

Effets du laitier granulé et de la pouzzolane naturelle sur les propriétés physico-mécaniques et sur la réaction alcali silice des mortiers à base de verre recyclé

Effect of granulated slag and natural pozzolan on physical-mechanical properties and on alkali silica reaction of recycled glass mortars

Zineb Douaïssia^{1*}, Mouloud Merzoud¹, Mohamed Faouzi Habita¹ & Amar Benazzouk²

¹ Département de Génie Civil, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000 Algérie.

² Département de Génie Civil, Université de Picardie Jules Verne - Amiens, France.

Info. Article	RESUME
Historique de l'article	L'effet de la substitution progressive de 10 % à 50 % du volume de ciment par le laitier granulé et la pouzzolane naturelle sur les propriétés physico-mécaniques des pâtes et des mortiers à base de verre recyclé a été étudié. L'effet de ces additions sur la consistance et les temps de prise des pâtes de ciment ainsi que sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers a été déterminé. L'effet inhibiteur de la réaction alcali-silice (RAS) par l'essai accéléré sur mortier a été aussi vérifié. L'utilisation du laitier granulé et de la pouzzolane naturelle engendre l'augmentation des temps de prise des pâtes de ciment. Elle provoque aussi un besoin en eau important. Elle améliore les propriétés mécaniques et la rigidité des mortiers et peut réduire les expansions et les pertes de performance mécaniques dues à la RAS.
Soumis le 09/04/2019 Révisé le 15/12/2019 Accepté le 16/12/2019	
Mots-clés	
Verre recyclé, Laitier granulé, Pouzzolane naturelle, Réaction alcali silice (RAS), Résistance.	ABSTRACT
Key words	The effect of the progressive volume substitution (10% to 50%) of the cement by ground-granulated blast-furnace slag (GGBS) and natural pozzolan on the physical and the mechanical properties of fresh cement paste and mortars based on recycled waste glass has been verified. The effect of these admixtures on the consistency and setting times of cement pastes as well as on the physical and mechanical properties of mortars has been determined. The inhibitory effect of granulated slag and natural pozzolan on alkali-silica reaction (ASR) using the accelerated mortar bar expansion test has also been verified. The use of granulated slag and natural pozzolan leads to an increase in the setting time of the cement paste. It also causes a high water requirement. It improves the mechanical properties and rigidity of mortars. It can reduce expansions and mechanical performance losses due to ASR.
Recycled waste glass, Granulated slag, Natural pozzolan, Alkali silica reaction (ASR), Strength.	
* Auteur Correspondant	
Zineb Douaïssia	
Département de Génie Civil, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie.	
Email: douaïssiazinebgc@gmail.com	

1. INTRODUCTION

La formulation des bétons est relativement complexe et coûteuse. Ainsi, une forte teneur en liant est requise afin d'assurer les meilleures propriétés. Une exigence plus pressante de trouver une alternative au ciment a fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières années. L'accent est mis sur l'utilisation de déchets industriels comme le laitier granulé, la pouzzolane naturelle et le verre. Dans ce contexte, il est avantageux de recycler ces matériaux en remplacement partiel du ciment et/ou de granulats. Cela permet de diminuer le prix de revient du béton, de limiter l'utilisation des ressources naturelles et d'atténuer la production de gaz à effet de serre.

Du fait de sa nature amorphe et contenant des quantités relativement appréciables de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est broyé finement. Ainsi, il pourrait être utilisé en remplacement du ciment Portland dans les bétons. De nombreux travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation du verre comme granulats dans les bétons. Cependant, ces travaux ont montré que les bétons gonflent et se fissurent [1 - 3]. Depuis, l'idée a été en partie abandonnée, ce n'est que depuis une quinzaine d'années que le sujet est redevenu d'actualité. L'utilisation du verre recyclé dans les ciments et bétons a suscité l'intérêt d'innombrables municipalités, ce qui a encouragé plusieurs chercheurs à s'intéresser à ce sujet [4 - 12]. Le remplacement partiel du granulats naturel ou du ciment par le verre dans les bétons, améliore ses propriétés mécaniques et notamment les résistances en compression. Toutefois, certains travaux conseillent l'utilisation de ce matériau en prenant certaines précautions. Effectivement, les bétons à base de verre sont confrontés à un problème lié à leur durabilité. L'utilisation du verre légèrement concassé comme un sable est susceptible de générer une réaction défavorable 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 hydroxydes et alcalins présents dans la solution interstitielle du béton. Cette réaction donne naissance à un gel gonflant provoquant la fissuration du béton et dans certains cas sa destruction [13-18]. Des études antérieures menées sur le verre ont conclu que l'utilisation des additions minérales tels que les cendres volantes, les laitiers de haut fourneau et la fumée de silice ont un effet positif sur la diminution de l'expansion due à la RAS [19-25]. L'utilisation des additions minérales est intéressante sur le plan rhéologique, elles favorisent la stabilité du béton et contribuent à la réduction de la chaleur d'hydratation et du retrait du béton. Des études récentes ont montré que les additions minérales par leur finesse et une réactivité plus ou moins significative avec le ciment, peuvent engendrer dans certains cas des modifications significatives dans les propriétés mécaniques. Certains auteurs considèrent que la présence des additions minérales multiplie les possibilités de germination des produits hydratés du ciment et facilite ainsi la formation d'une structure solide garantissant les premières résistances mécaniques. Demirboga (2003) [26] en étudiant l'influence des additions minérales sur la résistance en compression des mortiers, a montré que la densité des mortiers avec additions diminuait avec l'augmentation des additions. D'autre part, il est à noter que le laitier granulé de haut fourneau engendre une diminution de la résistance en compression à 28 jours et une amélioration à 120 jours. Le laitier granulé de haut fourneau est un sous-produit de fabrication de la fonte brusquement refroidie par aspersion d'eau. Cette trempe provoque la vitrification du matériau. C'est un matériau hydraulique latent, c'est-à-dire qu'il présente des propriétés hydrauliques lorsqu'il subit une activation convenable. Il est le plus souvent utilisé en mélange avec du ciment Portland et c'est la portlandite formée par hydratation du clinker qui active l'hydratation du laitier. La spécification du béton contenant du laitier granulé de hauts fourneaux finement broyé est reconnue dans plusieurs pays comme une mesure possible pour réduire le risque de la réaction alcali-silice sur le béton contenant des granulats potentiellement réactifs. Cependant, l'efficacité de laitier granulé, en particulier à des niveaux de remplacement de ciment inférieurs à 50 %, a été mise en doute par plusieurs chercheurs [27-30]. Ils ont montré en étudiant l'efficacité du laitier d'El Hadjar par le concept du liant équivalent, que l'utilisation d'un taux élevé de ce laitier (40 %) lui confère un déclenchement d'activité très précoce (2 jours). Seulement cette activité ne sera jamais achevée à long terme (90 jours). Dans ce cas, un taux de 15 % paraît optimal.

La pouzzolane naturelle de Beni-Saf est une roche qui provient du gisement de Bouhamidia à Beni Saf en Algérie. Elle est employée par des cimenteries qui l'utilisent comme ajout actif à des taux de 15 à 20 % dans la fabrication des ciments composés. Les caractéristiques physico-mécaniques des ciments et mortiers avec la pouzzolane naturelle sont étudiées par plusieurs auteurs [31-32]. Ils ont montré que la substitution de 10 % à 30 % du ciment par la pouzzolane naturelle engendre une augmentation de la consistance normale, une diminution du temps de prise, une diminution des résistances mécaniques à jeunes âges et une conservation de ces résistances à long terme. Colak (2003) [33] a montré que la pouzzolane naturelle engendre une augmentation du besoin en eau et une augmentation de la porosité des pâtes de ciment contenant différentes quantités de cette addition à maniabilité constante. Il a mesuré des résistances en compression à 20 % de substitution de ciment par la pouzzolane naturelle très proches de celles des ciments sans additions.

