

Substitution du ciment CPA par la poudre de verre dans les mortiers à hautes performances

Bahia Arab^{1,*}, Rachid Mehaddene, Yacine Bouchnab

(1) Laboratoire Géomatériaux, Environnement et Aménagement, Université Mouloud Mammeri, 15000 Tizi Ouzou, Algérie (Département de Génie Civil)

*Auteur correspondant : arabbahia@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Les faibles rapports eau/liant conduisent à diminuer la perméabilité du béton et les ajouts de fines telles que la fumée de silice, l'argile, les laitiers et les cendres contribuent ainsi à l'amélioration de la compacité par leur effet de remplissage granulaire. Dans cette recherche nous avons évalué l'effet de la poudre de verre broyée finement comme ajout cimentaire (Krati et Kansal, 2016), (Zeghichi *et al.*, 2012) sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers à base de ciment sans ajout CEM I (CPA). Le ciment CPA a été substitué par de la poudre (PV) avec les pourcentages de 10 % et 20 % en fixant une fois le rapport E/C (Eau/Ciment) et ensuite le rapport E/L (Eau/Liant) égal à 0,35, l'ensemble des résultats a été comparé avec le mortier de référence sans PV. Les résultats obtenus montrent un comportement bénéfique de la poudre de verre sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité des différents mortiers étudiés.

MOTS-CLÉS : substitution, résistance, ciment CPA, liant, mortier, poudre de verre (PV), compression, flexion

ABSTRACT

Low ratios water/binder reduce the permeability of the concrete. Moreover, the additions of ends contribute to the improvement of the compactness by their effect on the granular filling. In this research we evaluated the effect of finely crushed glass powder as a cementitious addition (Krati and Kansal, 2016), (Zeghichi *et al.*, 2012) on the physico-mechanical properties of cement-based mortars without addition CEM I (CPA). The cement CPA was substituted by glass powder (GP) with the percentages of 10% and 20% by fixing once the ratio W/C (Water / Cement) and then the ratio W/B (Water / Binder) equal to 0.35, the set of results was compared with the reference mortar without GP. The results obtained show a beneficial behavior of the glass powder on the mechanical characteristics and the durability of the various mortars studied.

KEYWORDS: substitution, strength, cement CPA, binder, mortar, glass powder (GP), compressive, flexural

Substitution du ciment CPA par la poudre de verre dans les mortiers à hautes performances

Bahia Arab, Rachid Mehaddene, Yacine Bouchnab

Introduction

Plusieurs travaux de recherche ont été menés dans les années soixante sur les agrégats de verre comme ajouts dans le béton (Limbachiya *et al.*, 2012) (Idir, 2009). Tous ces travaux ont montré que les bétons gonflaient et se fissuraient (Bhandari et Tajne, 2013). Depuis, l'idée a été en partie abandonnée. Ce n'est que depuis une quinzaine d'année que le sujet est redevenu d'actualité. L'utilisation de la poudre de verre à bouteille en remplacement partiel du ciment présente une voie prometteuse pour valoriser et recycler les déchets (Matos et Sousa Coutinho 2012) (Behim et Boucetta, 2014), la poudre de verre (PV) est en général considérée comme étant pouzzolanique (Idir *et al.*, 2010), (Idir *et al.*, 2011) puisqu'elle contient des quantités relativement appréciables de silice. Cette valorisation de la PV dans les bétons présente plusieurs avantages : économiques, écologiques et technologiques (Kamali et Ghahremaninezhad, 2015). En effet, le verre remplace une fraction du ciment qui entre dans la composition du béton, il est donc utilisé comme ajout cimentaire alternatif. Le recyclage du verre dans le béton permet de contribuer au développement durable de ce matériau de construction indispensable. De plus, la poudre de verre (PV) est utilisée telle quelle, sans changement dans sa composition chimique et sans ajout d'additif. Les efforts de recherche ont permis de mettre au point une technologie qui permet d'utiliser le verre broyé grossièrement ou en poudre pour fabriquer un béton plus résistant (Zeghichi *et al.*, 2012), (Topçu et Canbaz, 2004) peu perméable et plus durable (Zidol, 2014).

