

ETUDE DE L'INFLUENCE DES ADDITIONS MINÉRALES ACTIVES SUR LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES CIMENTS ET MORTIERS

S. CHABI¹, B. MEZGHICHE, H. GUETTALA³

¹ Magister. Département de Génie Civil, Université de Biskra.

Samia.chabi@caramail.com

² Maître de conférence. Département de Génie Civil, Université de Biskra.

³ Maître de conférence. Département de Génie Civil, Université de Biskra. et CRSTRA.

RESUME

L'étude consiste à optimiser une composition d'un ciment en utilisant comme ajouts actifs la pouzzolane, le laitier, ou le silex en proportion variable, en étudiant les propriétés physico-chimiques et l'influence sur le comportement mécanique des mortiers, et bétons, afin d'aboutir à quelques améliorations concernant : l'économie, les propriétés physiques, le comportement mécanique, la durabilité.

L'utilisation de ces ajouts naturels actifs a pour effet de diminuer l'énergie nécessaire à la production de ciment (l'ajout étant ajouté après refroidissement de clinker) et d'augmenter la durabilité des bétons obtenus.

L'emploi des ciments composés est intéressant pour les constructions immergées dans l'eau douce, constructions souterraines et aussi, pour les ouvrages marins en béton et en béton armé dans les cas où les bétons doivent satisfaire à des conditions d'étanchéité et de résistance aux eaux agressives.

MOTS CLES

Clinker, Pouzzolane, Laitier, Silex, Propriétés physico-chimiques et mécaniques, retrait, gonflement, durabilité.

1 INTRODUCTION

Les additions minérales peuvent modifier la nature et la texture des hydrates formés. Soit ils existent sous forme de produits naturels comme la pouzzolane de BeniSaf (ouest Algérien); il s'agit d'une roche volcanique effusive à composition surtout feldspathique (donc siliceuse) à structure alvéolaire, et le silex qui provient du dépôt de la silice dans les eaux de ruissellement. Cette roche se trouve dans les environs de Biskra en grande quantité. Soit ils résultent de processus industriels, sous forme de déchets comme le laitier granulé; cette matière constitue un sous produit de l'industrie sidérurgique (ACI 3R-87, 1996). Il est obtenu par un refroidissement très rapide du laitier. Le but de la granulation est d'obtenir une matière aussi bien vitreuse que cristalline

Le but de cette étude est la valorisation de ces matériaux locaux en étudiant leur propriétés physico-chimiques, afin d'aboutir à des améliorations concernant l'économie et la durabilité.

2 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

2.1 La pouzzolane

Nous avons utilisé une pouzzolane naturelle d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamedi situé au sud de Beni-Saf (Algérie).

2.1.1 Analyse de la pouzzolane

L'aptitude de cette pouzzolane à fixer la chaux, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est d'environ 100mg/g (Chang et al., 1996). Le tableau 1 montre l'analyse chimique de la pouzzolane, tandis que le tableau 2 montre l'analyse minéralogique de la pouzzolane.

Tableau 1 : Analyse chimique de la pouzzolane.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Perte au feu
(%)	45,90	17,10	10,60	10,20	3,40	1,50	1,80	4,05	4,20

Tableau 2 : Analyse minéralogique de la pouzzolane.

Minéraux	Pourcentages
Feldspath plagioclase (Anorthite : $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$)	38
Pyroxène (Augite : $(\text{Mg}, \text{Fe})_2 \text{SiO}_6$)	16
Verre volcanique.	15
Analcine (Zéolithe)	13
Chlorite ($6\text{Mg}_5\text{AlSiO}_6(\text{OH})_8$)	5
Hématite : Fe_2O_3 Magnétite : Fe_3O_4 Biotite : $2\text{K}(\text{Fe}, \text{Mg})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	7
Autre minéraux : basalte, calcite, dolomite, argile,etc.	6

2.2 Le laitier

Dans notre étude nous avons utilisé le laitier granulé de haut fourneau du complexe sidérurgique d'El-Hadjar, Wilaya d'ANNABA. Le tableau 3 montre l'analyse chimique du laitier tandis que le tableau 4 montre la qualité du laitier.