Certaines études substituent des proportions allant jusqu'à 30 % en masse de ciment par des additions minérales, dans ce cas, le volume absolu du mortier augmente et le rapport volumique (eau/solide) diminue. Ces paramètres peuvent influencer les propriétés des mélanges durcis et impliquer des incertitudes dans l'évaluation des différentes actions des additions minérales sur les propriétés des matériaux cimentaires. Dans le cas d'une substitution volumique du ciment, le volume absolu du mortier et le rapport volumique (eau/solide) demeure sans changement. Dans ce cas, la compacité de la structure granulaire et la porosité de la matrice cimentaire des

mélanges avec additions demeurent comparables à celles du mélange sans additions et seuls les effets des particules d'additions sont pris en compte dans la phase cimentaire. Nous proposons dans cet article d'utiliser cette méthode basée sur la substitution volumique progressive (10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %) du ciment par du laitier granulé de haut fourneau et la pouzzolane naturelle de Beni-Saf. Nous nous proposons par la suite d'étudier leur influence sur les propriétés physiques des pâtes fraîches de ciment, comme la consistance et les temps de prise et sur les propriétés physiques des mortiers à base de verre recyclé frais. La masse volumique et la maniabilité, ainsi que leur influence sur les propriétés mécaniques des mortiers durcis, comme la relation contraintes-déformations, les résistances, les déformations, les énergies à la rupture et les modules d'élasticité ont aussi été étudiés. Nous avons aussi vérifié leur effet inhibiteur de la RAS par l'étude de la variation de masse, d'expansion, l'ouverture et la densité des fissures ainsi que la perte des performances mécaniques des mortiers qui subit un essai qui accélère la RAS par autoclave conformément à la norme P18-594 [34].

2. PROGRAMME EXPERIMENTAL

2.1. Matériaux d'essais

2.1.1. Ciment

Le ciment Portland utilisé est du type CPJ-CEM II/A 42,5R conformément à la norme NF EN 197-1 [35], fabriqués à la cimenterie Lafarge de Hammam Dalaâ wilaya de M'sila, Algérie.

2.1.2. Granulat

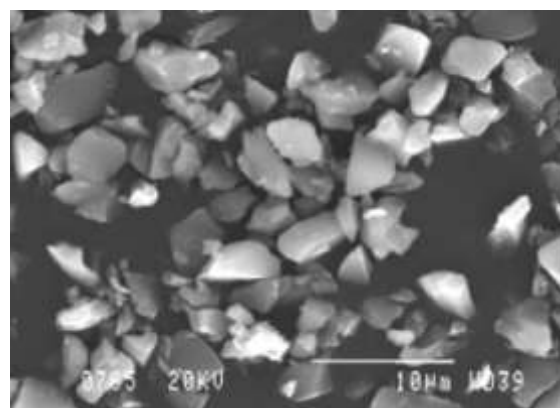
Le granulat utilisé pour les formulations des mortiers est un sable recyclé issu du broyage de verre des vitres. Il provient de la SARL Vitre Khezzane dont l'usine est située aux zones industrielles Meboudja Chaïba, Sidi Amar à Annaba. Il a été fourni sous forme de débris de dimension d'environ 5 cm, partiellement débarrassé de ses impuretés. Le verre livré a été lavé à l'eau puis mis en étuve à 80 °C pour le sécher (Figure 1-a). Après refroidissement, le matériau sec a été introduit dans un broyeur à boulets d'une capacité de 10 kg et broyé jusqu'à l'obtention d'un granulat composé de cinq classes granulaires selon le tableau 1, puis séché pendant 24 heures en étuve à 80 °C. Les fines inférieures à 160 µm ont été éliminées pour éviter toute interaction avec les particules des additions minérales. Les clichés réalisés au microscope électronique à balayage (MEB) en mode électronique secondaire (Figure 1-b) font apparaître la morphologie des grains. En effet, la forme des particules est arrondie, à faciès sans arêtes.

Tableau .1 : Pourcentage des différentes classes granulaires constituant le granulat

Classes granulaires (mm)	2,5-5	1,25-2,5	0,63 - 1,25	0,315 - 0,63	0,16 - 0,315
Pourcentage (%)	30	25	25	10	10



(a) verre débarrassé de ses impuretés.



(b) Vu au MEB des grains de verre

Figure 1: Sable recyclé de verre vitres.

2.1.3 Additions minérales

- **Laitier granulé de haut fourneau (La)**

Le laitier granulé (La) est un sous-produit de la fabrication de la fonte et provient de l'usine sidérurgique d'El-Hadjar Annaba. C'est un laitier fondu dans les bassins d'eau, ce qui conduit à la formation d'une grande quantité de la phase vitreuse. Ensuite, il est séché et broyé sous forme de poudre fine.

- **La pouzzolane naturelle (Pz)**

La pouzzolane naturelle (Pz) est obtenue par le broyage d'une roche volcanique siliceuse extraite du gisement de Beni-Saf dans l'Ouest algérien. Les propriétés physiques et les compositions chimique et minéralogique du ciment, du granulat, du laitier granulé et de la pouzzolane naturelle sont représentées dans le Tableau 2.

- **Eau de gâchage**

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des mortiers a été déminéralisée.

Tableau 2. Propriétés physiques et la composition chimique et minéralogiques du ciment, du Granulat, du Laitier granulé et de la pouzzolane naturelle.

	CEM II/ A 42.5 M'Sila	Granulat verre recyclé	Laitier granulé	Pouzzolane Naturelle
Composition chimique (%)				
SiO ₂	23.2	72.1	33.0	46.8
Al ₂ O ₃	4.9	1.0	11.8	18.8
Fe ₂ O ₃	3.3	0.1	1.6	10.5
CaO	64.2	6.3	41.3	9.2
MgO	0.2	3.7	9.0	3.8
SO ₃	2.5	0.1	0.13	0.2
K ₂ O	0.1	0.1	0.51	0.5
Na ₂ O	0.1	12.7	0.32	0.8
Composition (Bogue) (%)				
C ₃ S	56.0	/	/	/
C ₂ S	16.0	/	/	/
C ₃ A	5.5	/	/	/
C ₄ AF	12.1	/	/	/
Caractéristiques physiques				
Surface spécifique Blaine (m ² /kg)	320	/	300	300
Masse volumique Absolue (kg/m ³)	3090	2310	2400	2670

2.2. Formulation des mortiers

Les mortiers ont été confectionnés avec un remplacement de 10 %, 20 %, 30 %, 40 % et 50 % de volume de ciment par une des additions minérales. La combinaison de l'ensemble de ces configurations expérimentales a conduit à la confection de onze (11) formulations de mortier et ont été réalisées selon le même protocole de façon à assurer une répétition dans les manipulations. Le Tableau 3 reprend les formulations des mortiers étudiés. La préparation des mortiers a été réalisée en utilisant un malaxeur d'une capacité de 2 litres composé d'un récipient et d'un batteur en acier inoxydable, pouvant fonctionner à deux vitesses lente et rapide suivant les prescriptions de la norme EN 196-1 [36]. L'eau, le ciment et les additions sont introduits dans le récipient à l'arrêt. Le malaxeur est mis en marche à vitesse lente pendant 60 secondes, puis à vitesse rapide pendant 30 secondes, le sable étant introduit les premières 30 secondes. Pendant l'arrêt du malaxeur pendant 90 secondes, un raclage manuel des parois du récipient est effectué pendant les premières 15 secondes d'arrêt, puis le malaxeur est remis en marche à vitesse rapide pendant 60 secondes. Le gâchage est réalisé avec un malaxeur normalisé de laboratoire avec une quantité d'eau ajustée afin d'obtenir une consistance de référence. Pour chaque formulation, nous avons effectué des gâchées avec deux mélanges différents. Le premier a été réalisé sans ajout de NaOH, et a été destiné à la confection des éprouvettes de mortier durci afin de déterminer les caractéristiques mécaniques. Le deuxième mélange a été enrichi par ajout de NaOH dans l'eau de gâchage pour obtenir 4 % de Na₂O équivalent par rapport à la masse totale du liant, afin de vérifier l'effet inhibiteur de la réaction alcali-silice par le laitier granulé et la pouzzolane naturelle. Pour déterminer la quantité de NaOH nécessaire, il a été primordial de faire un bilan d'alcalins. Les quantités de la soude à ajouter sont rassemblées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Composition des mortiers

