

Influence des additions minérales sur la résistance mécanique des mortiers

Fatiha KAZI AOUAL-BENSLAFA^{1*}, Abdelaziz SEMCHA¹ et Djamel KERDAL²

¹Laboratoire « LabMat » Enset Oran ; BP 1523 Oran El Ménaouer, 31000 Oran, Algérie

²Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, Oran, Algérie

* Correspondance, courriel : fkaziaoual@yahoo.fr

Résumé

Les grands ouvrages tels que les tunnels sont de gros consommateurs du matériau béton dans lequel des millions de tonnes de ciment sont utilisés pour leur réalisation. La fabrication du ciment ternaire en utilisant des additions minérales (Fines Siliceuses : FS) représente double intérêt lorsque le ciment Portland n'est pas largement disponible ; d'une part cela permet de diminuer les émissions de CO₂ et d'autre part d'obtenir un liant moins coûteux. Cet article présente les résultats des résistances à la compression du mortier contenant différents pourcentages de FS. Le ciment a été partiellement remplacé par 0, 5, 10, 15 et 20 % de FS. Aussi nous avons utilisé les dosages recommandés par le fabricant à savoir 15 et 30 Kg/m³. Le rapport liant - sable et liant - eau ont été maintenu respectivement constant à des valeurs 1/3 et 0,52. Les échantillons ont été mis à la cure dans l'eau jusqu'aux échéances de l'écrasement. Des essais de résistance à la compression ont été effectués à différentes échéances 7, 28, 60 et 90 jours. Un mortier témoin (CPA + 15 % de pouzzolane naturelle) a été confectionné pour les besoins de comparaison.

Mots-clés : *grands ouvrages-tunnels, ciment ternaire, addition minérale, mortier, résistance mécanique.*

Abstract

Influence of mineral additions on the mechanical strength of mortars

The big structures such as tunnels are big consumers of concrete in which millions of tons of cement are used for their realization. The use of mineral additions (Siliceous fines: SF) in the production of cement ternary is doubly interesting when Portland cement is not widely available, in one hand it reduces CO₂ emissions and secondly to obtain a less expensive binder. This article presents the results of compressive strength of mortar containing different percentages of FS. The cement was partially replaced by 0, 5, 10, 15 and 20 % FS. The report binder to sand and binder to water ratios were maintained constant at 1/3 and 0.52 respectively. Tests of compressive strength were performed at different time 7, 28, 60 and 90 days of curing and produced a reference control mortar for comparison purposes.

Keywords : *big structures-tunnels, cement ternary, mineral additive, mortar, compressive strength.*

1. Introduction

Pour des raisons environnementales et palier au déficit dans la fabrication du ciment Portland et aussi diminuer de son coût, la recherche a mis au point un liant dans lequel sont incorporés des ressources naturels telle que la pouzzolane [1-5]. L'industrie du ciment en Algérie a incorporé dans son processus de production les résultats de ces recherches et les cimenteries du nord ouest algérien utilisent dans la fabrication de leur ciment des ajouts de pouzzolane naturelle du gisement de Bouhamidi (Région de Beni Saf, nord ouest algérien). Les ciments CPJ CEM II sont les plus utilisés aujourd'hui dans la construction en Algérie. Les ciments CPJ CEM II/A et CPJ CEM II/B contiennent respectivement un pourcentage d'ajouts variant de 6 à 20 % et 21 à 35 % (Norme algérienne NA 442 : 2000).

Il a été prouvé par différentes recherches que l'incorporation de fumée de silice et d'ajouts (pouzzolane, laitier des hauts fourneaux ou cendre volante) dans la matrice cimentaire permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques des mortiers [6] et des bétons et d'obtenir des bétons à hautes performances (BHP) [7].

Dans ce travail, nous étudions l'effet d'une addition siliceuse sur les résistances mécaniques des mortiers confectionnés. Pour cela nous avons comparé le comportement des mortiers élaborés à base de ciment contenant 15 % de pouzzolane et celui des mortiers contenant 15 % de pouzzolane et différents dosages de l'addition minérale (Fines siliceuses).