Tableau 3 : Analyse chimique du laitier.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	SO ₃
(%)	40,80	5,20	0,53	43,01	6,40	3,02	0,80

La qualité du laitier est appréciée par deux modules (Mezghiche., 1996). Le tableau 4 montre le module de basicité (M_b) et le module d'activité (M_a) du laitier.

Tableau 4 : Module de basicité (M_b) et Module d'activité (M_a).

Module	Formule	Valeur	Commentaires
Module de basicité (M_b)	$\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$	1,074	$M_b > 1$ donc le laitier est basique, ce qui le rend apte à l'activation alcaline.
Module d'activité (M_a)	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	0,127	Acceptable

2.3 Le silex

Le silex se présente sous forme de masse arrondie ou rognon. Cette roche a une couleur variable : noire, brune...

Elle se casse en éclats irréguliers aux arêtes tranchantes, c'est pourquoi les hommes préhistoriques l'ont utilisée pour façonner des outils ou des armes. Le tableau 5 donne l'analyse chimique du silex.

Tableau 5 : Analyse chimique du silex.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl
(%)	75,10	2,41	2,54	12,20	0,23	0,62	0,06	0,72	0,081

2.4 Le ciment portland

Le ciment utilisé est un ciment portland artificiel, avec 3,5% de gypse pour la régularisation de la prise.

Le clinker utilisé est celui de la cimenterie de AIN-TOUTA, dont la composition chimique et minéralogique est donnée par le tableau 6.

Tableau 6 : Analyse chimique et minéralogique du clinker.

Composition chimique (%)								Composition minéralogique (%)			
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Chaux libre	Résidu insoluble	Perte au feu	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
22,00	5,30	3,38	65,16	1,77	2,32	1,40	0,48	58,09	23,32	8,32	10,27

3 PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.1 Résistance mécanique du liant

Afin d'étudier en parallèle l'effet des différents pourcentages de pouzzolane et de laitier pour un dosage en eau constant sur la résistance mécanique de la pâte de ciment durcie, on a utilisé des éprouvettes cubiques de $(2 \times 2 \times 2)$ cm³ en pâte pure à raison de six éprouvettes par essai. La finesse de la pouzzolane, du laitier et de silex est respectivement égales à 3015 cm²/g, 3000 cm²/g et 1600 cm²/g.

Afin d'étudier l'influence du traitement thermique sur la résistance mécanique du liant, les éprouvettes sont durcies dans deux conditions différentes : durcissement naturel (à l'air libre) et durcissement rapide par étuvage à une température de 80 °C pendant 18 heures (3 heures de préchauffage + 12 heures d'étuvage isotherme + 3 heures de refroidissement). Après le démoulage, on soumet les éprouvettes à une cure normale dans l'eau potable à 20°C.

A partir des résultats on a pu construire des graphiques présentant l'évolution dans le temps de la résistance à la compression en fonction des différents pourcentages de pouzzolane et de laitier (figures 1 à 4).

Dans le cas du durcissement naturel, l'évolution des résistances en fonction du temps montre que pendant les premiers jours (3j) les résistances sont importantes quand l'addition atteint 35% de pouzzolane et de laitier, tandis que les résistances sont faibles quand les additions sont inférieures à 35%. Dans les périodes qui suivent, les résistances augmentent sensiblement. Cela est dû à la cinétique de la réaction d'hydratation des constituants du ciment à la pouzzolane et au laitier qui devient de plus en plus active. C'est la formation des CSH (silicate de calcium hydraté) qui conduit à une augmentation de la résistance.