Mortiers		Composition					Masse de NaOH nécessaire (g)	
		Ciment (g)	Eau (l)	E/C	Granulat (g)	Additions Minérales (%) Masse (g)		
1	V0%	450	195	0.43	1350	0	0	14.45
2	V-La10	405	205	0.51	1350	10	43.65	14.65
3	V-La20	360	200	0.56	1350	20	87.30	14.86
4	V-La30	315	199	0.63	1350	30	130.9	15.07
5	V-La40	270	190	0.70	1350	40	174.6	15.28
6	V-La50	225	185	0.82	1350	50	218.3	15.49
7	V-Pz10	405	195	0.48	1350	10	39.75	14.75
8	V-Pz20	360	195	0.54	1350	20	79.50	15.06
9	V-Pz30	315	195	0.62	1350	30	119.3	15.36
10	V-Pz40	270	195	0.72	1350	40	159.0	15.67
11	V-Pz50	225	195	0.87	1350	50	198.8	15.97

2.3 Méthodes expérimentales

2.3.1 Temps de début et de fin de prise

Pour apprécier les temps de début et de fin de prise des pâtes pures des onze types de liant préparés, les essais ont été effectués avec l'appareil de Vicat conformément à la norme EN196-3 [37].

2.3.2 Consistance et maniabilité

La consistance de référence ($l = 115\text{mm}$) a été évaluée en mesurant l'étalement du mortier à l'état frais sur une table à secousses conformément à la norme EN 1015-3 [38]. Le mortier frais a été placé dans un cône de diamètre inférieur à 100 mm, et supérieur : 70 mm et de hauteur : 60 mm, en deux couches compactées à l'aide d'une tige métallique. Après l'enlèvement du cône, la table subit 30 secousses en 30 secondes et la valeur de l'étalement considéré, constitue la moyenne de la mesure de l'étalement du mélange sur deux directions perpendiculaires. L'étude de la maniabilité des mortiers frais est assurée, en étudiant deux facteurs qui sont le besoin en eau et l'étalement du mortier sur la table à secousse. Pour constituer une formulation de référence (SA), nous avons procédé à la substitution volumique progressive du ciment par le sable jusqu'à des taux de 50 % et on a relevé l'effet de cette substitution sur l'étalement, le besoin en eau et la masse volumique.

2.3.3 Masse volumique apparente

La masse volumique du mortier à l'état frais a été mesurée pour chaque formulation en remplissant manuellement un récipient de volume et de masse connus, juste après le malaxage. Le remplissage du récipient est effectué suivant le même mode de serrage que celui adopté pour les éprouvettes.

2.3.4 Essais de résistance mécanique

Pour chaque formulation ayant atteint la consistance de référence, Nous avons préparé six (06) éprouvettes prismatiques de dimensions (40 x 40 x 160) mm. La mise en place des mortiers dans les moules est effectuée en deux couches qui subissent sur une table à chocs 60 secousses en 60 secondes par couche. Les éprouvettes sont démoulées après un jour et conservées immergées dans l'eau à une température de 20 ± 2 °C, jusqu'à l'échéance de l'essai. Pour les mélanges sans ajout de NaOH, soixante-six (66) éprouvettes ont été confectionnées et testées à des échéances de 7 et 28 jours en traction par flexion et en compression, ce qui a donné soixante-six (66) essais de flexion et cent trente-deux (132) essais de compression. Pour les mélanges avec ajout de NaOH, nous avons confectionné et testé trente-trois (33) éprouvettes après le test accéléré par autoclave en traction par flexion et en compression, ce qui a entraîné l'ensemble de quatre-vingt-neuf (99) essais de flexion et cent quatre-vingt-dix-huit (198) essais de compression. La machine utilisée est la machine universelle Zwick/Roell Z200 (Figure. 2), dont le pilotage et l'acquisition des résultats se fait par ordinateur à partir du logiciel testXpert II. A la fin de chaque essai la collecte de données nous a permis d'enregistrer les courbes contraintes-déformations et de déterminer les résistances, les déformations et les énergies ainsi de déduire les modules d'élasticité.

2.3.5 Essai accéléré par autoclave

Pour déterminer le dosage du laitier granulé et la pouzzolane naturelle nécessaire pour réduire l'expansion de l'éprouvette de mortier en dessous du seuil inoffensif de 0.15 % selon la norme XP P 18-594, pour chaque mélange, trois éprouvettes prismatiques de 4x4x16 cm ont été munis à chaque extrémité de plots en acier inoxydable, destinés à la mesure des expansions.



(a) Essai de traction par flexion.



(b) Essai de compression.

Figure.2: Banc d'essai type Zwick/Roell.

Après 24 heures du gâchage, on démoule les éprouvettes, on les immerge dans l'eau convenablement identifiée et espacée. Après 24 heures d'immersion, on retire les éprouvettes et on mesure leurs longueurs initiales (L_i). La mesure est faite dans la salle de conservation, réglée à 20 °C, et ceci à l'aide d'un réfractomètre de précision 0.001 mm. Une référence externe de longueur $L = 16$ cm en Invar, sert à la mise à zéro du comparateur du réfractomètre avant chaque mesure, dont la longueur de base L_0 est de 16 cm. On mesure aussi leurs masses initiales (m_i) à l'aide d'une balance de précision ± 1 g.

On place ensuite les éprouvettes dans l'autoclave, en position verticale. On remplit l'autoclave d'eau potable, de façon à ce que les éprouvettes puissent être recouvertes de 3 cm d'eau. On ferme l'autoclave et on règle la puissance de chauffage, de façon à ce que le seuil de 0.15 MPa de pression relative et de 127 °C de température soit atteint une heure après la mise en marche. Après 5 heures d'autoclavage maintenu à la température et à la pression relative spécifiées, on arrête le chauffage et on règle l'ouverture de la soupape de détente de façon à faire revenir la pression atmosphérique en 15 minutes environ. On laisse refroidir les éprouvettes dans l'autoclave ou dans un récipient approprié, en les gardant constamment en immersion dans l'eau qui a servi pour l'autoclavage, dans la salle de conservation. Les longueurs finales (L_f) et les masses finales (m_f) des éprouvettes sont mesurées 18 heures après cet essai d'autoclave dans la même salle. L'expansion Δexp (%) et la variation massique Δm (%) sont calculées par les relations (1) et (2) respectivement.

$$\Delta exp = \frac{L_f - L_i}{L_0} \times 100 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta m = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad \dots\dots\dots (2)$$

Les effets délétères de la RAS ne se traduisent pas uniquement sous forme d'un gonflement du matériau, mais la plupart du temps apparaît également une fissuration superficielle, plus ou moins dense, par laquelle peuvent se manifester ou non des exsudations de gel. Nous avons photographié les éprouvettes (pour quelques éprouvettes, le tracé des fissures a été souligné préalablement à l'encre), et les mesures de l'ouverture maximale et la densité des fissures ont été relevées à l'aide d'une lunette micrométrique pour la détection des fissures ayant un grossissement de 24 x et réticule 4 mm/0.02. Les mesures ont été évaluées sur 15 points pour chaque éprouvette afin d'obtenir des valeurs moyennes pertinentes. Les éprouvettes ont ensuite été soumises à des essais de rupture par flexion puis par compression pour déterminer l'effet du laitier granulé et de la pouzzolane naturelle sur la perte des performances mécaniques des mortiers due à la RAS. Les pertes ont été calculées par la différence entre les résistances des mortiers affectés et les résistances des mortiers non affectés correspondantes.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Influence du laitier granulé et de la pouzzolane naturelle sur la consistance normale et le temps de prise des pâtes du ciment

L'étude de la consistance normale des pâtes dont l'objectif est de déterminer la quantité optimale de l'eau de gâchage, en fonction du taux de substitution du ciment par du laitier granulé et par la pouzzolane naturelle est présentée sur la Figure 3. On peut constater que l'ajout et l'augmentation successif de la quantité de ces additions minérales n'implique pas une variation significative de la quantité de l'eau de gâchage. Pour obtenir une consistance normale, la pouzzolane naturelle engendre une augmentation de 2 % de la quantité d'eau et le laitier granulé engendre une réduction de 4 % de la quantité d'eau. On enregistre pour un taux de remplacement de 30 % de ciment par les deux additions minérales la même quantité d'eau. Cette variation quand bien même n'est elle pas significative est due à la composition chimique et minéralogique des additions minérales, car le laitier granulé est plus riche en CaO que la pouzzolane naturelle. Il est à signaler que le CaO influe sur le phénomène d'hydratation par l'absorption et la réduction de la quantité d'eau à cause de l'hydratation de la chaux.