La valorisation du verre de bouteilles dans les bétons et mortiers (Zidol, 2014) pourrait constituer une alternative intéressante, sur le plan environnemental, en évitant sa mise en décharge. Cependant, sur le plan technique les verres de bouteilles contiennent des quantités importantes d'alcalins pouvant entraîner des effets préjudiciables sur le béton en relation avec les réactions alcali-silice ou alcali-granulats (Idir, 2009).

I - Matériels et méthodes

I.1 - Préparation, analyse et caractérisation des matériaux utilisés

I.1.1- Ciment

Le ciment CPA utilisé est de type CEM I 52,5 sans aucune addition (95 % clincker avec 5 % de gypse), produit par le groupe industriel des ciments de Sour El Ghouzlane (GICA) situé à la wilaya de Bouira (Algérie) et conforme à la norme NF EN 197-1 (NF EN 197-1, 2000) dont le clinker est produit et broyé conjointement avec le gypse par le groupe GICA. Ce ciment est utilisé pour la formulation des mortiers en fixant une fois le rapport E/L (eau/liant) et après le rapport E/C égale à 0,35.

Les constituants de ciment selon la formule de Bogue sont : le C_3S à 60,61 %, le C_2S à 15,36 %, le C_3A à 6,6 %, le C_4AF à 10,61 % et enfin le gypse à 5 %. Vis-à-vis des caractéristiques mécaniques, une résistance à la compression de 56 MPa à 28 j.

Les compositions chimiques et les caractéristiques physiques sont mentionnées dans les tableaux 1 et 2.

I.1.2- Sable

Un sable concassé de roche calcaire et de granulométrie grossière provenant de la région de Sidi Slimane (Algérie), tamisé à une granulométrie inférieure à 2 mm, a été utilisé dans cette étude.

I.1.3- Adjuvant

Le groupe SIKA nous a fourni un super plastifiant haut réducteur d'eau polyvalent pour béton prêts à l'emploi de nouvelle génération, non chloré à base de copolymère acrylique et de dénomination commerciale *Sika VISCOCRETE TEMPO 12* conforme à la norme NF EN 934-2 (NF EN 934-2, 2002)

I.1.4- Poudre de verre

Cette poudre est issue de la récupération de bouteilles en verre. La poudre de verre est obtenue en sélectionnant uniquement les bouteilles de couleurs verte et blanche. Celles-ci sont

Tableau 1. Compositions chimiques du ciment et de la poudre de verre

Oxides (% par masse)	CEM I (CPA)	Poudre de Verre
SiO ₂	21,29	70,50
Al ₂ O ₃	4,72	1,42
Fe ₂ O ₃	3,49	0,10
Ca O	64,68	8,43
Mg O	0,44	4,01
Na ₂ O	0,17	15,28
SO ₃	2,06	0,25
Perte au feu	1,93	0,22

Tableau 2. Caractéristiques physiques du ciment CEM I (CPA)

Paramètres	Valeurs
Consistance Normale (%)	25,8
Début de prise	2h50 min
Fin de prise	5h13 min
Surface spécifique	2530 cm ² /g
Masse volumique	3470 kg/m ³

Tableau 3. Composition massique des mortiers étudiés

Constituants (g)	E/L = 0,35			E/C = 0,35		
	0 %	10 %	20 %	0 %	10 %	20 %
Ciment	450	405	360	450	405	360
Poudre de Verre	0	45	90	0	45	90
Sable	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Eau	157,5	157,5	157,5	157,5	141,7	126
Superplastifiant	7,2	7,2	7,2	7,2	6,48	5,76

nettoyées afin d'éliminer les étiquettes en papier, séchées, concassées et finement broyées (figure 1). La composition chimique et les résultats d'analyse granulométrique par Laser de la poudre de verre sont présentés dans le tableau 1 et la figure 2 qui montrent que plus de 60 % des particules de la poudre de verre utilisée ont un diamètre inférieur à 100 µm. La surface spécifique est de 3600 cm²/g.