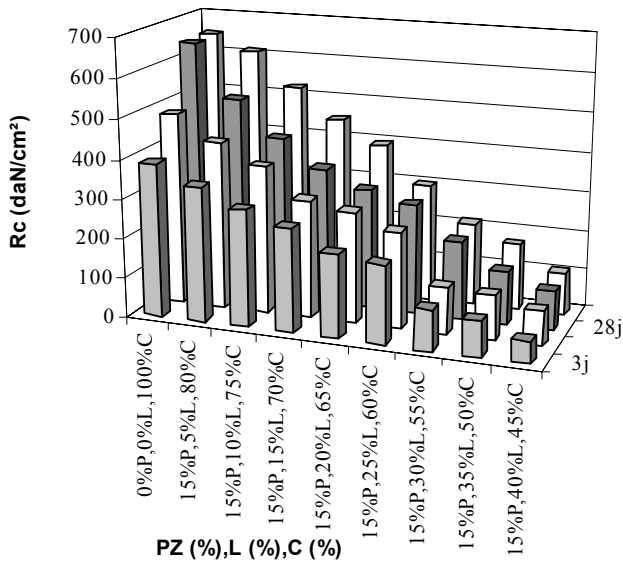


Figure 1 : Effet de la teneur en laitier sur la résistance à la compression des ciments durcis à l'état naturel ($E/(C+P+L) = 0,3$) pour 15% de pouzzolane.

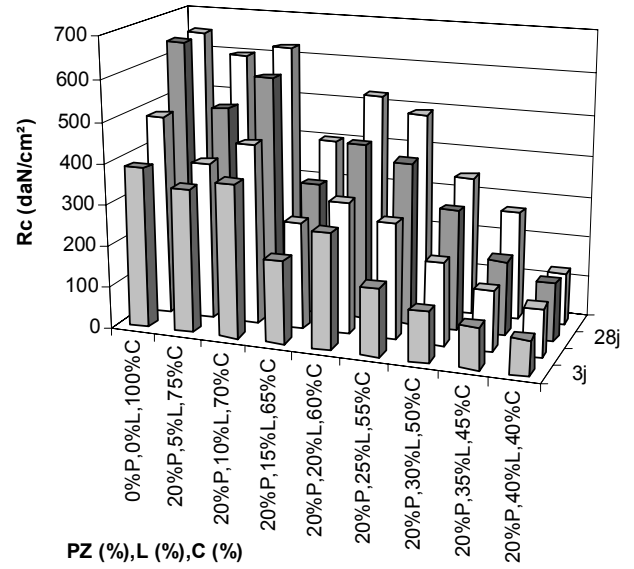


Figure 3 : Effet de la teneur en laitier sur la résistance à la compression des ciments durcis à l'état naturel ($E/(C+P+L) = 0,3$) pour 20% de pouzzolane

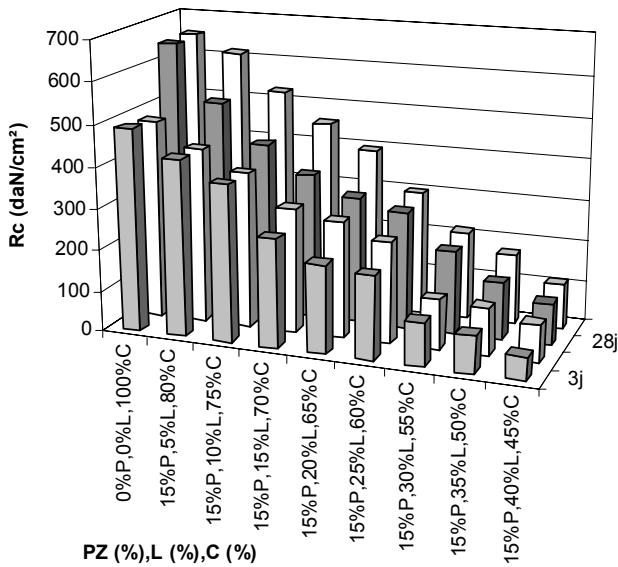


Figure 2 : Effet de la teneur en laitier sur la résistance à la compression des ciments durcis à l'état naturel ($E/(C+P+L) = 0,3$) pour 15% de pouzzolane.