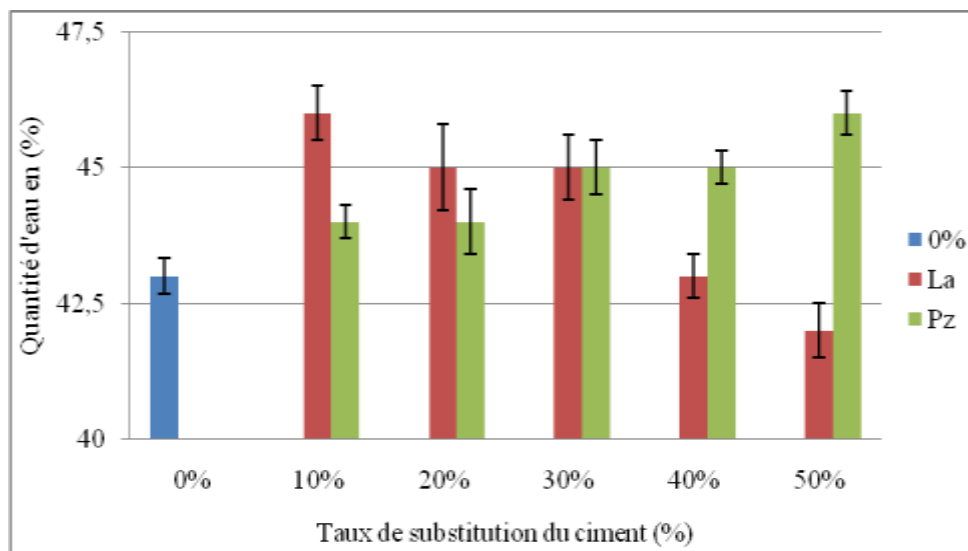
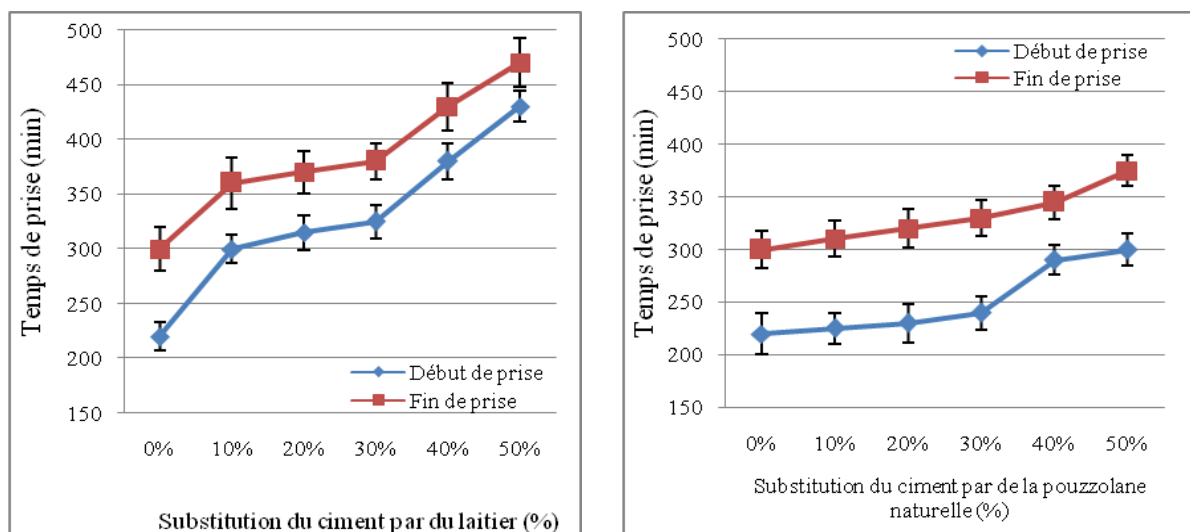


Figure.3 : Influence du laitier granulé et de la pouzzolane naturelle sur la consistance normale des pâtes du ciment

La Figure 4 traduit le temps de début et de fin de prise des pâtes de ciment, en fonction du taux de substitution du ciment par le laitier granulé et par la pouzzolane naturelle. On constate une augmentation des temps de début et de fin de prise par rapport à ceux de la pâte témoin sans additions (0 %),



(a) Laitier granulé

(b) Pouzzolane naturelle.

Figure.4 : Influence du laitier granulé et de la pouzzolane naturelle sur le temps de prise des pâtes du ciment

Cette augmentation est progressive avec l'augmentation des taux de substitution de ciment. Elle est plus significative pour les pâtes avec substitution de ciment par le laitier granulé que celles avec substitution de la pouzzolane naturelle. A partir du taux de 30 % de substitution de ciment, l'augmentation devient plus importante pour les deux additions minérales. Cette augmentation de temps de prise signifie que l'hydratation des ciments avec les additions minérales se déroule à des cinétiques différentes. Cette hydratation est légèrement plus complexe que celle d'un ciment Portland, en raison de la réaction pouzzolanique lente de la pouzzolane naturelle d'une part, et d'autre part l'hydratation des mélanges avec du laitier granulé implique l'activation du laitier granulé par les alcalins et les sulfates pour former ses propres produits d'hydratation. Certains de ceux-ci se combinent avec les produits de ciment Portland pour former d'autres hydrates qui ont un effet de remplissage des pores.

3.2. Influence du laitier granulé et de la pouzzolane naturelle

Les courbes de la variation de la masse volumique des mortiers frais, à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment par du laitier granulé et de la pouzzolane naturelle sont présentées sur la Figure 5. La masse volumique a été déterminée pour vérifier directement la densité et la compacité de l'empilement granulaire des mortiers frais. La compacité du mortier frais avec du laitier granulé est légèrement inférieure à celle du mortier avec de la pouzzolane naturelle. Cependant, le comportement global des deux mortiers reste comparable.

Un relatif gain de compacité par les mortiers frais avec de la pouzzolane naturelle est enregistré à 10 % de substitution de ciment, et à 20 % de substitution de ciment par du laitier granulé. Ceci est lié au fait que le serrage de la structure granulaire des mortiers frais lors de la mise en place dans les moules reste équivalent, indépendamment de la nature et des caractéristiques des additions minérales, et ce, en raison du maintien de la même consistance pour tous les mélanges frais. Ceci peut être confirmé par l'étude de la maniabilité des mortiers frais.

La variation de la maniabilité du mélange frais est caractérisée par l'étalement des mortiers sur la table à secousses et le besoin en eau. La variation de l'étalement est représentée sur la Figure 6-a. Il est constaté que l'étalement du mortier frais avec la pouzzolane naturelle croît jusqu'à 10 % du taux de substitution du ciment, puis décroît avec l'augmentation de la quantité d'additions dans le mélange. Ceci confirme, que l'incorporation de la pouzzolane naturelle dans les mortiers à faibles taux de substitution du ciment, améliore la maniabilité des mélanges cimentaires, qui deviennent plus fermes à plus forts taux de substitution. Les mortiers frais avec du laitier granulé présentent un étalement qui décroît directement avec l'augmentation de la quantité d'additions dans le mélange. L'incorporation de cette addition dans les mortiers rend les mélanges cimentaires beaucoup plus fermes. Le mortier sans additions (SA) présente un comportement différent. La substitution du ciment par le sable engendre une amélioration continue de la maniabilité.