2. Caractérisation des matériaux de composition

2-1. Le ciment

Le ciment utilisé pour la confection des mortiers est un CPA CEM I 42.5. Il a une surface spécifique Blaine de $4120 \text{ cm}^2/\text{g}$ et une densité de $3,1 \text{ g/cm}^3$. Les compositions chimique et minéralogique du ciment sont données aux *Tableaux 1 et 2*.

Tableau 1 : Analyse chimique du ciment

Les composants	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Perte au feu
Les teneurs (%)	62,91	23,34	2,7	3,09	0,73	1,87	0,39

Tableau 2 : Composition minéralogique du ciment selon Bogue

Phase	Clinker				Régulateur de prise
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	gypse
Teneur (%)	56,04	23,34	1,925	9,42	04

2-2. Le sable

C'est un sable de nature calcaire concassé obtenu de la carrière de Kristel (Oran est) de dimension 0/4mm. Afin d'avoir un sable dont la courbe granulométrique se situe à l'intérieur du fuseau normalisé, nous avons procédé à une correction de la granulométrie. Les paramètres physiques du sable de carrière (après

correction), sont résumés dans le **Tableau 3**. Les courbes granulométriques des sables sont illustrées par la **Figure 1**.

Tableau 3 : Caractéristiques physiques du sable corrigé

Caractéristiques Physiques	Valeurs
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,64
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,65
Équivalent du sable visuel %	79
Équivalent du sable piston %	70
Module de finesse (MF)	2,25
Valeur du bleu méthylène « VB »	1.28
Nature	Silico-Calcaire

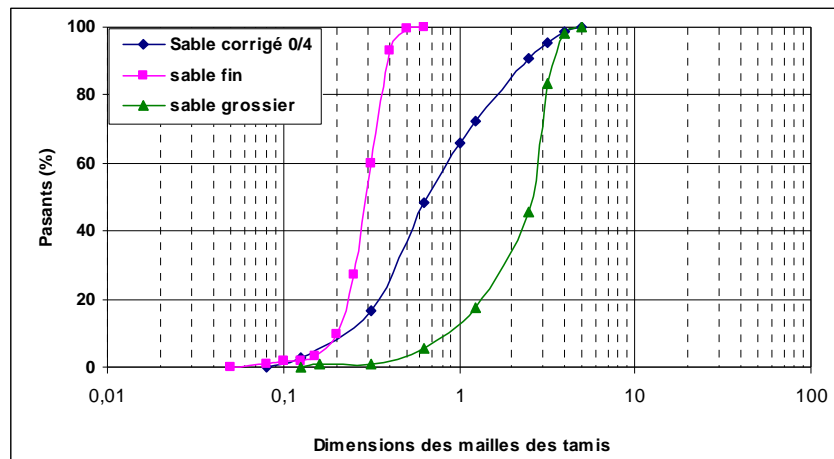


Figure 1 : Courbes granulométriques des sables

2-3. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des mortiers est l'eau potable distribuée par le réseau du service public.

2-4. L'addition minérale

L'addition minérale utilisée est une silice ultra fine issue de l'industrie de la fabrication des Ferro-silicium (Sika). Elle permet de fabriquer des BHP, BTHP, bétons résistants aux milieux agressifs, bétons pompables et des bétons projetés.

La caractérisation complète des fines siliceuses a été réalisée, à savoir l'analyse granulométrique la détermination des caractéristiques physiques et chimiques, sa teneur en verre et son indice d'activité.

Les analyses granulométriques sont réalisées par tamisage à sec sur les fractions supérieures à 80µm (NF P 94-040) et par sédimentométrie sur les fractions inférieures à 80µm (NF P 94-057). L'analyse granulométrique est illustrée par la **Figure 2**.

