



## DURABILITE DES MORTIERS A BASE D'ADDITIONS SILICEUSES

Fatiha Kazi Aoual Benslafa<sup>1</sup>, Djamel Kerdal<sup>2</sup>, Farida Darkaoui<sup>1</sup>, Kheira Latroche<sup>1</sup>, Rouba Dine<sup>1</sup>, Rahma Selami<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Laboratoire <<LABMAT>>, Département Génie Civil, Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique (ENSET  
Oran), B.P. 1523 Oran El M'Naouer 31000, Algérie

[fkaziaoual@yahoo.fr](mailto:fkaziaoual@yahoo.fr)

<sup>2</sup> Université des Sciences et de la Technologie M. Boudiaf Oran (USTMBO)

Reçu le : 17/07/2010

Accepté le : 31/10/2010

### Résumé :

Pour palier au déficit de la production du ciment Portland, la préoccupation majeure de la recherche est de mettre au point des liants moins coûteux tout en préservant l'environnement (moins d'émissions de CO<sub>2</sub>). L'utilisation des additions minérales (fines siliceuses : FS) représente une voie économiquement rentable. Le travail expérimental a porté sur l'utilisation des matériaux locaux de l'ouest Algérien. A cet effet nous avons étudié l'influence des FS sur les résistances mécaniques et les performances de durabilité vis-à-vis des milieux acides des mortiers confectionnés avec différents pourcentages de FS (5%, 10%, 15% et 20 %). Les résultats obtenus sont comparés à ceux du mortier témoin. L'étude a montré une amélioration des propriétés mécaniques et de la résistance aux agressions chimiques par rapport au mortier témoin.

**Mots clé :** Mortier, Résistance mécanique, résistance aux agressions chimiques, additions minérales.

### Abstract:

Cement production in Algeria is insufficient. One of the solutions to remedy this problem is the incorporation of the mineral additions (mineral addition siliceous : SF) to Portland cement which is doubly interesting when Portland cement is not widely available, in one hand it reduces CO<sub>2</sub> emissions and secondly to obtain a less expensive binder. This experimental study has focused on the use of local materials in the region of western Algeria. This article presents the results of mechanical performance and durability against acidic environments of the mortars made containing different percentages of FS. The cement was partially replaced by 0, 5, 10, 15 and 20% FS. The results were analyzed and we compared the two mortars with addition and the mortar based on cement only. The study shows improved mechanical properties and resistance to chemical attack compared to the mortar without mineral addition siliceous.

**Keys Words:** Mortar, Mechanical properties, Resistance to chemical attack, mineral addition siliceous



## 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 (Belas et al 2003), (A. Aichouba ,2005), (Turanli et al, 2004), et (Benkaddour et al 2009). 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 (A. Kherbouche, 2009) et des bétons et d'obtenir des bétons à hautes performances (BHP) (A. Hovington et M. Labrie, 2000).

Dans ce travail, nous étudions l'effet d'une addition siliceuse sur les résistances mécaniques et celle des agressions chimiques 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. CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS

### 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 I et II.

Tableau I : Composition chimique du ciment.

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

Tableau II : Composition minéralogique du ciment selon Bogue.

Phase	Minéraux	Teneur (%)
	C <sub>3</sub> S	56,04
	C <sub>2</sub> S	23,34
	C <sub>3</sub> A	1,925
	C <sub>4</sub> AF	9,42
	CaO libre	0,5
Régulateur de prise	gypse	4

### 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 III. Les courbes granulométriques des sables sont illustrées par la figure I.