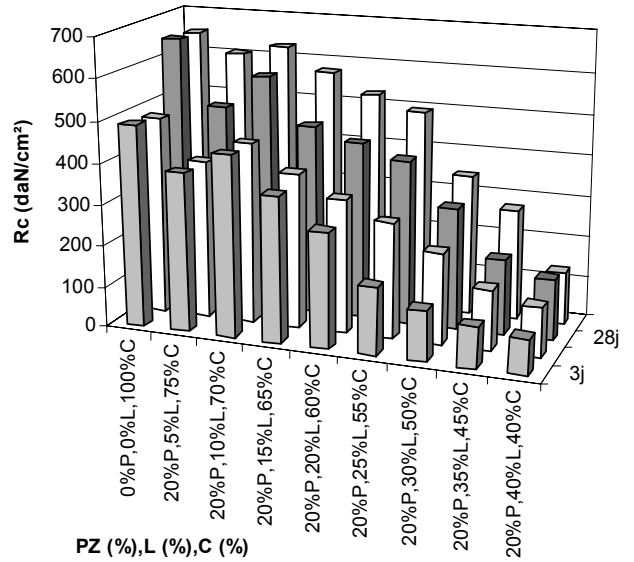


Figure 4 : Effet de la teneur en laitier sur la résistance à la compression des ciments durcis à l'état naturel ($E/(C+P+L) = 0,3$) pour 20% de pouzzolane

Au premier âge, Les liants à la pouzzolane et au laitier développent leur résistance plus faiblement que les liants témoins. En effet à 3 et 7 jours pour une substitution allant de 40 à 60 % d'addition, les résistances ne représentent que 65% par rapport au liant témoin.

Les mêmes remarques sont valables pour le durcissement par étuvage, sauf pour l'évolution rapide de la résistance après 3 jours de durcissement. Cela est du à l'accélération du processus de durcissement.

3.2 Etude de mortier normalisé

Dans cette partie, il s'agit des essais de compression, flexion et de retrait.

Le sable utilisé pour la confection du mortier est un sable normalisé. Les essais ont été effectués sur des éprouvettes de mortier de dimensions $(4 \times 4 \times 16)$ cm³ à raison de six éprouvettes par essai.

Dans tous les essais le rapport E/C est maintenu égale à 0,43 pour le béton témoin, et à 0,45 pour le béton avec ajout. Concernant les conditions de durcissement, on a procédé à un durcissement naturel (conservation à l'eau T=20°C) des éprouvettes jusqu'à leur test.

3.2.1 Influence de la quantité de pouzzolane et de laitier sur le comportement mécaniques des mortiers

Les résultats de compression, flexion et traction par flexion en fonction du pourcentage de pouzzolane et de laitier, aux différents âges sont rapportés sur les figures 5 à 7.

Les figures 5 à 7 montrent que pendant les premiers âges, la résistance est faible pour tous les échantillons.

La réaction pouzzolanique se produit par consommation de portlandite, en même temps que l'on mélange le clinker portland et le laitier de haut fourneau. Une petite réaction immédiate du laitier se produit et qui libère des ions calcium et aluminium dans la solution. Par la suite le laitier de haut fourneau réagit avec les hydroxydes alcalins puis avec l'hydroxyde de calcium libéré par le clinker pour former alors les CSH (Tutti, 1982).

Au-delà de l'âge de 28 jours (à 90 jours), le taux d'augmentation de la résistance à la compression des mortiers contenant de la pouzzolane et de laitier est de l'ordre de 86% et 68% par rapport au mortier témoin et ce pour les pourcentages (20P,10L) et (15P,15L). Ces résultats confirment la propriété latente de l'hydratation des ciments avec la pouzzolane et le laitier.

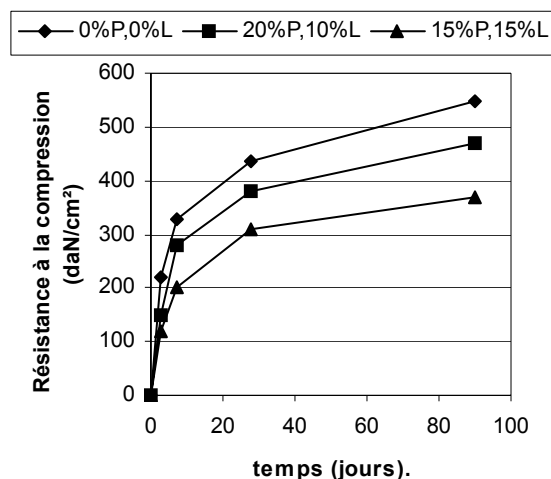


Figure 5 : Résistance du mortier à la compression en fonction du temps et du pourcentage de pouzzolane et de laitier.