La Figure 6-b présente le besoin en eau des mortiers frais à même consistance définie par la variation du rapport volumique de la quantité d'eau par la quantité de liant (e/l) et évaluée en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales. Le besoin en eau des mortiers avec additions minérales varie sensiblement avec la nature minéralogique, la finesse et la quantité de l'addition incorporée dans le mélange. Les mortiers avec laitier granulé à taux de substitution à 10 % de ciment ont un besoin en eau plus important que le mortier sans additions. Il décroît progressivement avec l'augmentation de taux de substitution, car les particules du laitier granulé viennent remplir une partie de la porosité inter-granulaire du squelette solide et contribuent à réduire l'eau remplissant habituellement ces pores. Les mortiers avec de la pouzzolane naturelle sont caractérisés par un besoin en eau plus faible que celui du mortier de référence qui croît avec l'augmentation de sa quantité dans le mélange.

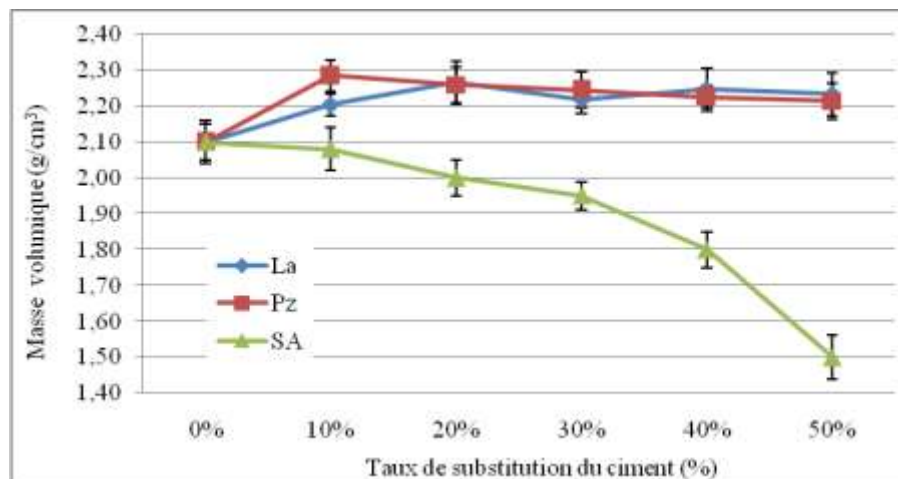


Figure 5 : Variation de la masse volumique des mortiers frais, à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment par le laitier granulé et par la pouzzolane naturelle.

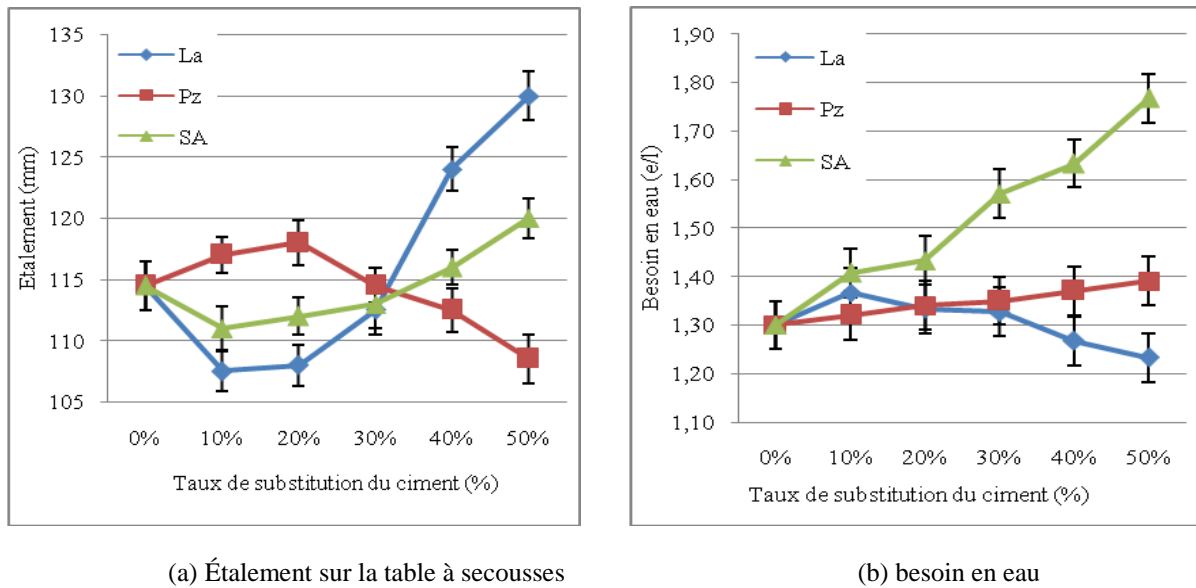


Figure 6 : Influence de l'incorporation du laitier granulé et la pouzzolane naturelle sur la maniabilité des mortiers frais.

3.3. Influence du laitier granulé et la pouzzolane naturelle sur les propriétés mécaniques des mortiers durcis

La collecte de résultats des essais de traction par flexion et de compression a permis de tracer les courbes contraintes - déformations, de déterminer les résistances, les déformations, les énergies, de déduire aussi les modules d'élasticité, et de les présenter sur le Tableau 4. Les courbes contrainte-déformation en traction par flexion effectuées à 28 jours sur les mortiers avec substitution de 10 % à 30 % de ciment par le laitier granulé et la pouzzolane naturelle sont présentées sur les Figures (7-a) et (7-b) respectivement.

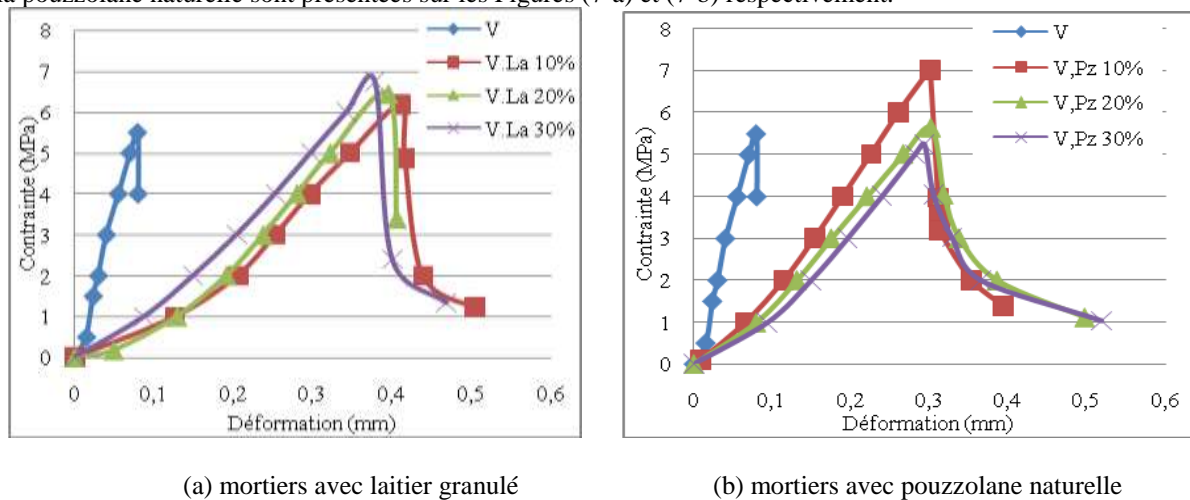


Figure 7 : Courbes contrainte-déformation en traction par flexion des mortiers à 28 jours.