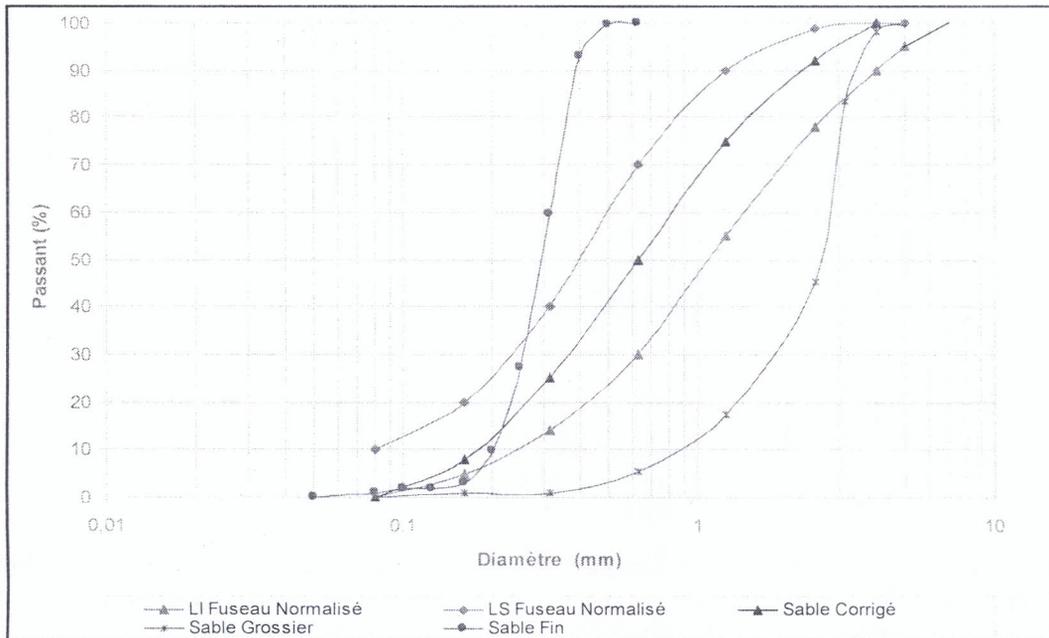


Figure 1 : Courbes granulométriques des sables

Tableau III : Caractéristiques physiques du sable corrigé.

Caractéristiques Physiques	Valeurs
Masse volumique absolue ( $\text{g/cm}^3$ )	2,64
Masse volumique apparente ( $\text{g/cm}^3$ )	1,65
Equivalent du sable visuel %	79
Equivalent du sable piston %	70
Module de finesse (MF)	2,25
Valeur du bleu méthylène « VB »	1,28
Nature	Silico-Calcaire

### 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 de ses 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  $80\mu\text{m}$  (NF P 94-040) et par sédimentométrie sur les fractions inférieures à  $80\mu\text{m}$  (NF P 94-057). L'analyse granulométrique est illustrée par la figure 2.

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 IV.

#### 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.

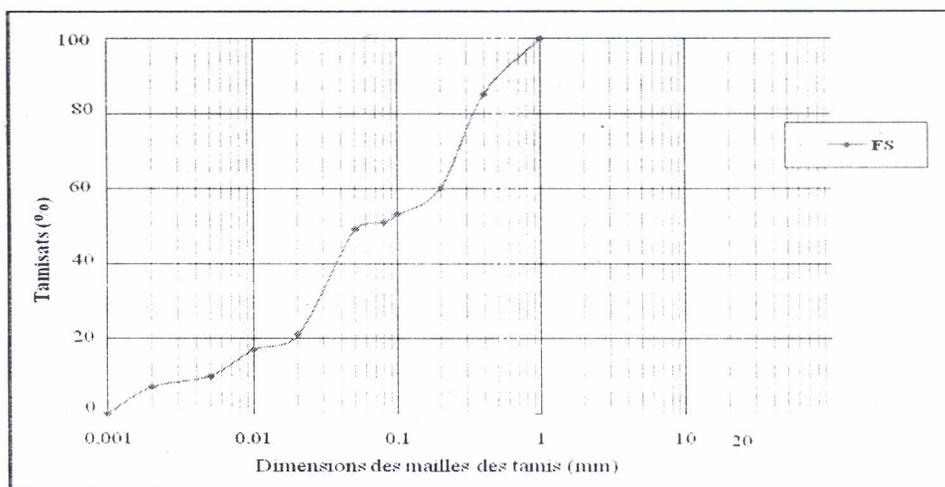


Figure 2 : Courbe granulométrique et sédimentométrique des FS.

Selon les compositions chimiques centésimales du tableau IV, cette différence est supérieure à 34% (Dron et Brivot, 1977). Cela veut dire que l'addition minérale contient une phase vitreuse appréciable.

Tableau IV : Caractéristiques chimiques et physiques de l'addition minérale

Caractéristiques	Teneurs en %
Silice (SiO <sub>2</sub> )	91.21
Chaux (CaO)	2.51
Magnésie (MgO)	0.00
Alumine (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.11
Oxyde de fer (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.73
Sulfates (SO <sub>4</sub> )	0.00
Perte au feu	2.53
Carbonates	4.54
Anhydride carbonique (CO <sub>2</sub> )	2.00
Eau de combinaison	0.53
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.12
Surface spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	18.000 [Kherbouche, 09]
Type	Ferro Silicium
Couleur	Grise

#### 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.

Tableau V: indice d'activité des FS.