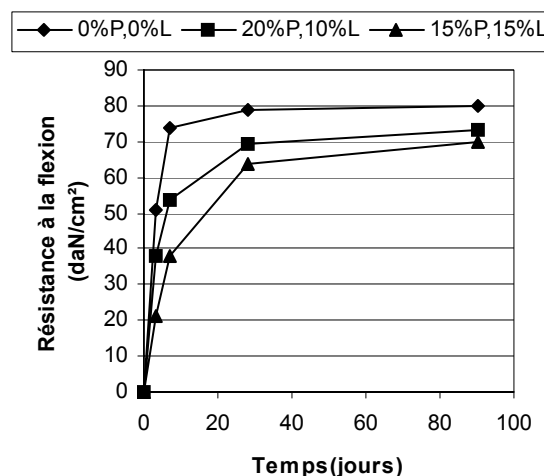


Figure 6 : Résistance du mortier à la flexion (daN/cm²) en fonction du temps et du pourcentage de pouzzolane et de laitier

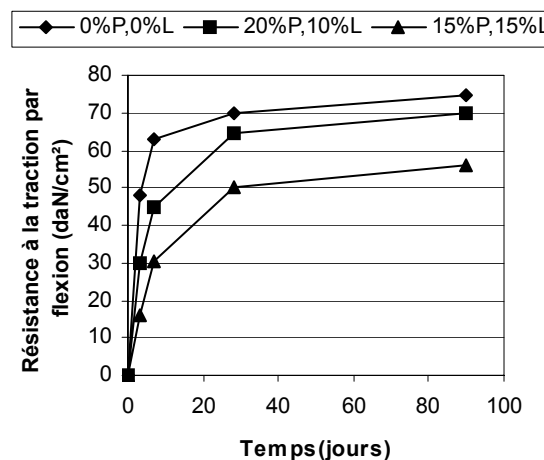


Figure 7 : Résistance du mortier à la traction par flexion (daN/cm²) en fonction du temps et du pourcentage de pouzzolane et de laitier.

3.2.2 Influence de silex sur le comportement mécanique des mortiers

L'objectif principal de cette partie est d'étudier les améliorations des résistances mécaniques de compression, flexion et traction par flexion par l'addition de silex au pouzzolane et au laitier.

Les résultats de compression, flexion et traction par flexion en fonction de pouzzolane, laitier et de silex à 28 jours sont rapportés sur la figure 8.

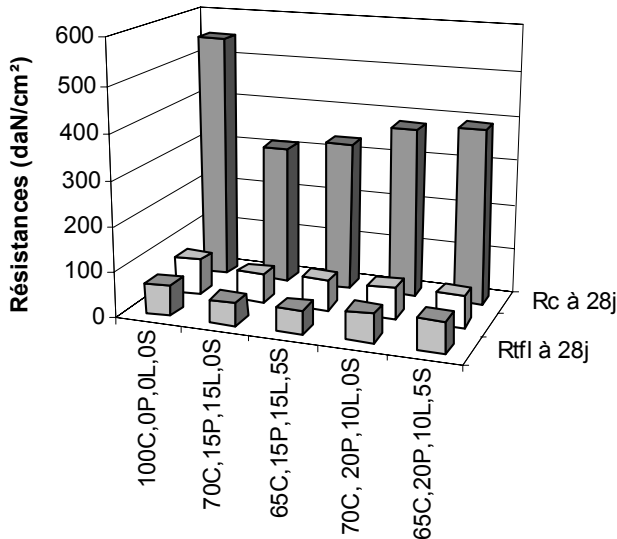


Figure 8 : Résistance du mortier à la compression, flexion et traction par flexion en fonction du temps par l'addition de pouzzolane, laitier et silex

Les résistances mécaniques à la compression, flexion et traction par flexion augmentent avec l'addition de 5% de silex. Ce phénomène peut être expliqué par le changement de la structure des pores.

3.2.3 Retrait et gonflement

Il s'agit dans cette partie d'évaluer le retrait et le gonflement que provoque le ciment étudié sur des éprouvettes en mortier à sable normalisé avec un rapport E/C égale 0,43 et 0,45 pour les mortiers avec ajout.