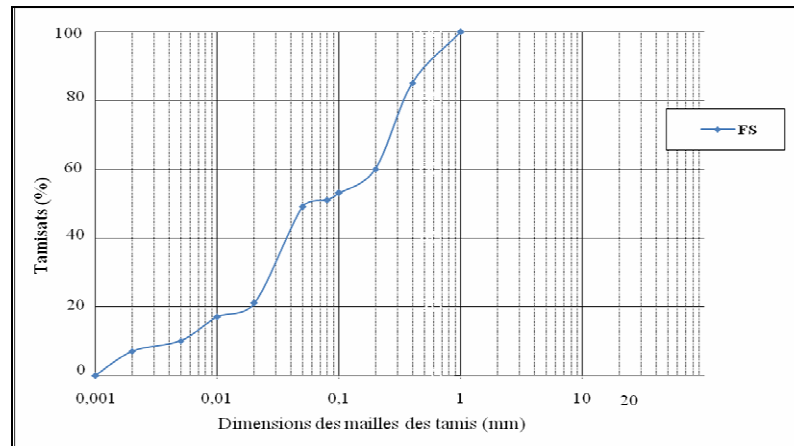


Figure 2 : *Courbe granulométrique et sédimentométrique de l'addition siliceuse*

Les échantillons de la fraction inférieure à $80\mu\text{m}$ ont été séchés dans une étuve ventilée à $(103 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à obtention d'une masse constante et refroidis en atmosphère sèche (NF X31-102). La détermination des caractéristiques physiques et chimiques de l'addition minérale a été réalisée sur les échantillons ainsi traités. Ce travail a été réalisé en collaboration avec le laboratoire des travaux publics d'Oran (LTPO), les résultats de ces analyses sont reportés au **Tableau 4**.

Tableau 4 : *Caractéristiques chimiques et physiques de l'addition minérale*

Caractéristiques		Teneurs en %
Silice	(SiO_2)	91.21
Chaux	(CaO)	2.51
Magnésie	(MgO)	0.00
Alumine	(Al_2O_3)	0.11
Oxyde de fer	(Fe_2O_3)	0.73
Sulfates	(SO_4)	0.00
Perte au feu	(PF)	2.53
Carbonates		4.54
Anhydride carbonique	(CO_2)	2.00
Eau de combinaison	(H_2O)	0.53
Masse volumique apparente	(g/cm^3)	0,60
Masse volumique absolue	(g/cm^3)	2.12
Surface spécifique Blaine	(cm^2/g)	18.000 [Kherb.,09]
Type		Ferro Silicium
Couleur		Grise

Caractérisation de la phase vitreuse

La qualité d'une addition minérale est liée à sa teneur en verre. Pour cela il suffit de calculer, à partir de la composition chimique, la différence entre les teneurs brutes en silice et en chaux (Silice-Chaux). Lorsque cette différence est inférieure à une valeur seuil de 34 %, les additions minérales ne comportent pas de phase vitreuse. Selon les compositions chimiques centésimales du tableau 4, cette différence est supérieure

à 34 % (Dron et Brivot, 1977). Cela veut dire que l'addition minérale contient une phase vitreuse appréciable.

L'indice d'activité

L'indice d'activité noté I est une caractéristique importante, il est calculé en faisant le rapport entre les résistances à la compression à 28 jours du mortier de référence sans addition minérale et celle du mortier contenant 10 % d'addition minérale siliceuse (10 % FS). L'étude de cet indice vise à évaluer l'efficacité de ces fines siliceuses utilisées comme additions minérales. Pour satisfaire la norme NF EN 13263-1(2005), les fines siliceuses doivent présenter un indice d'activité normalisé ($p = 0,10$) supérieur ou égal à 1,00 à l'échéance de 28 jours. La préparation d'éprouvettes normalisées de mortier standard et la détermination de la résistance à la compression ont été effectuées selon la méthode décrite dans l'EN 196-1. Le **Tableau 5**, donne la composition des mortiers.