1.1.5- Préparation, confection et conservation des mortiers d'études

Les mortiers ont été confectionnés dans un malaxeur normalisé d'une capacité de cinq litres, la séquence de malaxage utilisée est celle prescrite par la norme EN 196-1 (NF EN 196-1, 1995) Les opérations de mise en place des éprouvettes ont été réalisées conformément au mode opératoire décrit par la norme par le laboratoire qualité de la cimenterie GICA (Algérie). Afin de suivre le comportement mécanique et la durabilité des mortiers, nous avons considéré différentes compositions illustrées dans le tableau 3 avec (L : liant = Ciment + PV) ;

- Dosage en PV (0 %, 10 % et 20 %)
- Rapports E/L et E/C fixés à 0,35 (le rapport E/C représente la quantité d'eau utilisée par rapport à la quantité de ciment ou de liant).

Les mortiers sont conservés dans l'eau (20°C ± 2°C) et séchés à l'air libre à l'intérieur du laboratoire 24h avant l'essai

1.2- Méthodes de caractérisation des mélanges CPA + poudre de verre PV

1.2.1- Consistance et délais de prise

Les mesures ont été réalisées en gardant un rapport E/C identique fixé à 0,27 pour les mélanges CPA + poudre de verre. La détermination de la consistance normale et les temps de débuts et fins de prise des différents mélanges ont été étudiés avec un appareil de Vicat (figure 3). Les mélanges sont rapidement introduits dans un moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs, puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat. L'aiguille placée à la surface



Figure 1. Transformation des déchets de verre en poudre de verre

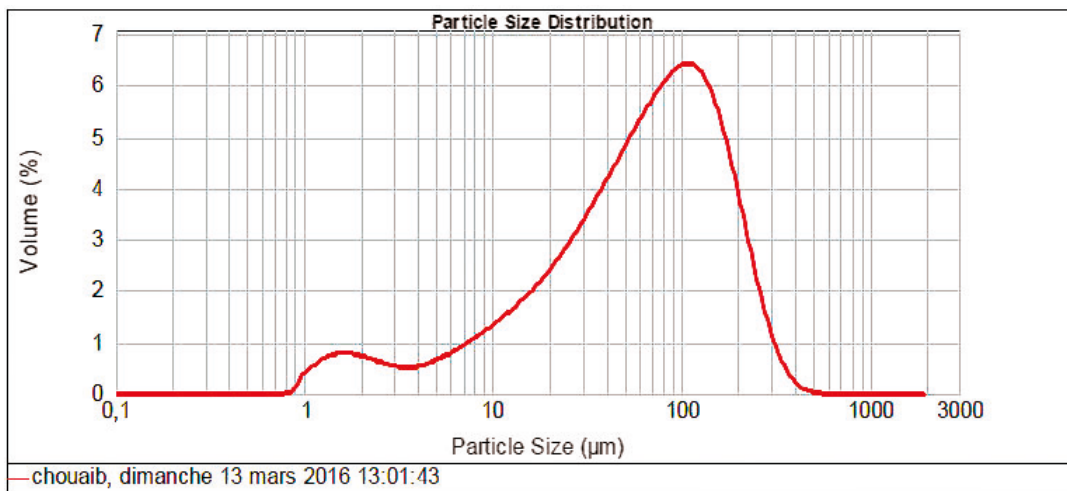


Figure 2. Analyse granulométrique par laser de la poudre de verre

de l'échantillon est relâchée et s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle s'immobilise (ou après 30 seconde d'attente), on relève la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.