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

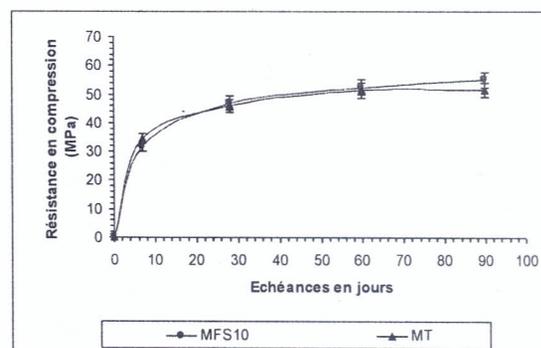


Figure 3 : Comparaison des évolutions de la résistance en compression des mortiers MT et MFS10

#### 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 [Benkaddour et al 2009].

\*Les résultats obtenus ici (figure 3 et tableau V) indiquent qu'elles ont un indice d'activité supérieur à 1, permettant alors d'envisager leur utilisation en substitution du ciment.

### 3. Programme expérimental

#### 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. Dans ces mélanges nous avons utilisé la pouzzolane et les fines siliceuses (fraction fine inférieure à 80µm) en substitution d'une partie du ciment.

Les cinq séries de mortier ainsi obtenues sont désignées respectivement par : MT (mortier témoin : ciment CPA avec 15% de pouzzolane naturelle), MFS5 (5 % de F.S), MFS10 (10 % de F.S), MFS15 (15 % de F.S), MFS20 (20% de F.S). Chaque série comporte 6 éprouvettes prismatiques (3 pour la résistance mécanique et 3 pour la résistance aux agressions chimiques). Les différentes proportions pour les cinq séries sont données au tableau VI.

Tableau VI: Désignation des mortiers

Désignations des mortiers	(%) en ciment	(%) en Fines Siliceuses	(%) en pouzzolane naturelle
MT	85	0	15
MFS5	80	5	15
MFS10	75	10	15
MFS15	70	15	15
MFS20	65	20	15

#### 3.2. Confection des éprouvettes et condition de conservation

Les éprouvettes de mortiers sont confectionnées avec les proportions suivantes : 1/3 de ciment, 2/3 de sable et E/L égal à 0,52 (Norme NF EN 196-1). Pour la caractérisation de la résistance

mécanique et la résistance aux agressions chimiques, nous avons coulé les mortiers dans des éprouvettes prismatiques de dimensions 40x40x160mm<sup>3</sup>. Après 24h on opère au démoulage des éprouvettes. La mise à la cure dans l'eau jusqu'à l'échéance de l'écrasement pour la résistance à la compression. Pour la résistance aux agressions chimiques, les éprouvettes sont mises à la cure dans l'eau pendant 28 jours ensuite ils sont immergés dans des solutions acides avec la même concentration de 3% pour les acides HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

#### 3.3 Performances mécaniques

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. La résistance est calculée selon la formule :

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

Pour la 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 au moyen d'une presse IBERTEST. La résistance est calculée selon la formule :  $R_c = F_c / S$

#### 3.4. Performances de durabilité

Selon la norme ASTM C267-96 et après immersion dans les solutions acides (HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), la perte de masse (P %) des éprouvettes a été calculée à 1, 7, 14, 21 et à 28 jours par la formule suivante :

$$P (\%) = [(M_1 - M_2) / M_1] \times 100$$

Avec M<sub>1</sub> la masse initiale de l'échantillon et M<sub>2</sub> la masse de l'échantillon après l'attaque à différentes échéances.

### 4. Résultats et discussion

#### 4.1. Les résistances mécaniques

La comparaison des évolutions de la résistance à la compression des cinq séries de mortier est illustrée par la figure 4.

Celle-ci montre clairement qu'au jeune âge toutes les valeurs de la résistance en compression des mortiers MFS restent



inférieures à celle du mortier MT. Cette diminution de la résistance est attribuée principalement à l'activité lente de la pouzzolane naturelle et de l'addition siliceuse. Au jeune âge, les résistances sont d'autant plus faibles que le taux de FS est élevé. On remarque aussi que les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge, et ne présentent aucune chute.

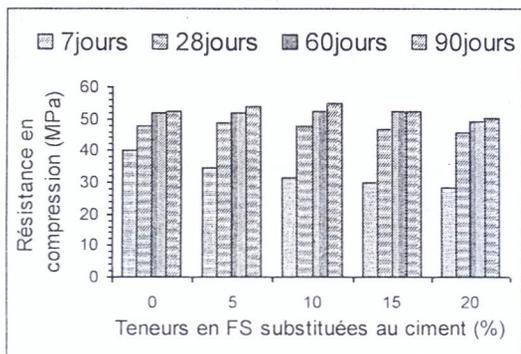


Figure 4 : Influence des FS sur les résistances en compression

A l'échéance de 28 jours, la résistance à la compression des mortiers MFS5, MFS10, rejoint de près celle du mortier MT, en la dépassant légèrement au-delà de cette échéance. Cela veut dire que le mortier avec les dosages de 5% et 10% de 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. Le gain de résistance est dû à l'interaction entre la silice qui se situe dans la partie vitreuse des FS et le  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  libéré par l'hydratation du ciment. La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, ceci mène à une hydratation moins intense en induisant de faibles résistances (effet de retardateur de prise).