Tableau 5 : Composition des mortiers

Composants	Mortier de référence	Mortier à base de FS
Sable normalisé (g)	1350	1350
Ciment CPA CEM I 42,5 (g)	450	440
Fines Siliceuses	0	45
Eau / Liant	0,52	0,52
Sédiment / Liant	0	0,10

Tableau 6 : Indice d'activité des fines siliceuses

Échéances (j)	7	28	60	90
Indice d'activité I	0,79	1,02	1,03	1,11

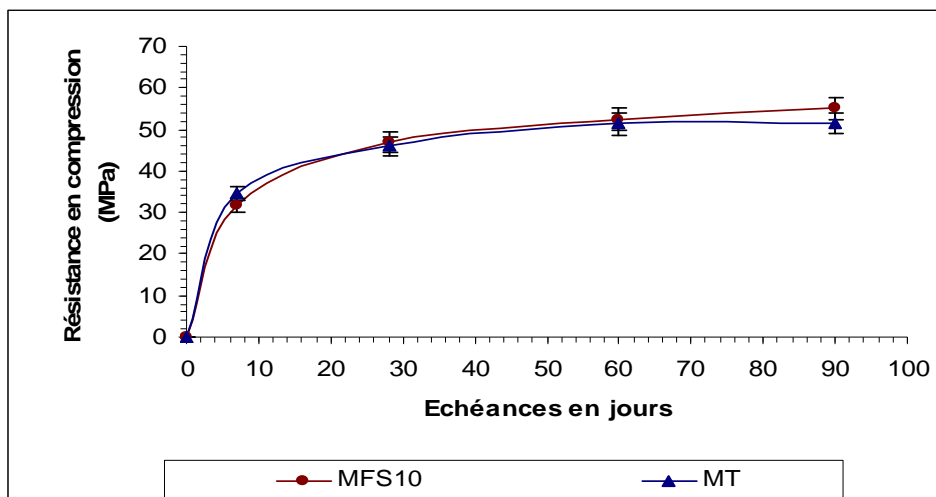


Figure 3 : Comparaison des évolutions de la résistance en compression des mortiers MT (mortier au ciment CPA) et MFS10 (mortier avec 10 % de FS : fines siliceuses)

Commentaire

A la lecture des résultats de la caractérisation des fines siliceuses, les constatations sont les suivantes :

- La teneur en verre des fines siliceuses est de 88,7 %, ce qui veut dire qu'elles contiennent une phase vitreuse, donc la possibilité de fixer la chaux libérée par le ciment [5].
- Les résultats obtenus ici (**Figure3 et Tableau6**) indiquent qu'elles ont un indice d'activité supérieur à 1, permettant alors d'envisager leur utilisation en substitution du ciment.

3. Partie expérimentale

3-1. Les mélanges étudiés

Pour cerner la réactivité des fines siliceuses, nous avons opté pour la réalisation de quatre mélanges de ciment, de pouzzolane et de fines siliceuses et un échantillon de mélange de ciment et de pouzzolane. Outre ces mélanges en utilisant les fines siliceuses (fraction fine inférieure à 80 μ m) en substitution d'une partie du ciment, nous avons incorporé les fines siliceuses avec toute la granulométrie à raison de 15 kg/m³ et 30 kg/m³. Ces proportions sont recommandées par le fabricant.

Les sept séries de mortier ainsi obtenues sont désignées respectivement par :

MT (mortier témoin : ciment CPA avec 15 % de pouzzolane naturelle), MFS5 (5 % de Fines Siliceuses), MFS10 (10 % de Fines Siliceuses), MFS15 (15 % de Fines Siliceuses), MFS20 (20 % de Fines Siliceuses), M15AS (15 kg/m³ d'Addition Siliceuse), M30AS (30 kg/m³ d'Addition Siliceuse). Les différentes proportions pour les sept séries sont données au **Tableau 7**.

Tableau 7 : Désignation des mortiers

Désignations des mortiers	% en ciment	% en Fines Siliceuses	Additions Siliceuses Kg/m3	% en pouzzolane naturelle
MT	85	0	0	15
MFS5	80	5	0	15
MFS10	75	10	0	15
MFS15	70	15	0	15
MFS20	65	20	0	15
M15AS	85	0	15	15
M30AS	85	0	30	15

3-2. Confection des éprouvettes et condition de conservation

Les éprouvettes de mortiers (1/3 de ciment + 2/3 de sable et E/L égal à 0,52) sont confectionnées selon la norme NF EN 196-1.