Un mélange (ou pâte) est considéré de consistance normale si $d = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$. Si $d > 7\text{mm}$, on considère qu'il n'y a pas assez d'eau et à l'inverse si $d < 5\text{mm}$, on considère qu'il y a excès d'eau.

1.2.2- Tests mécaniques

Des tests mécaniques ont été mis en œuvre selon la norme *EN 196-1* (NF EN 196-1, 1995) pour caractériser les mortiers à différentes échéances :

1- Flexion trois points (3 pts) sur trois éprouvettes de $4 \times 4 \times 16\text{cm}^3$ (figure 4a)

2- Compression pure sur les demi-épreuves issues du test précédent (figure 4b)



Figure 3. Vue de l'appareil de Vicat et des essais réalisés

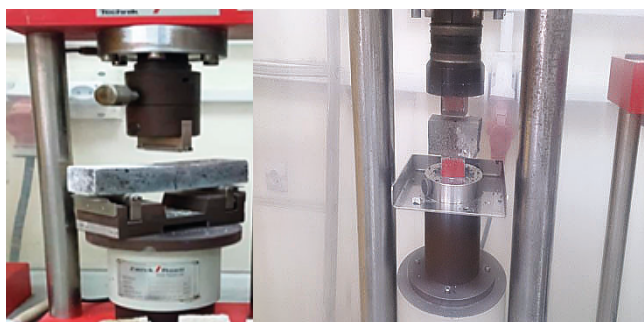


Figure 4. Vues des dispositifs expérimentaux de mesure de flexion 3 points (à gauche) et essai de compression sur les éprouvettes de mortiers 4x4x16 cm³ (à droite)

Selon la norme citée ci-dessus, 3 éprouvettes de 4x4x16 cm³ ont été utilisées à chaque essai de flexion. Les résultats donnés sont les valeurs moyennes obtenues. Chaque éprouvette de 4x4x16 cm³ génère à l'essai de flexion deux cubes 4x4x4 cm³ qui sont utilisés dans les essais de compression.

2- Résultats et discussions

2.1- Effet du dosage en poudre de verre sur l'évolution du temps de prise et la consistance

Les résultats de la figure 5 représentent les temps de début et fin de prise ainsi que la consistance de nos pâtes pour les trois dosages de poudre de verre. Chaque condition expérimentale a été testée en triplicats. Les résultats présentés sont les valeurs moyennes obtenues pour chaque condition dosage en PV testé.

Les résultats de suivi de prise illustrés à la figure 5 montrent que l'ajout de poudre de verre affecte légèrement les temps de prise puisqu'un écart de 30 minutes est enregistré entre la pâte témoin sans PV et celle dont 20 % de ciment ont été remplacés par la poudre de verre.

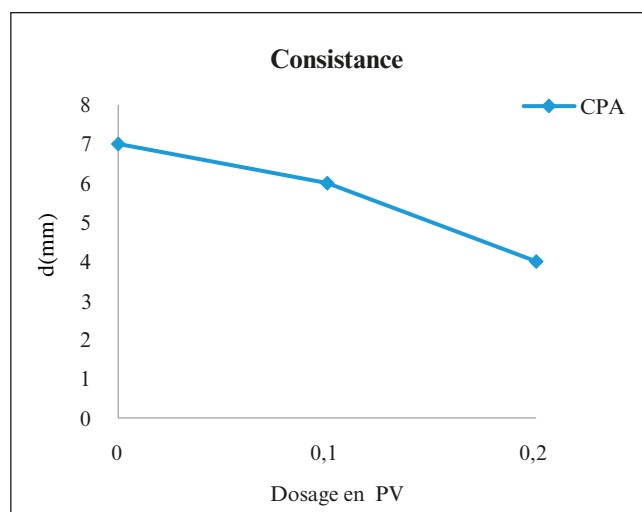
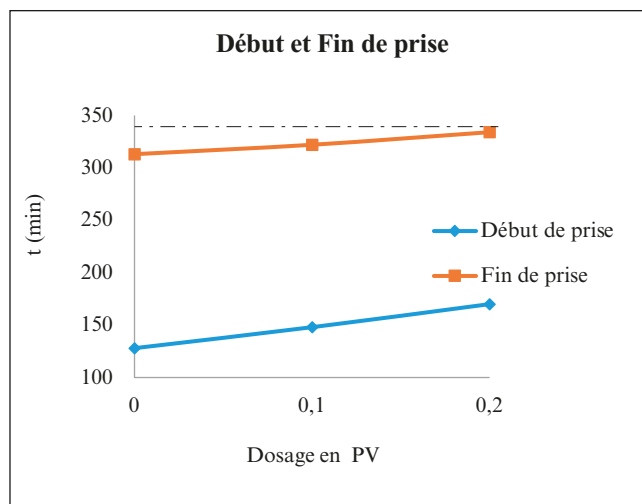


