
Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle

Mokhtaria BENKADDOUR⁽¹⁾, Fatiha KAZI AOUAL⁽¹⁾, Abdelaziz SEMCHA⁽¹⁾

(1) Laboratoire <<LABMAT>>, Département Génie Civil, Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique (ENSET Oran), B.P. 1523 Oran El M'Naouer 31000, Algérie
mimi070784@yahoo.fr, fkaziaoual@yahoo.fr

RÉSUMÉ. La recherche d'un liant moins coûteux en utilisant des déchets industriels (laitier, cendre volante) ou de ressources naturelles (pouzzolane naturelle) est devenue une préoccupation majeure pour pallier le déficit dans la fabrication du ciment Portland. Ce travail expérimental a porté sur l'utilisation des matériaux locaux de la région ouest. A cet effet nous avons étudié l'effet de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf (gisement de Bouhmidi) et la pouzzolane artificielle à base de la vase calcinée de barrage Ferrgoug (Mascara) sur les résistances mécaniques et les performances de durabilité vis-à-vis des milieux acides des mortiers confectionnés. Les résultats ont été analysés et nous avons comparé les deux mortiers avec ajout et le mortier avec ciment seul. L'étude a montré une amélioration des propriétés mécaniques et de la résistance aux agressions chimiques par rapport au mortier sans ajout.

MOTS-CLÉS : mortier, résistance mécanique, agressions chimiques, pouzzolane, vase calcinée.

1. Introduction

Pour pallier le déficit dans la fabrication du ciment Portland et diminuer son coût, la préoccupation de la recherche et de mettre au point un liant dans lequel sont incorporés des déchets industriels (laitiers ou cendre volante) (Gherdaoui C et Benmalek MI, 2007) ou des ressources naturelles telles que la pouzzolane. L'incorporation de ces ajouts minéraux actifs et inertes dans des bétons permet d'améliorer les caractéristiques de ces derniers comme il a été mis en évidence dans plusieurs recherches.

Dans cet article nous étudions l'effet de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf (gisement de Bouhmidi) et la pouzzolane artificielle à base de la vase calcinée de barrage Ferrgoug (Mascara) sur les résistances mécaniques et les performances de durabilité vis-à-vis des milieux acides des mortiers confectionnés. Pour cela, nous avons comparé le comportement des mortiers élaborés à base de ciment seul (CPA 42.5) et celui des mortiers contenant différents dosages de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle.

2. Caractérisation des matériaux entrant dans la composition des mortiers :

Les mortiers sont composés de deux matériaux le liant (ciment) et le sable mélangés à l'eau. Dans certaines compositions une partie du ciment peut être remplacée par d'autres matériaux tels que la pouzzolane naturelle ou artificielle.

2.1. le ciment

Le ciment utilisé pour la confection des mortiers est un CEM I 42.5. Il a une surface spécifique Blaine de 3585cm²/g et une densité de 3,2. La composition chimique et celle minéralogique selon les formules de Bogue sont données par les tableaux 1et 1' respectivement.

Tableau 1: Composition chimique du ciment.

Oxydes	%
SiO ₂	22.07
CaO	63.83
Al ₂ O ₃	6.41
Fe ₂ O ₃	4.16
MgO	0.21
SO ₃	1.49
PF	1.73
Total dont :	99 .89
- SiO ₂ non combinée	92.29
- CaO Libre	0.16

Tableau 1' : Composition minéralogique selon Bogue.

Phase	Clinker			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Teneur (%)	38.09	34.62	9.95	12.65

2.2. le sable

C'est un sable de nature calcaire concassé obtenu de la carrière de Kristel (Oran est) de dimension 0/3mm. 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 en mélangeant 40% de sable de mer et 60 % de sable de carrière (fig 1). Ses paramètres physiques sont résumés dans le tableau 2 :