Pour la caractérisation de la résistance mécanique, nous avons utilisé des éprouvettes prismatiques de dimensions 40x40x160 mm³. Après 24h on opère au démoulage des éprouvettes et leur mise à la cure dans l'eau jusqu'à l'échéance de l'écrasement. Puis on réalise des essais de traction par flexion sur trois points ensuite les demi prismes obtenus sont rompus en compression à différents âges (7j, 28j, 60j et 90 jours).

3-3 Performances mécaniques

Résistance à la traction par flexion

La mesure de la résistance à la traction par flexion est effectuée sur une machine IBERTEST pourvu d'un dispositif de flexion par trois points illustrés par les **Figures 3 et 5**. La résistance est calculée selon la formule :

$$R_f = (1.5 \times F_f \times l) / b^3 \quad (1)$$

Résistance à la compression

Les essais sont effectués selon la norme NFP 15-451. Les demi prismes obtenus après rupture en flexion de l'éprouvette ont été écrasés en compression au moyen d'une presse IBERTEST illustrée par les **Figures 4 et 5**. La résistance est calculée selon la formule :

$$R_c = F_c / S \quad (2)$$

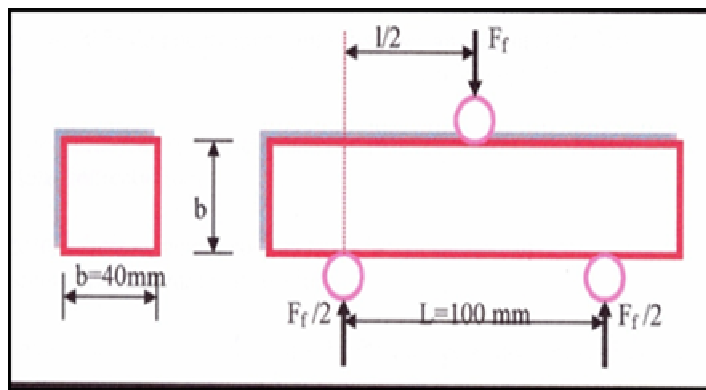


Figure 3 : Dispositif de flexion par trois points

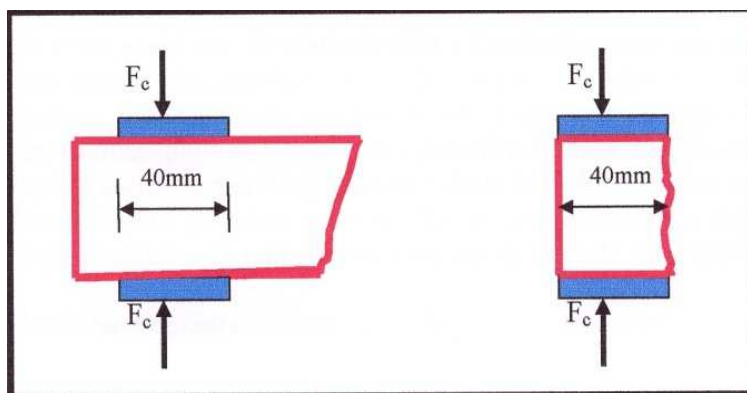


Figure 4 : Dispositif de compression



Figure 5 : Appareil IBERTEST avec les deux dispositifs d'essais (traction et compression)

4. Résultats et discussion

La comparaison des évolutions de la résistance à la compression des cinq séries de mortier est illustrée par la figure 6. Celle-ci montre clairement que toutes les courbes MFS restent inférieures à la courbe MT au jeune âge. Les courbes MFS5, MFS10, MFS15 rejoignent de près la courbe MT en la dépassant légèrement au-delà de l'échéance de 28 jours. La courbe MFS20 reste inférieure à la courbe MT pour toutes les échéances. Cela veut dire que le mortier avec les dosages de 5, 10 et 15 % FS donne à long terme, des performances mécaniques supérieures à celle du mortier témoin. Cela prouve que les fines siliceuses ont joué un rôle pour ces mortiers : ce gain de résistance est due à la forte pouzzolanité des FS qui consomme la portlandite produite par l'hydratation du ciment et à sa grande surface spécifique d'où l'effet filler entre les grains de ciment, ce qui rend la pâte de ciment plus homogène et plus compacte.