On compare, à différents temps, la variation de longueur et de la masse d'une éprouvette de dimensions $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$, par rapport à sa longueur et sa masse à un temps t_0 pris pour origine. Les résultats sont rapportés sur les figures 9 à 12.

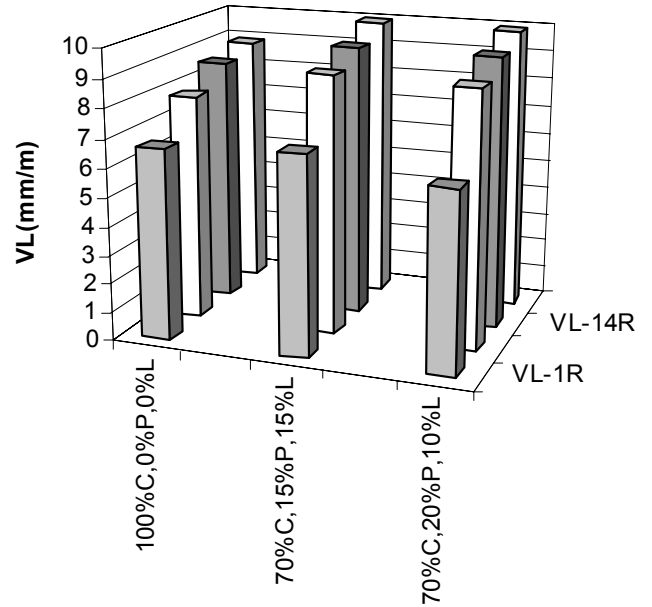


Figure 9 : Variation linéaire des mortiers en fonction du temps et du pourcentage de laitier et de pouzzolane dans le cas de retrait.

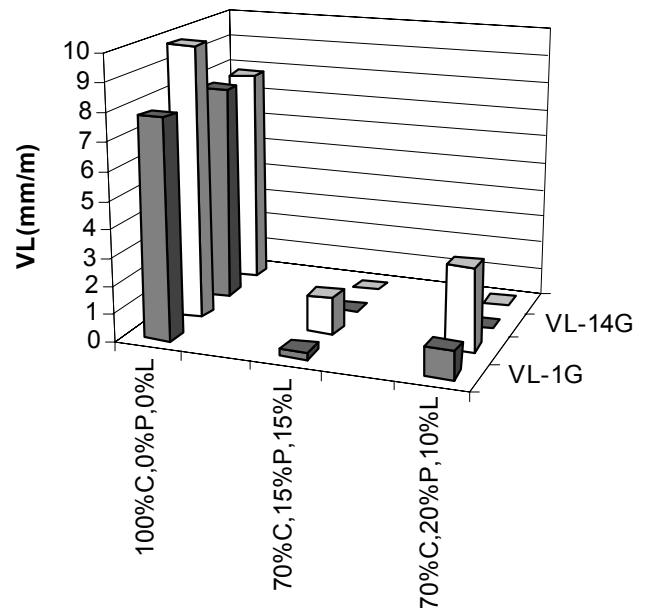


Figure 10 : Variation linéaire des mortiers en fonction du temps et du pourcentage de laitier et de pouzzolane dans le cas de gonflement.

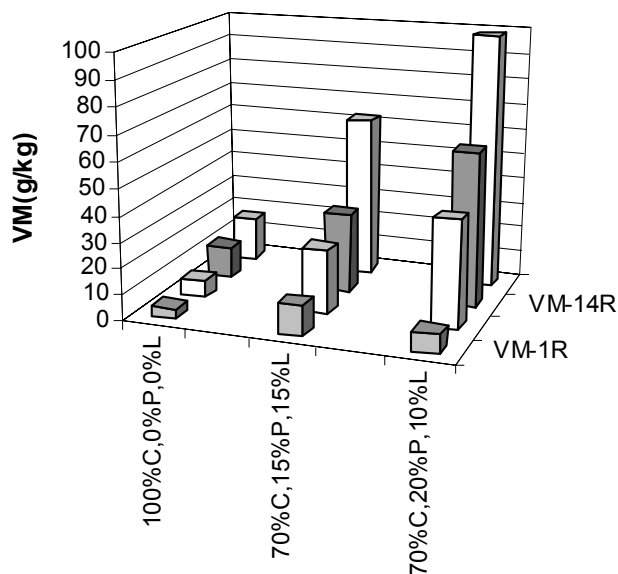


Figure 11 : Variation massique des mortiers en fonction du temps et du pourcentage de laitier et de pouzzolane dans le cas de retrait