Figure 5. Résultats des mesures de consistance, et de temps de début et fin de prise des mélanges CPA + PV en fonction du % de PV avec un rapport E/V de 0,27

En revanche, on observe que la consistance diminue avec le dosage en poudre de verre substituée au ciment. Cette observation pourrait présenter un intérêt pratique en cas de bétonnage par temps chaud.

2.2- Effet du dosage en poudre de verre sur l'évolution des mortiers dans le temps

L'évolution du comportement mécanique en compression est suivie en fonction du temps pour les différents types de mortier étudiés à base de ciment CPA + PV avec des rapports E/L et E/C fixés à 0,35. Les résultats sont illustrés à la figure 6.

On observe que la résistance mécanique de tous les mortiers augmente puis se stabilise avec l'âge. Il apparaît également que les mortiers à 10 % de PV se distinguent légèrement du mortier incorporant 20 % de PV aux jeunes âges (7 jours) en développant des résistances qui s'approchent de celles du mortier témoin (sans PV) mais qui restent toujours inférieures.

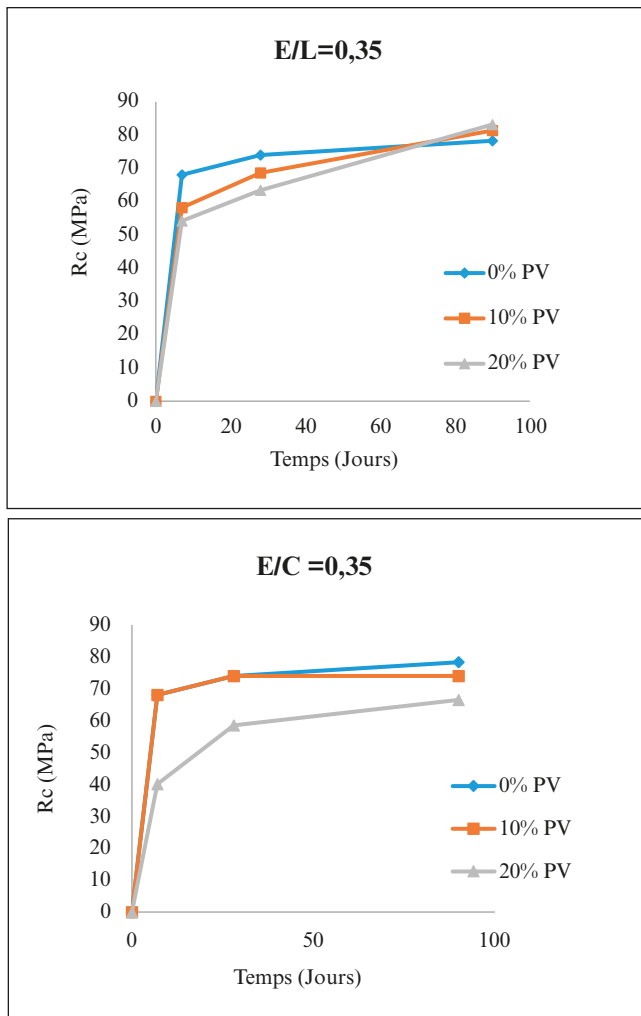


Figure 6. Évolution de la résistance en compression dans le temps en fonction du dosage de la poudre de verre