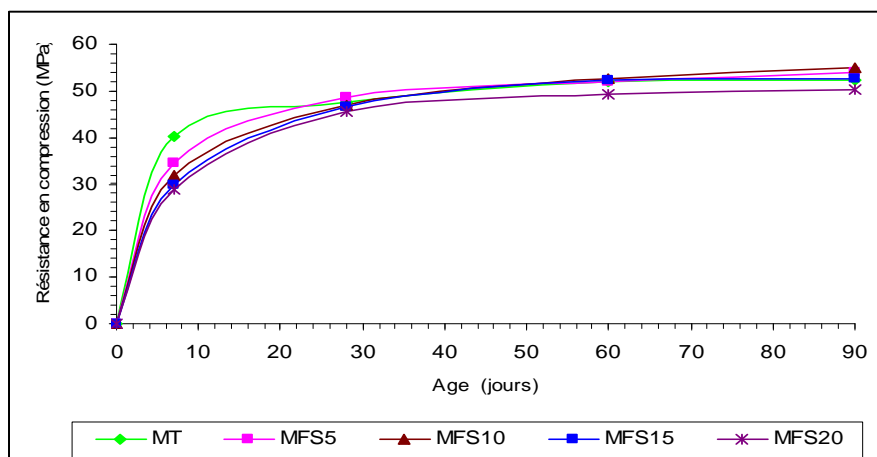


Figure 6 : Comparaison des évolutions de la résistance en compression des mortiers MT

(Mortier témoin avec 15 % de pouzzolane) et MFS5, MFS10, MFS15, MFS20 (mortier avec addition minérale à un dosage de 15 % de pouzzolane et 5, 10, 15 et 20 % de fines siliceuses)

La comparaison des évolutions de la résistance à la compression des deux autres séries de mortier est illustrée par la **Figure 7**. Celle-ci donne les résultats de la résistance en compression obtenus dans les mortiers MAS15 et MAS30 avec les dosages de l'addition minérale recommandés par le fabricant à savoir

15Kg/m³ et 30kg/m³. On observe que la courbe MAS15 reste inférieure à la courbe MT à toutes les échéances. La courbe MAS30 reste inférieure à la courbe MT et que c'est seulement au-delà de 45 jours que la courbe dépasse la courbe MT et continue d'augmenter légèrement.

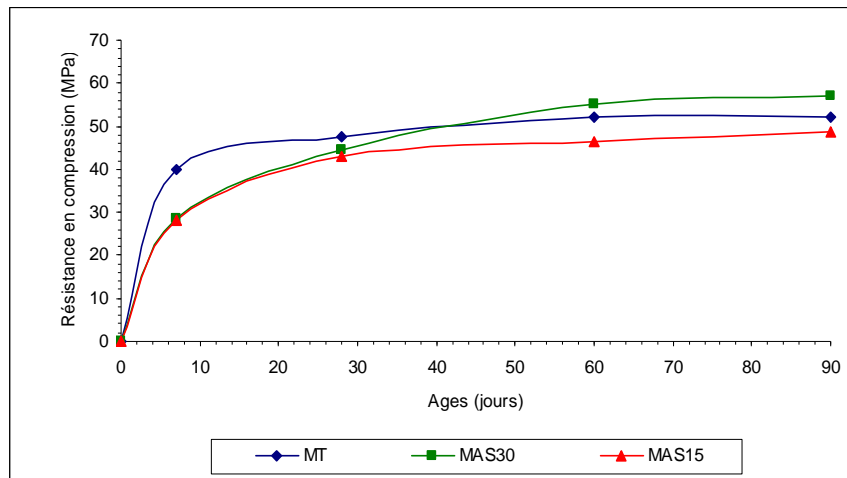


Figure 7 : Comparaison des évolutions de la résistance en compression des mortiers MT