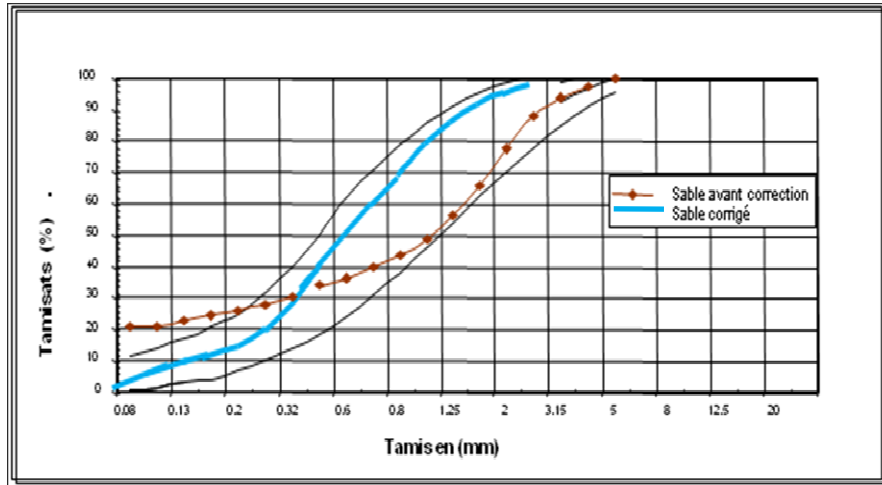


Figure 1: Courbes granulométriques du sable.

Tableau 2 : caractéristiques physiques du sable de carrière de KRISTEL

Paramètres physiques		valeurs
Masse volumique absolue (g/cm ³)		2.64
Masse volumique apparente (g/cm ³)		1.6
Coefficient d'uniformité C _u		10.62
Coefficient de courbure C _c		1.8
Equivalent de sable	Visuel (%)	76.96
	Piston (%)	69
Module de finesse		2.27
Pourcentage de fines (%)		10
Valeur du bleu méthylène « VB »		1.27

2.3. Les pouzzolanes (naturelles et artificielles)

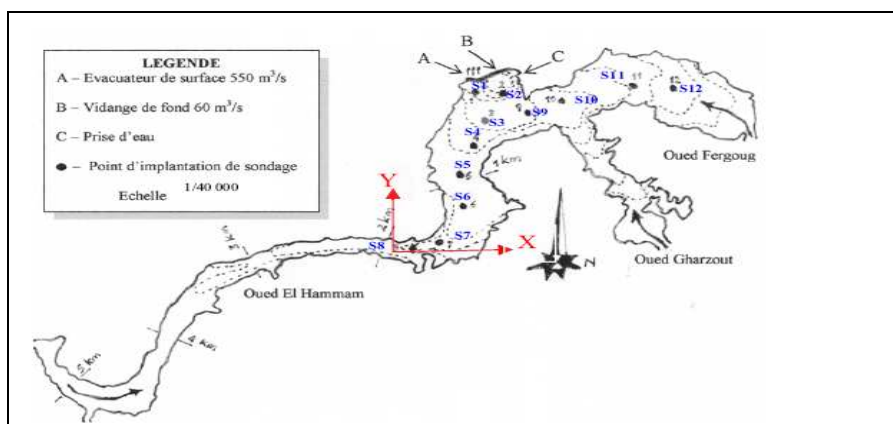


Figure 2 : barrage du Fergoug.

Toute la quantité de la vase utilisée est prélevée dans la zone de rejet en aval de barrage de Ferrgoug. Nous avons préparé une pouzzolane artificielle en suivant les étapes suivantes :

- Après séchage en étuve à 105°C les vases ont été broyées et tamisées par voie sèche. Les tamisât qui passent à 80µm et qui représentent plus de 95% du prélèvement sont récupérés pour la cuisson. La calcination a été effectuée par petites quantités, en fonction de la capacité des fours disponibles.
- Les opérations de cuisson ont nécessité certaines précautions : pour éviter les chocs thermiques la vitesse de cuisson a été réglée à 7° par minute, la température de calcination 750°C, le maintient à une température constante pendant 1heure (A. Semcha 2003, 2006).
- Le produit ainsi obtenu (vase calcinée) a été conservé à l'abri de l'air et de l'humidité.

La pouzzolane naturelle utilisée est de provenance du gisement de Bouhmidi (Béni-Saf), extraite à la côte 210m. Elle nous a été fournie par la cimenterie de Zahana en quantité suffisante pour nos besoins à l'élaboration du plan expérimental. Toute la pouzzolane utilisée comme substituant au ciment est homogénéisée, séchée, concassée et réduite en poudre (80µ) à l'aide d'un micro broyeur.

La détermination des caractéristiques physiques et chimiques des pouzzolanes naturelles et artificielles a été réalisée en collaboration avec le laboratoire national des travaux publics d'ouest (LTPO). Les résultats de ces analyses sont reportés aux tableaux 3 et 4 pour la pouzzolane naturelle et aux tableaux 5 et 6 pour la pouzzolane artificielle.