À partir de ces courbes, on remarque que le mortier V sans addition minérale a un comportement élastique jusqu'à la rupture sans domaine plastique. Ceci est dû à la porosité interne qui constitue des zones de concentration locales des contraintes. On le classe comme un matériau fragile. Vu la linéarité de la relation contraintes/déformations la loi de comportement appliquée est la loi de Hooke exprimée par l'équation (3) :

$$\sigma_n = E \varepsilon_n \quad \dots \dots \dots (3)$$

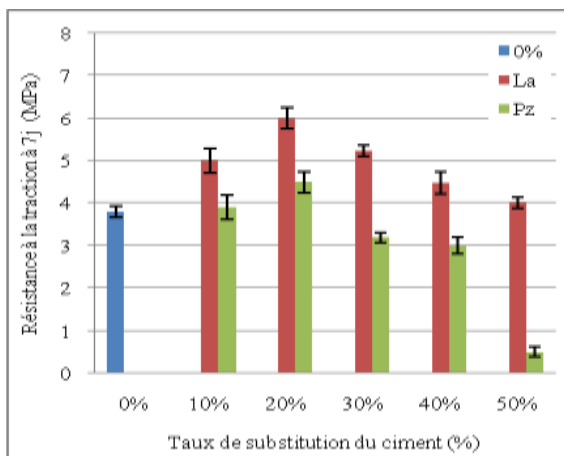
où :
 : contrainte,
 E : Module d'élasticité
 ε_n : déformation.

La substitution volumique de ciment par le laitier granulé et la pouzzolane naturelle améliore considérablement la ductilité du mortier à base de verre recyclé. La résistance à la traction maximale (σ_{max}) est la plus grande contrainte atteinte durant l’essai de traction, elle correspond à la limite élastique. La résistance à la traction à la rupture (Rupt) est la résistance finale atteinte lors de la rupture de l’éprouvette. On observe que plus la différence entre la résistance σ_{max} et la résistance R_{rupt} est importante plus le matériau est ductile. Les déformations ($\Delta\epsilon$) et les énergies élastiques (U_e) mesurées lors de l’essai de traction par flexion correspondent à la force de traction (F_{max}) et à la force de traction finale (Rupt) atteinte lors de la rupture de l’éprouvette.

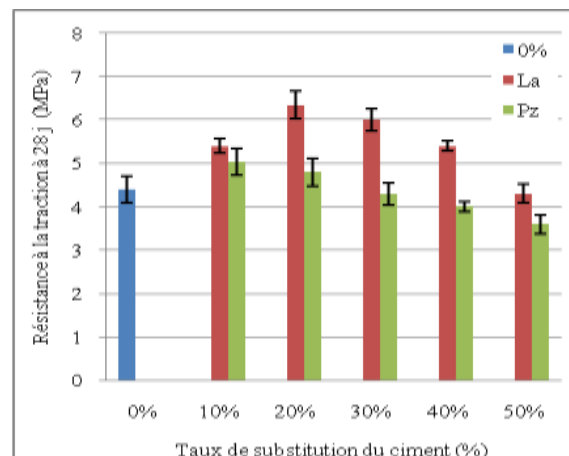
Tableau .4 : Propriétés mécaniques des mortiers à 28 jours.

Mortier		Traction par flexion						Compression	
		Forces		$\Delta\epsilon$ pour		U_e pour		Contrainte	E
		Max	Rupt	F_{max}	F_{Rupt}	F_{max}	F_{Rupt}		
Add	%	KN	KN	mm	mm	KNmm	KNmm	MPa	GPa
V	0 %	0.70	1.80	0.05	0.07	0.047	0.080	23.9	38.7
V.La	10%	3.10	0.40	0.42	0.55	0.478	0.569	24.3	38.8
	20%	2.70	1.45	0.38	0.40	0.440	0.460	22.1	37.2
	30%	4.35	0.35	0.35	0.47	0.436	0.520	17.2	36.1
V.Pz	10%	2.40	2.60	0.29	0.40	0.394	0.398	26.4	40.3
	20%	2.90	0.60	0.31	0.50	0.403	0.467	23.0	37.9
	30%	1.70	0.60	0.28	0.52	0.275	0.501	21.8	36.6

Les variations des résistances en traction par flexion à 7 et 28 jours des mortiers avec additions minérales sont représentées en fonction du taux de substitution du ciment par les figures (8-a) et (8-b) respectivement. Nous pouvons remarquer, que les variations des résistances des mortiers avec laitier granulé et les mortiers avec la pouzzolane naturelle à 7 et 28 jours sont similaires. Elles s'améliorent avec l'augmentation des taux de substitution du ciment et atteignent une valeur maximale à 20 % de substitution de ciment. Les résistances à 7 jours des mortiers avec substitution de ciment par du laitier granulé au-delà de 30 % sont trop faibles, à cause, de la faible teneur en C_3A du mélange. Il faut signaler que le C_3A a tendance à accélérer le processus d'hydratation du ciment et à favoriser les résistances à jeunes âges. Ceci est en accord avec les résultats obtenus par d'autres investigations [24-26].



(a) Résistances à la traction à 7 jours



(b) Résistances à la traction à 28 jours

Figure 8 : Variation des résistances à la traction par flexion des mortiers à 7 et 28 jours, en fonction du taux de substitution du ciment par le laitier granulé et par la pouzzolane naturelle.

La variation de la résistance à la compression des mortiers avec substitution de ciment par les additions minérales à 7 et 28 jours est donnée par les figures (9-a) et (9-b) respectivement. On remarque que la substitution du ciment par la pouzzolane naturelle donne des résistances à la compression légèrement supérieures à celles mesurées pour les mortiers avec substitution de ciment par le laitier granulé. Un optimum de la résistance à la compression est observé pour le taux de 10 % de substitution de ciment puis les résistances diminuent considérablement avec l’augmentation de la teneur en additions minérales. Cette perte de résistance est liée, d’une part, à la nature minéralogique des additions et d’autre part, à l’augmentation de la porosité en raison de la plus grande quantité d’eau utilisée. Cette eau excédentaire est caractérisée par l’augmentation de l’étalement de mortier frais lors de l’essai de la table à secousses. L’évaporation de cette eau, au cours du durcissement,

engendre une porosité supplémentaire dans la matrice. Les résultats montrent que malgré la baisse de la résistance à la compression, la valeur obtenue pour une composition à 10 % en addition, reste compatible avec l'utilisation du matériau dans le domaine d'application des bétons de construction.

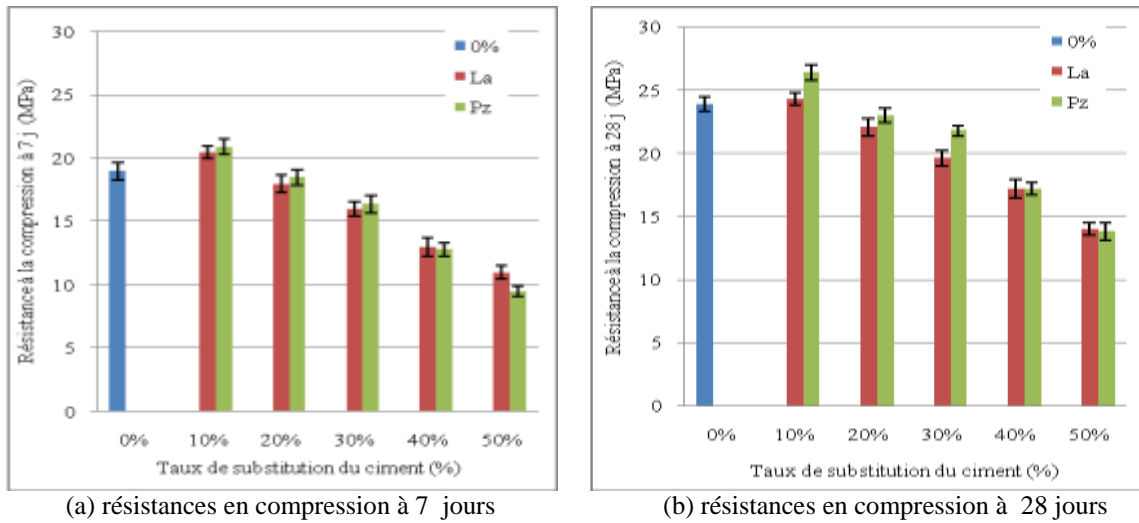


Figure 9 : Variation des résistances en compression des mortiers à 7 et à 28 jours, en fonction du taux de substitution du ciment par le laitier granulé et par la pouzzolane naturelle.