(Mortier témoin avec 15 % de pouzzolane) et MAS15 et MAS30 (mortier avec addition minérale à un dosage de 15 % de pouzzolane et 15kg/m³ et 30kg/m³ d'addition minérale siliceuses)

La **Figure 8** montrent que les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute. Au jeune âge, les résistances sont d'autant plus faibles que le taux de FS est élevé. Cette diminution de la résistance est attribuée principalement à l'activité lente de la pouzzolane naturelle et de l'addition siliceuse. Ce phénomène s'explique par l'interaction entre la silice réactive qui se situe dans la partie vitreuse de la pouzzolane naturelle et des FS et le Ca (OH)₂ libéré par l'hydratation du CPA ce qui donne à la pouzzolane naturelle et aux FS la propriété de fixer la chaux. La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, ceci mène à une hydratation moins intense au jeune âge en induisant de faibles résistances (effet de retardateur de prise).

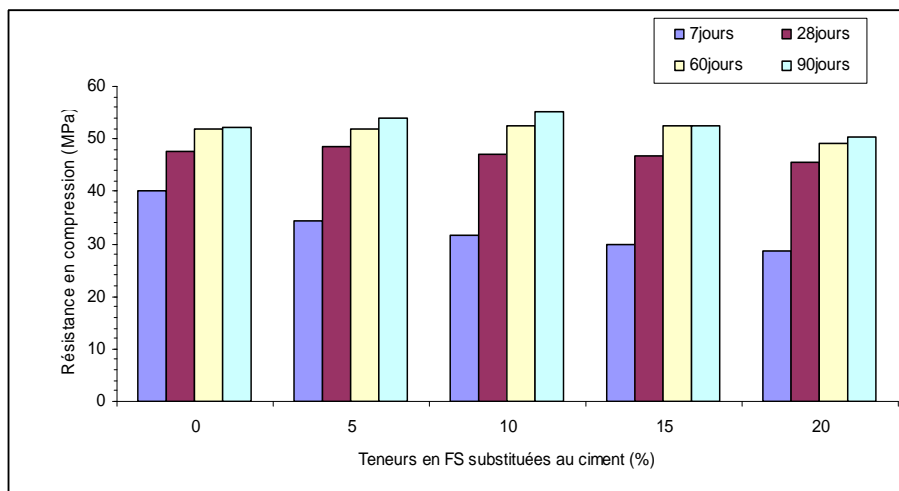


Figure 8 : Influence des FS sur les résistances en compression

L'étude de la loi d'évolution de la résistance à la compression permet de suivre l'évolution des résistances de tous les mortiers et à tous les âges par rapport à la résistance à 28 jours.

Pour mieux saisir le sens de l'évolution relative de la résistance à la compression des différents mortiers avec additions minérales, et permettre la comparaison avec le mortier témoin, nous présentons cette évolution sous forme d'histogramme donné par la **Figure 9**.

On remarque d'après cette figure que les performances mécaniques se développent dans les premiers jours de l'hydratation, plus rapidement pour le mortier témoin que pour les mortiers avec les additions minérales.

A 90 jours, on distingue que les résistances des mortiers MFS5, MFS10 et MAS30 évoluent nettement plus vite que celle du mortier de référence : c'est la pouzzolanité qui a été déterminante et a donné par conséquent de sensibles progressions de résistance à ces mortiers. Probablement qu'au-delà de 90 jours les progressions auraient été plus marquantes que celle du béton de référence.

