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0299-7>
- L'Hôpital, E., Lothenbach, B., Kulik, D. A., & Scrivener, K. (2016). Influence of calcium to silica ratio on aluminium uptake in calcium silicate hydrate. *Cement and Concrete Research*, 85, 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.01.014>
- L'Hôpital, E., Lothenbach, B., Scrivener, K., & Kulik, D. A. (2016). Alkali uptake in calcium alumina silicate hydrate (C-A-S-H). *Cement and Concrete Research*, 85, 122–136. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.03.009>
- Li, X., Snellings, R., Antoni, M., Alderete, N. M., Ben Haha, M., Bishnoi, S., Cizer, Ö., Cyr, M., De Weerd, K., Dhandapani, Y., Duchesne, J., Haufe, J., Hooton, D., Juenger, M., Kamali-Bernard, S., Kramar, S., Marroccoli, M., Joseph, A. M., Parashar, A., ... Scrivener, K. L. (2018). Reactivity tests for supplementary cementitious materials: RILEM TC 267-TRM phase 1. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 51(6). <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1269-x>
- Mirzahosseini, M., & Riding, K. A. (2015). Effect of Combined Glass Particles on Hydration in Cementitious Systems. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(6), 04014190. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001151](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001151)

- Mohammadyan-Yasouj, S. E., & Ghaderi, A. (2020). Experimental investigation of waste glass powder, basalt fibre, and carbon nanotube on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 252, 119115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119115>
- Multon, S., Cyr, M., Sellier, A., Leklou, N., & Petit, L. (2008). Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion. *Cement and Concrete Research*, 38(3), 350–359. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.013>
- Naaamandadin, N. A., Abdul Aziz, I. S., Mustafa, W. A., & Santiago, R. (2020). Mechanical properties of the utilisation glass powder as partial replacement of cement in concrete. *Lecture Notes in Mechanical Engineering, October 2019*, 221–229. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9539-0_23
- Nassar, R. U. D., & Soroushian, P. (2012). Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. *Construction and Building Materials*, 29, 368–377. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.061>
- Okhrimenko, D. V., Barly, S. H. Q., Jensen, M., Lakshtanov, L. Z., Johansson, D. B., Solvang, M., Yue, Y. Z., & Stipp, S. L. S. (2022). Surface evolution of aluminosilicate glass fibers during dissolution: Influence of pH, solid-to-solution ratio and organic treatment. *Journal of Colloid and Interface Science*, 606, 1983–1997. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.09.148>
- Omran, A., & Tagnit-Hamou, A. (2016). Performance of glass-powder concrete in field applications. *Construction and Building Materials*, 109, 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.006>
- Reardon, E. J. (1992). Problems and approaches to the prediction of the chemical composition in cement/water systems. *Waste Management*, 12(2–3), 221–239. [https://doi.org/10.1016/0956-053X\(92\)90050-S](https://doi.org/10.1016/0956-053X(92)90050-S)
- Recyc-Québec, & Gouvernement du Québec. (n.d.). *Rapport annuel Recyc-Québec 2020-2021*.
- Schöler, A., Winnefeld, F., Haha, M. Ben, & Lothenbach, B. (2017). The effect of glass composition on the reactivity of synthetic glasses. *Journal of the American Ceramic Society*, 100(6), 2553–2567. <https://doi.org/10.1111/jace.14759>
- Shao, Y., Lefort, T., Moras, S., & Rodriguez, D. (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, 30, 91–100. <https://doi.org/10.1109/ISFEE.2014.7050543>
- Shayan, A., & Xu, A. (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete : A field trial on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*, 36, 457–468. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.012>
- Snellings, R., Li, X., Avet, F., & Scrivener, K. (2019). Rapid, Robust, and Relevant (R3) reactivity test for supplementary cementitious materials. *ACI Materials Journal*, 116(4), 155–162. <https://doi.org/10.14359/51716719>
- Taha, B., & Nounu, G. (2008a). Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Construction and Building Materials*, 22(5), 713–720. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.019>
- Taha, B., & Nounu, G. (2008b). Using lithium nitrate and pozzolanic glass powder in concrete as ASR suppressors. *Cement and Concrete Composites*, 30(6), 497–505. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.08.010>
- Tohoué Tognonvi, M., Koffi Konan, L., Simplicite Kouassi, S., Bi Irié Gouré Doubi, H., Zidol, A., Harbec, D., & Tagnit-Hamou, A. (2018). Reactivity of Glass Powder in Aqueous Medium. *Advances in Materials*, 7(1), 9. <https://doi.org/10.11648/j.am.20180701.12>
- Vaitkevičius, V., Šerelis, E., & Hilbig, H. (2014). The effect of glass powder on the microstructure of ultra high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 68, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.101>
- Vollpracht, A., Lothenbach, B., Snellings, R., & Haufe, J. (2016). The pore solution of blended cements: a review. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(8), 3341–3367. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0724-1>
- Wang, T., San Nicolas, R., Ngoc Nguyen, T., Kashani, A., & Ngo, T. (2023). Experimental and numerical study of long-term alkali-silica reaction (ASR) expansion in mortar with recycled glass. *Cement and Concrete Composites*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105043>
- Zheng, K. (2016). Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Composites*, 67, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.12.008>