À 90 jours, les mortiers avec PV développent des résistances à la compression supérieures à celles du mortier témoin et évoluent proportionnellement aux pourcentages de PV. En effet à 90 jours, les mortiers à 10 et 20 % de PV développent un gain de résistance d'environ 5 MPa par rapport au mortier témoin, par exemple la résistance du mortier avec 20 % de PV était de 63,4 MPa à 28 jours et elle a augmenté pour atteindre 83,2 MPa à 90 jours. Ceci peut être attribué à l'activité pouzzolanique qui est lente au jeune âge et qui se développe tardivement. Ce phénomène s'explique par l'interaction entre la silice réactive qui se situe dans la PV et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libéré par l'hydratation du ciment ce qui donne à la PV la propriété de fixer la chaux. La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, ceci mène à une hydratation moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances (Idir, 2009).

2.3- Effet de l'addition de la PV sur les résistances en compression et flexion

Les résultats présentés à la figure 7 indiquent que la résistance à la compression augmente logiquement de 28 à 90 jours pour tous les essais.

On observe en outre que l'addition de PV dégrade la résistance à la compression mesurée à 28 jours, comparativement au mortier témoin sans PV pour l'ensemble des rapports étudiés ($E/L = 0,35$, $E/C = 0,35$).

À 90 jours de prise, la résistance des mortiers avec poudre de verre s'avère cependant légèrement plus élevée que celle du mortier témoin sans PV, et croît avec le dosage en PV (10 et 20 %). Ce phénomène peut être expliqué par la réaction pouzzolanique de la poudre de verre qui se manifeste à long terme (Idir, 2009). Concernant l'effet du rapport E/L , on remarque que la résistance en compression diminue pour le rapport $E/C = 0,35$ par rapport à $E/L = 0,35$.

Les résultats de résistance à la compression à 90 jours suggèrent donc qu'un dosage de 20 % de PV donne les meilleurs résultats obtenus (83,2 MPa) dans les conditions expérimentales testées avec ciment sans ajouts de classe CPA 52,5. D'autres auteurs (Islam *et al.*, 2017) ont obtenu des résistances à la compression de 37 MPa à 90 jours pour 20 % de PV avec un ciment de classe CPA 42,5. L'effet de la poudre de verre dépend donc de la classe de ciment auquel on la substitue.

La figure 7 montre également une augmentation de la résistance à la flexion entre 28 et 90 jours de prise. L'ajout de 10 % ou 20 % de PV améliore la résistance à la flexion à la fois à 28 jours et à 90 jours de prise. Le phénomène peut s'expliquer par une adhérence entre les grains de ciment et de sable accrue en présence de poudre de verre.

Conclusion

L'objectif général de ce travail était d'évaluer l'effet de la substitution de ciment par de la poudre de verre (PV) sur la résistance mécanique des mortiers à base de ciment sans ajouts CPA en utilisant des rapports E/L et E/C fixés à 0,35. L'intérêt de l'approche est de permettre le recyclage du verre, et de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Il a ainsi été rapporté que la substitution de 20 % de ciment par de la poudre de verre réduit de 18 % les émissions de CO_2 (Islam *et al.*, 2017).