La résistance à la compression du mortier MFS15 avoisine celle du MT sans toutefois la dépasser. Celle du MFS20 reste inférieure à celle du mortier MT pour toutes les échéances.

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 illustrée par la figure 5.

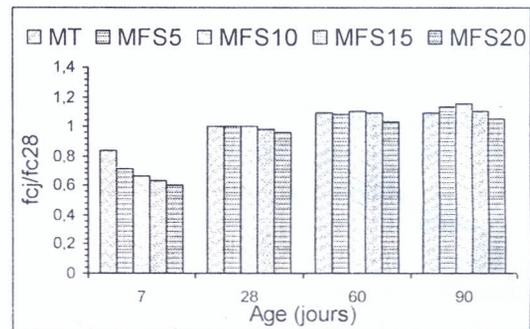


Figure 5 : Comparaison des évolutions de la résistance en compression des mortiers MT et MFS5, MFS10, MFS15 et MFS20.

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 évoluent nettement plus vite que celle du mortier de référence : c'est la réaction pouzzolanique 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 mortier de référence.

#### 4.2. La durabilité

On constate une perte de masse permanente à compter du premier jour jusqu'à 28 jours d'immersion dans les solutions acides. Après 24h jusqu'à 28 jours, les différents mortiers MFS augmentent leurs aptitudes à résister aux attaques acides en fonction du pourcentage de FS.



\* Pour les mortiers contenant 5%, 10 %, 15 % et 20 % de F.S et immergés dans l'acide HCl, le gain en masse est de 8,5%, 9,5 %, 12% et 14% respectivement par rapport au mortier témoin.

\* Pour les mortiers contenant 5%, 10 %, 15 % et 20 % de F.S et immergés dans l'acide H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, le gain en masse est de 13 %, 13,8 %, 14,7% et 16 % respectivement par rapport au mortier témoin. Les figures 6 et 7 représentent les courbes de perte de masse en fonction du temps d'immersion pour les différents mortiers soumis aux attaques des acides HCl (figure6) et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (figure7)

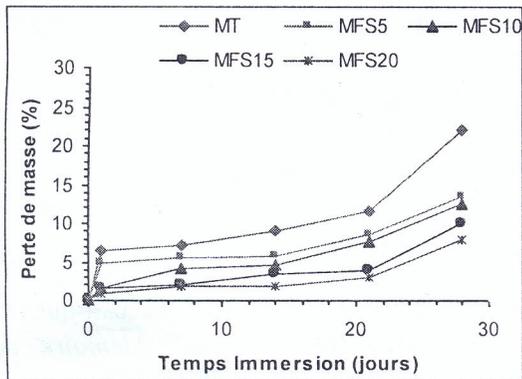


Figure 6 : Perte de masse en fonction du temps d'immersion pour l'acide HCl

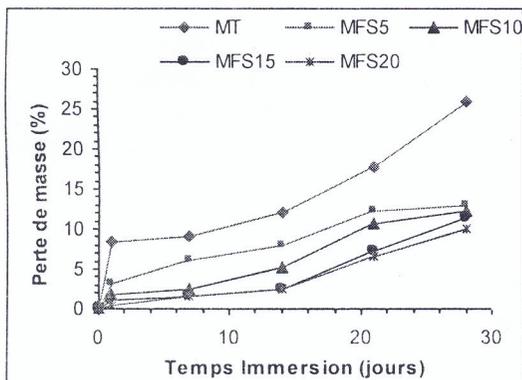


Figure 7: Perte de masse en fonction du temps d'immersion pour l'acide H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

La perte de masse est due au fait que le ciment, après hydratation a libéré une partie considérable d'hydroxyde de calcium libre (CH) qui peut être lixiviée à l'extérieur quand elle est soumise à l'attaque des acides. Pour le mortier en contact avec l'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>),

l'hydroxyde de calcium réagit avec ce dernier pour former le sulfate de calcium, qui est déposé comme gypse.