Les résultats des modules d'élasticité (Tableau.4) montrent que l'ajout de laitier granulé et de la pouzzolane naturelle dans la matrice cimentaire, réduit légèrement le module d'élasticité. Cette diminution est due à l'effet de dilution. La pouzzolane naturelle par sa réaction pouzzolanique bénéfique réduit moins le module d'élasticité.

3.4. Influence du laitier granulé et de la pouzzolane naturelle sur la réaction alcali-silice des mortiers à base de verre recyclé :

L'influence des additions minérales selon les différents taux de substitution de ciment sur les expansions des mortiers due à la RAS est présentée sur la Figure 10. Toutes les valeurs représentent la moyenne des mesures effectuées sur trois éprouvettes. On peut remarquer que le mortier sans additions (V0 %) provoque une expansion importante supérieure à la valeur-limite 0.15 %. Les variations des expansions des éprouvettes de mortier sont décroissantes avec le taux de substitution volumique de ciment par les additions minérales. L'incorporation des additions minérales peut réduire les expansions des mortiers. Le taux de substitution optimal est de 30 % pour la pouzzolane naturelle et de 40 % pour le laitier granulé. L'effet inhibiteur de la RAS par les additions minérales peut être expliqué par le fait que l'incorporation des additions minérales entraîne la formation de C-S-H par la réaction pouzzolanique. Ces C-S-H remplissent les pores de la pâte de ciment durcie, et densifient la structure de la pâte et mènent à une diminution de sa porosité, et ainsi à une baisse de la perméabilité. En conséquence, il y aurait une réduction de la mobilité ionique qui gêne la migration des alcalins vers les granulats réactifs [19-24].

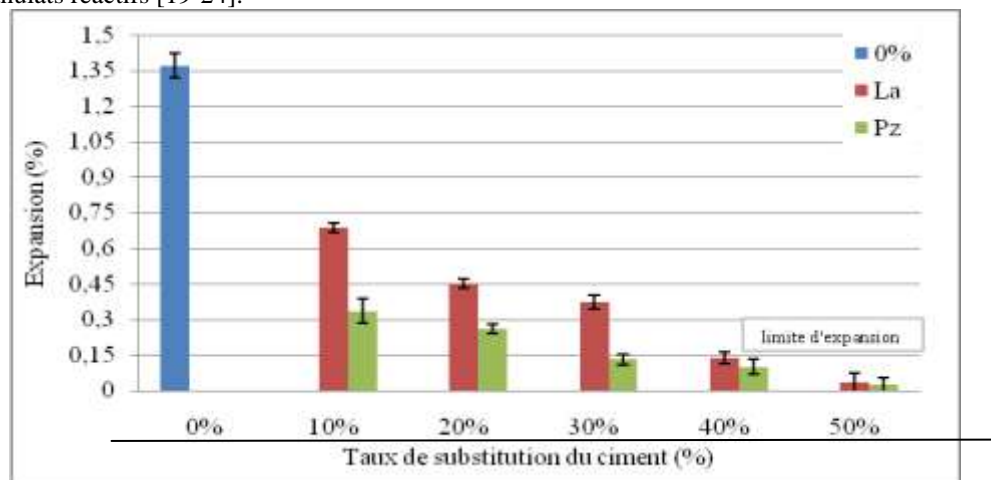


Figure.10: influence des additions minérales selon les différents taux de substitution de ciment sur les expansions des mortiers due à la RAS.

Il est constaté sur la Figure 11 que les fissures apparues dans le mortier en granulats de verre recyclé sans additions minérales (V0 %) sont les plus ouvertes et que l'incorporation progressive des additions minérales supprime les fissures des éprouvettes des mortiers. Si l'on met en parallèle la fissuration et l'expansion, on constate que les valeurs de la largeur et la densité des fissures correspondent avec les valeurs d'expansion. Afin d'étudier l'influence du laitier granulé et de la pouzzolane naturelle sur les caractéristiques mécaniques de mortiers affectés par la RAS, nous avons calculé les pertes de performances mécaniques qui sont présentées sur le tableau.5.



Figure 11 : Fissuration des éprouvettes des mortiers, (a) mortier sans additions minérales
(b) mortier avec additions minérales

Tableau .5 : Influence du laitier granulé et de la pouzzolane naturelle sur la réaction alcali-silice des mortiers

Additions minérales (%)	Laitier granulé						Pouzzolane naturelle					
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	10%	20%	30%	40%	50%	
Variation massique (%)	4.45	3.43	1.37	0.91	0.29	0.09	0.95	0.71	0.62	0.15	0.06	
Expansion (%)	1.37	0.69	0.45	0.7	0.14	0.03	0.34	0.26	0.13	0.1	0.02	
Fissures	Largeur (mm)	0.90	0.50	0.15	0.10	0.05	0	0.10	0.05	0.03	0	0
	Densité (mm/cm ²)	10.9	5.94	5	3.13	2.5	0	4.38	3.13	2.13	0	0
Perte de	résistance traction (%)	63.6	65	60.6	60	-	-	50.4	27.1	-	-	-
	résistance compression (%)	18.8	35.6	29.5	6.8	-	-	12.5	-6.1	-	-	-
Module Elasticité (%)	18.5	36	28	8	-	-	12	-6	-20	-	-	

On remarque que la performance mécanique majeure affectée par la RAS est la résistance à la traction par flexion. La RAS entraîne des pertes de résistance observées pour le mortier (V0 %) sans additions minérales qui sont 63.6 % et 18.8 % à la traction par flexion et en compression respectivement. Ceci est en accord avec les résultats rapportés par la littérature technique [13-18], qui mentionne des valeurs comprises entre 42 % et 78 % pour la perte de résistance en traction par flexion et entre 15 % et 27 % pour la perte de résistance en compression [13-18].

L'incorporation des additions minérales a contribué à la réduction de la perte des résistances et particulièrement l'incorporation de la pouzzolane naturelle, dont le pourcentage de la perte de résistance à la traction par flexion diminue de 63.6 % jusqu'à 50.4 % pour un taux de substitution de 10 %. Un gain de 15.8 % est observé à un taux de substitution de 30 %.

Le pourcentage de la perte de résistance en compression diminue de 18.8 % jusqu'à 12.5 % pour un taux de substitution de 10 %. Un gain de 21.1 % est observé à un taux de substitution de 30 %.

Pour le cas du laitier granulé ce n'est qu'à partir d'un taux de 30 % de substitution de ciment qu'on constate une réduction de la perte de résistance de 60 % et 6.8 % respectivement pour la résistance à la traction et en compression respectivement.

4. CONCLUSIONS

Ces travaux de recherche ont pour objectif d'étudier l'influence du laitier granulé et de la pouzzolane naturelle sur les propriétés physico-mécaniques et sur la réaction alcali silice des mortiers à base de verre recyclé. Les conclusions suivantes ont été tirées :

1. L'ajout et l'augmentation successive de la quantité des additions minérales n'impliquent pas une variation significative de la quantité de l'eau de gâchage pour l'obtention d'une pâte de ciment à consistance normale.
2. Le remplacement partiel de ciment par des additions minérales engendre une augmentation des temps de début et de fin de prise progressivement avec l'augmentation des taux de substitution de ciment., Ceci est plus significatif pour le laitier granulé que pour la pouzzolane naturelle.
3. La compacité du mortier frais avec laitier granulé et celle avec la pouzzolane naturelle sont comparables indépendamment de la nature et des caractéristiques des additions minérales, en raison du maintien de la même consistance pour tous les mélanges.
4. L'ajout de laitier granulé et de la pouzzolane naturelle rendent les mortiers frais fermes et moins maniables, caractérisés par un besoin en eau qui augmente avec le taux de substitution de ciment par les additions minérales.
5. L'utilisation des additions minérales permet d'améliorer les performances mécaniques de mortier. Cette augmentation mènerait donc à une résistance plus élevée associée à l'augmentation de la rigidité de mortier. Ceci aurait également pour effet de limiter les déformations telles que l'expansion due à la RAS. L'incorporation de 30 % de la pouzzolane naturelle et de 40 % du laitier granulé peut réduire les expansions des mortiers et améliorer les performances mécaniques.
6. La performance mécanique majeure affectée par la RAS est la résistance à la traction par flexion.