Les premiers résultats présentés ici révèlent que les délais de prise sont légèrement augmentés par l'addition de poudre de verre au ciment CPA. L'utilisation de la PV réduit habituellement la demande d'eau. La consistance diminue avec la teneur en PV, suggérant un excès d'eau qui peut

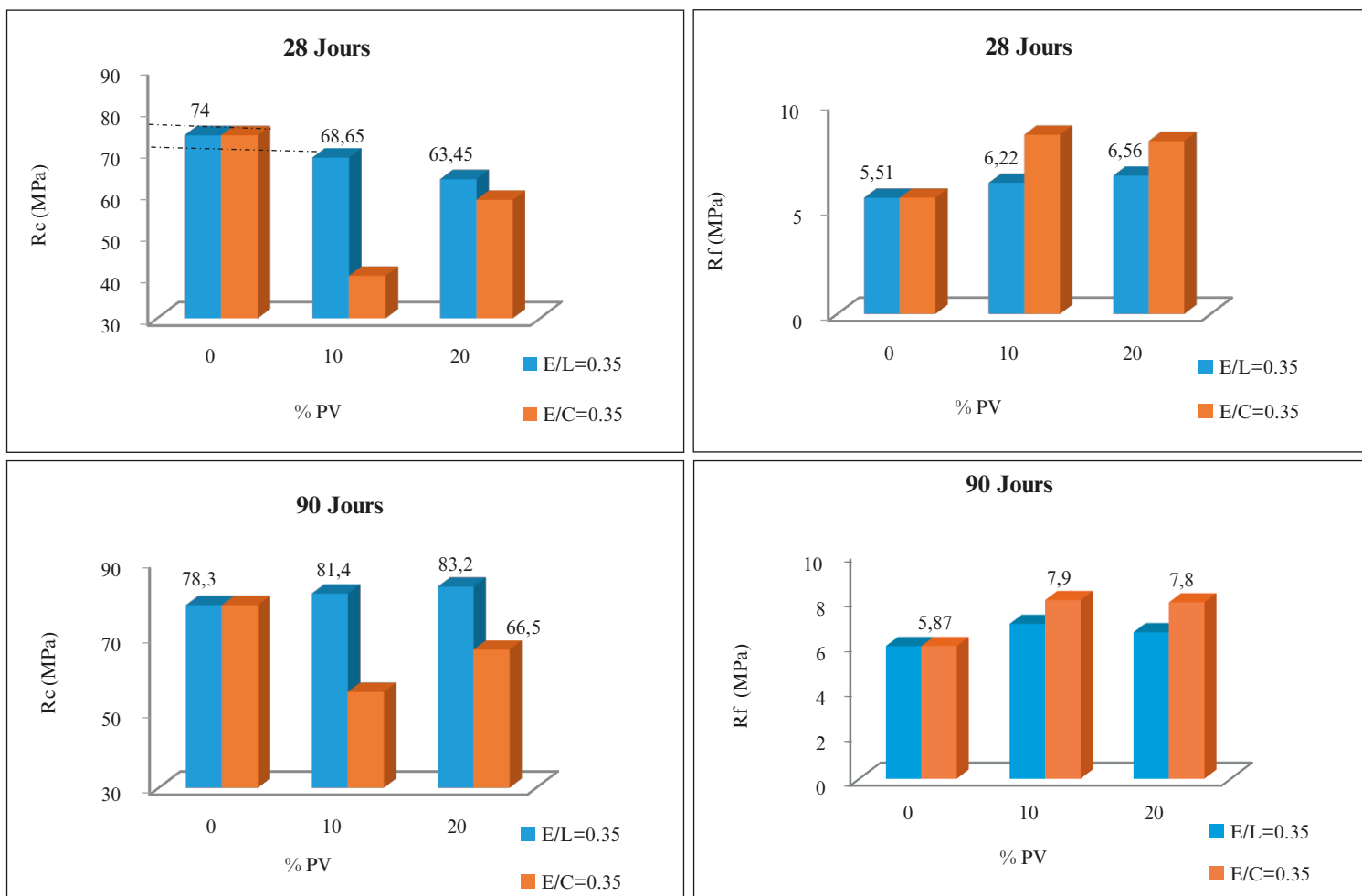


Figure 7. Influence du dosage en PV sur la résistance à la compression (en haut) et à la flexion (en bas) à différents âges

être expliqué par la différence de surface spécifique entre la PV et le ciment et par la plus faible absorption de l'eau de gâchage par la PV, ce qui augmente la quantité d'eau libre dans la matrice cimentaire.