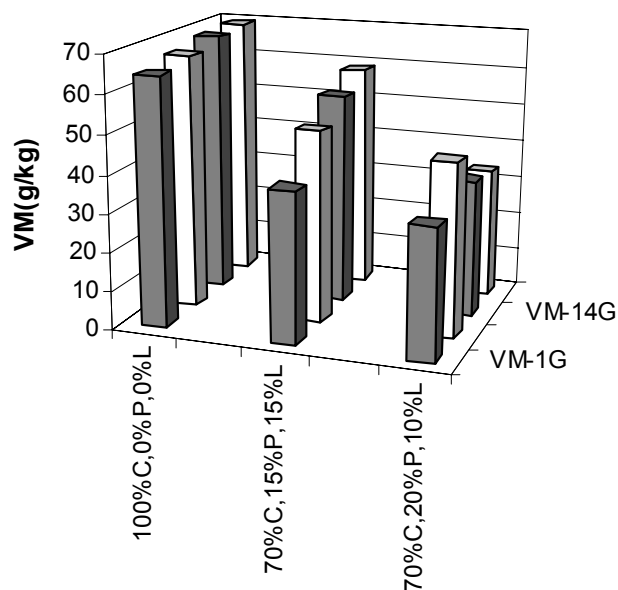


Figure 12 : Variation massique des mortiers en fonction du temps et du pourcentage de laitier et de pouzzolane dans le cas de gonflement.

La variation linéaire des éprouvettes conservées à l'air augmente avec l'augmentation des pourcentages de pouzzolane et de laitier, mais par contre, cette variation diminue lorsque les éprouvettes sont immergées dans l'eau.

La variation massique dans le milieu naturel (l'air) augmente avec l'augmentation des pourcentages de l'ajout. Par contre, dans le milieu humide, la variation massique diminue avec l'augmentation des pourcentages de l'ajout.

Les mortiers avec pouzzolane et laitier renferment des retraits plus importants que ceux du mortier témoin (sans ajout).

4 CONCLUSION

Les résultats obtenus dans cette étude expérimentale nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- L'ajout de pouzzolane et de laitier en quantité optimale (jusqu'à 35%) présente deux avantages essentiels : une bonne résistance mécanique et une meilleure économie.
- Les résistances mécaniques à la compression des pâtes des ciments durcies avec ajout et les résistances mécaniques à la compression, flexion et traction par flexion des mortiers normalisés avec ajout évoluent régulièrement avec le temps et ne présentent aucune chute de résistance.
- L'ajout de 5% de silex engendre une augmentation de résistance à la compression, flexion et traction par flexion pour les mortiers.
- La variation linéaire et massique dans les milieux naturels (l'air) augmente avec l'augmentation de pourcentage de l'ajout. Par contre, dans le milieu humide, cette variation diminue avec l'augmentation de l'ajout.

REFERENCES

- ACI 3R-87. (1994). "Ground granulated blast-furnace slag as a cementitious constituent in concrete". ACI Manual of concrete practice, part 1, materials and general properties of concrete, 16 pp.(Detroit, Michigan).
- Chang Z., Ai Qin W., Mingshu T. (1996). "The filling role of pozzolanic material". Cement and concrete research, vol 26, numéro 6, pp.943-947.
- Khelafi H., Kerdal D. (1994). "Etude expérimentale sur le comportement mécanique des mortiers contenant des fillers pouzzolaniques". Séminaire international sur la qualité du béton en climat chaud, Ghardaia, 22-24 Mars.
- Mezghiche B. (1996). "Résistance et déformabilité de Béton Basique". Premier séminaire national en génie-civil Biskra, 8-9 Décembre.
- Tuutti K. (1982). "Corrosion of steel in concrete". Swedish cement and concrete research institute, Stockholm.