REFERENCES

- [1] Pike, R.G., Hubbard, D. and Newman, E.S., 1960. Binary silicate glasses in the study of alkali-aggregate reaction, *Highway Research Board Bulletin*, vol.275, 39–44.
- [2] Schmidt, A. and Saia, W.H.F., 1963. Alkali-aggregate reaction tests on glass used for exposed aggregate wall panel work. *American concrete institute, Material Journal*, vol.60, 1235–1236.
- [3] Pattengil, M. and Shutt T.C., 1973. Use of ground glass as a pozzolan; Albuquerque Symposium on Utilisation of Waste Glass in Secondary Products. Albuquerque, New Mexico, U.S.A., 137–153.
- [4] Shao Y., Lefort T., Moras S., and Rodriguez D., 2000. Studies on concrete containing ground waste glass, *Cement and Concrete Research*, vol. 30 (1), 91–100.
- [5] Kojima, T., Takagi, N. and Haruta, K., 2000. Expanding characteristics of mortar with glass powder produced from waste bottles, *11th international conference on Alkali Aggregate Reaction*, Quebec, 673–682.
- [6] Bazant, Z, K, P., Zi, G and Meyer, C., 2000. Fracture mechanics of ASR in concretes with waste glass particles of different sizes, *Journal of Engineering Mechanics*, 226 – 232.
- [7] Dyer, T. D. and Dhir, R. K., 2001. Chemical reactions of glass culland used as cement component, *journal of materials in civil engineering* , 412 – 417.
- [8] Meyer, C. and Xi Y.P., 1999. Use of recycled glass fly ash for precast concrete, *Journal of materials in civil engineering*, vol.11 (2), 89 – 90.
- [9] Park, S. B., Lee, B. C. and Kim J H., 2004. Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate, *Cement and Concrete Research* vol. 34 (12), 2181–2189.
- [10] Karamberi, A., Kerinis, M. and Moutsatsou, A., 2004. Innovative reuse of glass culland in cement products, *Proceedings of the International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling: Glass Waste*, 133–140.
- [11] Shi, C., Wu, Y., Riefler, C. and Wang, H., 2005. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, *Cement and Concrete Research*, vol.35 (5), 987–993.
- [12] Shayan, A. and Xu, A., 2004. Value-added utilisation of waste glass in concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 34 (1), 81 – 89.
- [13] Giaccio G., Zerbino R., Ponce J.M. and Batic O.R., 2008. Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, vol. 38, 993–1004.
- [14] Jones A. E. K. and Clark L. A., 1998. The effects of ASR on the properties of concrete and the implications for assessment, *Engineering Structures*, Vol 20 (9), 785 – 791.
- [15] Pleau, R., Bérubé, M.A., Pigeon, M., Fournier, B. and Raphaël, S., 1989. Mechanical behavior of concrete affected by ASR. *8th International Conference On Alkali Aggregate Reaction (ICAAR)*, Kyoto, 721 – 726.
- [16] Swamy R.N. and Al-Asali M.M., 1989. Engineering Properties of Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction, *American Concrete Institute Materials journal* vol.85, 367 – 374.
- [17] Bouabdallah. F., Kherici-Bousnoubra. H., Habita. MF., Djedaoune. A. and Rehamnia. N., 2017. Degradations of reinforced concrete beams affected by Alkali Aggregate Reaction AAR studied by the Principal Component Analysis's statistical method PCA . *Revue des Sciences and de la Technologie, Synthèse* 35: 255-272
- [18] Rehamnia. N, Habita. MF., Bouabdallah. F., and Ferhoune.N., 2018. Alterations in concrete samples due to Alkali – Carbonate–Reaction ‘ACR’ . *Revue des Sciences and de la Technologie, Synthèse* 37 : 153-169.
- [19] Hobbs D.W., 1989. Effect of mineral and chemical admixtures on alkali aggregate reaction. *8th International Conference On Alkali Aggregate Reaction (ICAAR)*, Kyoto, Japan, 173–186.

- [20] Peter P. Hudec and Joseph A.Larbi., 1989. Chemical treatments and additives to minimize alkali reactivity. 8th *International Conference On Alkali Aggregate Reaction (ICAAR)*, Kyoto, Japan, 193–198.
- [21] Duchesne J. and Bérubé M.A., 1994. Effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR: another look at the reaction mechanisms. Part I: concrete expansion and portlandite depletion, *Cement and Concrete Research*, vol 24 (1), 73–82.
- [22] Xu G.J.Z., Watt D.F. and Hudec P.P., 1995. Effectiveness of mineral admixtures in reducing ASR expansion, *Cement and Concrete Research*, Vol 25 (6), 1225–1236.
- [23] Monteiro P.J.M., Wang K., Sposito G., dos Santos M.C. and Andrade W.P., 1997. Influence of mineral admixtures on the alkali-aggregate reaction, *Cement and Concrete Research*, vol 27 (12), 1899–1909.
- [24] Swamy. R.N. and Al-Asali. M.M., 1989. Effectiveness of mineral admixtures in controlling ASR expansion. 8th *International Conference On Alkali Aggregate Reaction (ICAAR)*, Kyoto, Japan, 205–210.
- [25] Memon A.H., Radin S.S., Zain M.F. M. and Trottier J.F., 2002. Effect of mineral and chemical admixtures on high-strength concrete in seawater, *Cement and Concrete Research*, Vol.32, 373–377.
- [26] Demirboga R., 2003. Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar, *Energy and building*, Vol. 35, 189–192
- [27] Moir. G.K. and Lumley. J.S., 1989. Influence of partial cement replacement by ground granulated slag on the expansion of concrete prisms containing reactive silica. 8th *International Conference On Alkali Aggregate Reaction (ICAAR)*, Kyoto, Japan, 199–204.
- [28] Rasheeduzzafar and Ehtesham Hussain S., 1991. Effect of Microsilica and Blast Furnace Slag on Pore Solution Composition and Alkali-Silica Reaction, *Cement and Concrete Composites*, vol.13, 219–225.
- [29] Fernández-Jiménez A. and Puertas F., 2002. The alkali-silica reaction in alkali-activated granulated slag mortars with reactive aggregate, *Cement and Concrete Research*, Vol 32 (7), 1019–1024.
- [30] Hester D., McNally C. and Richardson M., 2005. A study of the influence of slag alkali level on the alkali-silica reactivity of slag concrete, *Construction and Building Materials*, Vol 19 (9), 661–665.
- [31] Ghassan K. Al-Chaar, Mouin Alkadi and Panagiotis G. Asteris, 2013. Natural Pozzolan as a Partial Substitute for Cement in Concrete. *The Open Construction and Building Technology Journal*, vol 7, 33–42.
- [32] Khudhair M. H.R., Elyoubi M. S. and Elharfi A., 2017. Development of a new hydraulic binder (composite cement) based on a mixture of natural Pozzolan active 'PN' and Pure Limestone 'P,Lime': Study of the physical-chemical and mechanical properties- *Journal of Materials and Environmental Sciences- JMES*, Vol 8 (3), 902–910.
- [33] Colak A., 2003. Characteristics of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pouzzolan, *Cement and Concrete Research*, Vol 33, 585–593.
- [34] AFNOR XP P18-594, 2004. Granulats - Méthodes d'essai de réactivité aux alcalis, Association Française de Normalisation AFNOR.
- [35] AFNOR EN 197-1, février 2001, Ciment - Partie 1 : Composition, spécifications and critères de conformité, Association Française de Normalisation AFNOR.
- [36] AFNOR NF EN 196-1, 2006. Méthodes d'essais des ciments- Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques.
- [37] NF EN 196-3 : Méthodes d'essais des ciments – partie 3 : Détermination du temps de prise and de la stabilité
- [38] NBN EN 1015-3, 1999. Méthodes d'essais des mortiers pour maçonnerie - partie 3: Détermination de la consistance du mortier frais à la table à secousses.