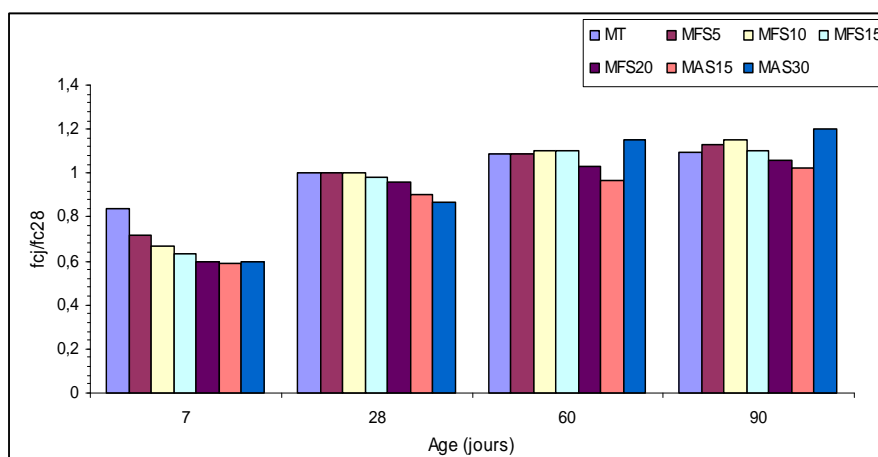


Figure 9 : Comparaison des évolutions de la résistance en compression des mortiers MT

(Mortier témoin avec 15 % de pouzzolane) et MAS15, MAS30 (mortier avec 15, 30 kg/m³ d'addition minérale siliceuse) et MFS5, MFS10, MFS15 et MFS20 (mortier avec addition minérale avec un dosage de 15 % de pouzzolane et 5, 10, 15 et 20 % de fines siliceuses).

6. Conclusion

L'intérêt majeur qui a été à l'origine de cette étude est la possibilité de produire des ciments ternaires afin de diminuer la facture énergétique et diminuer la quantité des émissions de CO₂ et de produire un liant moins coûteux. Des améliorations dans les performances mécaniques des mortiers ont été constatées avec l'ajout de l'addition siliceuse pour les dosages 5, 10 % et 30 kg/m³ en comparaison avec le mortier témoin. A cet effet la principale conclusion à laquelle on a abouti est de substituer 5 à 10 % de FS au ciment Portland contenant 15 % de pouzzolane naturelle. Ceci nous donne des résistances mécaniques supérieures à celle du mortier témoin. Le dosage 30kg/m³ qui est préconisé par le fabricant est aussi intéressant dans le cas des ciments binaires et l'utilisation de l'effet filler de l'addition minérale, les performances mécaniques trouvées sont appréciables.

Des études sont en cours pour confirmer ces résultats et optimiser le dosage des additions minérales dans les ciments ternaires pour la formulation et la fabrication des bétons à hautes performances.

Références

- [1] - I. JANOTKA and L. KRAJCI. "Utilization of natural Zeolite in Portland Pozzolana cement of increased sulfate resistance", *In durability of concrete, Proceeding, Fifth International Conference, Barcelona, Spain*, Vol.1 (2000) pp 223-236.
- [2] - N. BELAS BELARIBI, A. SEMCHA et L. LAOUFI. « Influence de la pouzzolane de Beni Saf sur les caractéristiques mécaniques des bétons » *Can J. Civ. Eng.* 30 (2003) pp 580-584.
- [3] - A. AICHOUBA. « Effets des pouzzolanes naturelles sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire » Thèse de Magister; USTMB Oran (2005), 105pp.
- [4] - L. TURANLI, B. UZAL, and F. BEKTAS. "Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural pozzolans" *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, n°12, (2004), pp. 2277-2282.
- [5] - M. BENKADDOUR, F. KAZI AOUAL et A. SEMCHA. « Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et artificielle » *Revue Nature et Technologie*, n°1 Juin (2009), pp 63-73.
- [6] - A. KERBOUCHE. "Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la durabilité des mortiers" Thèse de Magister, ENSET Oran (2009), 112pp.
- [7] - A. HOVINGTON, et M. LABRIE. « Béton projeté par voie humide avec du ciment ternaire » Bulletin d'information technique de la direction du laboratoire des chaussées, Transports Québec, Canada Vol.6, n°7, Juillet (2001), 2pp.