La couche du gypse précipitée est facilement lixiviée ayant pour effet une perte de masse importante. Pendant que l'attaque se poursuit, tous les composants du ciment sont par la suite décomposés et lixiviés. En outre le sulfate de calcium constitué par la première réaction va réagir avec la phase d'aluminat de calcium dans le ciment pour former le sulfoaluminat de calcium hydraté (ettringite), qui après cristallisation, peut causer l'expansion du mortier.

On remarque que l'incorporation des additions minérales augmente la résistance chimique des mortiers dans les milieux agressifs, comme il a été mise en évidence par plusieurs recherches (Benkaddour & al 2009; Kherbouche, 2009). Dans les ciments avec ajouts (pouzzolane + F.S), la quantité de CSH étant de manière significative moins importante que dans le ciment avec pouzzolane seule, cela est dû à des réactions de dissolution – précipitation (ou réaction pouzzolanique) qui permettent de fixer la chaux. Par conséquent, les pores capillaires sont réduits par formation de gel CSH, bloquant ainsi l'absorption de la solution acide, d'où la réduction de la perte de masse.

La résistance à la compression résiduelle à 28 jours après les attaques des acides a été mesurée, elle est illustrée par la figure 8.

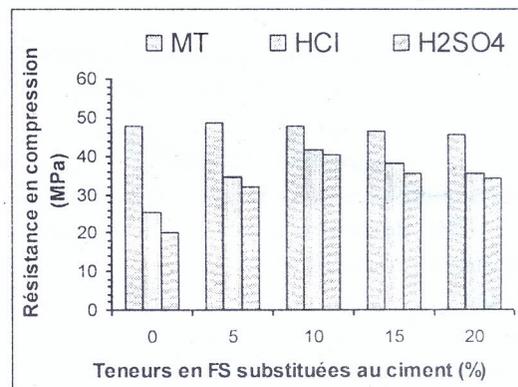


Figure 8 : Influence des FS sur les résistances en compression après les attaques chimiques. Dans cet histogramme (figure 8) la résistance à la compression des mortiers



soumis aux attaques chimiques est comparée à celle du mortier témoin non soumis aux attaques chimiques. On remarque que l'ajout de FS augmente la résistance à la compression de tous les mortiers. On remarque aussi que le pourcentage 10% de FS donne les meilleurs résultats.

L'apport des F.S, sans tenir compte de leur contribution du point de vue économique et environnementale, se manifeste par :

\*La fixation de l'hydroxyde de calcium par l'ajout actif,

\*La diminution de la porosité de la pâte de ciment durcie, ce qui freine la pénétration des agents agressifs.

\*L'augmentation de la résistance à la compression résiduelle.

## 5. Conclusions

Les résultats obtenus dans cette étude nous ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

1-Les fines siliceuses contiennent une phase vitreuse (Silice (%) – Chaux (%) = 88,7%) donc la possibilité de fixer la chaux libérée par le ciment. Elles ont un indice d'activité supérieur à 1 ( $I_{\text{fines siliceuses}} = 1,02$ ) permettant alors d'envisager leur utilisation en substitution du ciment.

2-L'addition de 10% de fines siliceuses augmente la résistance à la compression à long terme, car elles donnent naissance à un second C-S-H qui améliore le remplissage des pores.

3-L'addition de fines siliceuses améliore le comportement des mortiers soumis aux attaques des acides HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

4-Nous préconisons l'ajout de 10 % de fines siliceuses dans le ciment (CPA CEM I + 15% de pouzzolane) pour obtenir des mortiers résistants et durables.

Toutefois des études complémentaires doivent être menées pour confirmer nos résultats et rechercher le meilleur pourcentage économiquement rentable.

## 6. Références bibliographiques

[1] Belas Belaribi, N. ; Semcha, A. et Laoufi, L. 2003 « Influence de la pouzzolane de Beni Saf sur les caractéristiques mécaniques des bétons» *Can J. Civ. Eng.* 30 : pp 580-584 (2003).

[2] Aichouba, A. 2005, « Effets des pouzzolanes naturelles sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire » *Mémoire de Magister; USTMB Oran (2005), 105pp.*

[3] Turanli, L.; Uzal, B. and Bektas, F. 2004 "Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural pozzolans" *Cement and Concrete Research, (2004), Vol. 34, n°12, pp. 2277-2282.*

[4] Benkaddour, M.; Kazi Aoual, F. et Semcha, A. « Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et artificielle » *Revue Nature et Technologie, n°1 Juin 2009, pp 63-73.*

[5] Kerbouche, A. "Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la durabilité des mortiers" *Mémoire de Magister, ENSET Oran 2009, 112pp.*

[6] Hovington, A. et Labrie, M. « 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.*