La poudre de verre, tout comme d'autres ajouts cimentaires classiques, modifie la cinétique de développement de la résistance à la compression des bétons. Elle entraîne ainsi un développement lent de la résistance, qui à 28 jours est plus faible que celle des témoins sans PV. Cette observation peut s'expliquer par les modifications de l'hydratation de la matrice induites par la substitution de ciment par la PV qui absorbe moins d'eau que le ciment. En revanche, à 90 jours de prise, on observe que l'addition de 10 % ou 20 % de PV améliore la résistance à la compression. Ces tendances confirment les résultats de Zeghichi *et al.*, 2012.

La résistance à la flexion est quant à elle améliorée à 28 jours comme à 90 jours de prise. La poudre de verre exerce donc un

effet physique et chimique (réaction pouzzolanique et alcali-silice).

L'utilisation du ciment CPA type CEM I 52,5 a significativement augmenté la résistance à la compression comparativement au ciment CPA 42,5 utilisé par d'autres auteurs (Sadiqul Islam *et al.*, 2017). Le rapport E/L affecte significativement la résistance du mortier à base de CPA.

Les résultats présentés ici montrent que le rapport E/L = 0,35 donne de meilleurs résultats que le rapport E/C = 0,35. La poudre de verre dans notre cas a été faite en substitution du ciment CPA et non en ajout comme dans les travaux de Behim et Boucetta, 2014.

La valorisation de poudre de verre comme substitut partiel au ciment dans les mortiers d'usage courant semble réalisable. Des travaux complémentaires restent toutefois nécessaires pour conforter ces premiers résultats.

Références bibliographiques

AFNOR., (1995) *Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques*. NF EN 196-1.

AFNOR., (2000) *Ciment - Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants*. NF EN 197-1.

AFNOR., (2002) *Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage*. NF EN 934-2.

Behim M., Boucetta T.A., (2013) Valorisation du verre à bouteille comme addition fine dans les bétons autoplaçants, *Déchets Sciences et Techniques*, 65, p. 20-28. <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.932>

Bhandari P.S., Tajne K. M., (2013) Use of waste glass in cement mortar. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 3(4), p. 704-711. <https://doi.org/10.6088/ijcser.201203013064>

Idir R., (2009) *Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique*. Thèse de doctorat, Institut national des sciences de Toulouse, 292 p.

Idir R., Cyr M., Tagnit-Hamou A., (2010) Can we massively reuse glass in concrete? Properties of glass concrete. *Verre*, 16(5), p. 70-77.

Idir R., Cyr M., Tagnit-Hamou A., (2011) Potential pozzolanicity of glass cullet fines and aggregates. *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, 1, p. 28-34.

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), p. 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.10.005>

Kamali M., Ghahremaninezhad A., (2015) Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 98, p. 407-416. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.010>

Krati G., Kansal R., (2016). Effect of waste glass powder on properties of concrete: a literature review. *International Journal of Science and Research*, 5 (8), p. 1329-1333.

Limbachiya M., Seddik Meddah M., Fotiadou S., (2012) Performance of granulated foam glass concrete. *Construction and Building Materials*, 28(1), p. 759-768. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.052>

Matos A. M., Sousa Coutinho J., (2012) Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. *Construction and Building Materials*, 36, p. 205-215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027>

Topçu I. B., Canbaz M., (2004) Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research*, 34(2), p. 267-274. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.07.003>

Zeghichi L., Mezghiche B., Benghazi Z., (2012) Contribution à l'étude des propriétés du ciment blanc et compos. *Communication Science & Technologie*, 10, p. 27-35.

Zidol A. (2014) *Durabilité en milieux agressifs des bétons contenant de la poudre de verre*. Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke, Canada, 234 p.