Un matériau a la caractéristique d'une pouzzolane si :

- Sa composition chimique vérifiée : $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 > 70\%$ (ASTM C 618)
- Son indice d'activité **I** est : $0,67 < I < 1$.
- Sa teneur en verre $> 34\%$

Tableau 3 : Caractéristiques physiques de la pouzzolane naturelle [ENSET-LTPO].

Caractéristiques physiques	valeurs
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.98
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.75
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3560
Pouzzolanité (%)	85
Absorption (%)	58.70
Porosité (%)	57.10
Humidité (%)	2.50
Perte au feu (%)	5.60

Tableau 4 : Caractéristiques chimiques de la pouzzolane naturelle

Les composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₄	Cl	P.F	Total
Les teneurs (%)	74.48	12.83	1.51	3.92	0.34	Nul	Nul	0.21	100.29

Tableau 5 : Caractéristiques chimiques de la vase calcinée

Les composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₄	carbonate s	CO ₂	H ₂ O
Les teneurs (%)	83.1	3.67	9.92	0.46	0.14	Nul	4.64	2.04	0.87

Tableau 6 : Caractéristiques physiques de la vase calcinée.

Caractéristiques	valeurs
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.26
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.63
Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)	6238.65

L'indice d'activité :

C'est une caractéristique importante. Elle est calculée en faisant le rapport entre les résistances à la compression à 28 jours du mortier sans vase (T) et celle du mortier contenant 25% de vase (25 PA) en substitution par le biais de la formule suivante :

$$I = R_{c28 T} / R_{c28 25PA}$$

La teneur en verre :

La qualité d'une pouzzolane 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 pouzzolanes ne comportent pas de phase vitreuse. Selon les compositions chimiques centésimales des tableaux 4 et 5, cette différence est supérieure à 34% pour les deux types de pouzzolanes. Cela veut dire que nos pouzzolanes sont acides et contiennent une phase vitreuse, donc possibilité de fixer la chaux libérée par le ciment

	Pouzzolane naturelle	vase calcinée
L'indice d'activité	0.82	0.73
La teneur en verre (%)	37.43	73.24

Commentaire :

Une première constatation est faite après la lecture des résultats de caractérisation de la pouzzolane artificielle à savoir : Les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques de la vase calcinée comparées à celles relatives à la pouzzolane naturelle de Béni-Saf laissent apparaître des similitudes de composition chimique, ce qui conduit à lui attribuer le caractère d'une pouzzolane artificielle.

3. Protocole expérimental**3.1 Confection des éprouvettes et condition de conservation**

Deux types des éprouvettes de mortiers (1/3 de ciment + 2/3 de sable) sont confectionnés selon la norme NF EN 196-1. Dans le premier type d'éprouvettes nous avons incorporé de la pouzzolane naturelle à différents

dosages (0%, 10%, 20% et 30%). Dans le deuxième type d'éprouvettes, la pouzzolane artificielle a été incorporée avec les mêmes dosages.

Pour la caractérisation de la résistance mécanique les éprouvettes sont de dimension 40x40x160mm³ et de dimension 50x50x55 mm³ pour la résistance chimique. Après démoulage à 24h et une cure sous l'eau de 28 jours.

Les premiers (40x40x160mm³) ont subi des essais de traction par flexion puis les demi-prismes obtenus ont été rompus en compression à différents âges (2j, 7j et 28j).

Les deuxièmes 50x50x55 mm³ sont mises en solution acide de même concentration 5% HCl et 5% H₂SO₄. Des essais de mesure de masse sont effectués à 1j, 7j, 14j, 21j et à 28 jours selon la norme ASTM C267-96.

Les sept séries de mortier ainsi obtenus sont désignés respectivement par : T (témoin), 10PN (10% de pouzzolane naturelle), 20PN (20 % de pouzzolane naturelle), 30PN (30 % de pouzzolane naturelle), 10PA (10% de pouzzolane artificielle), 20PA (20 % de pouzzolane artificielle), 30PA (30 % de pouzzolane artificielle).

3.2 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 tels que schématisés sur les figures 3 et 4. La résistance est calculée selon la formule :

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

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 rompus en compression au moyen d'une presse d'écrasement **IBERTEST** (figures 5). La résistance est calculée selon la formule : $R_c = F_c / S$

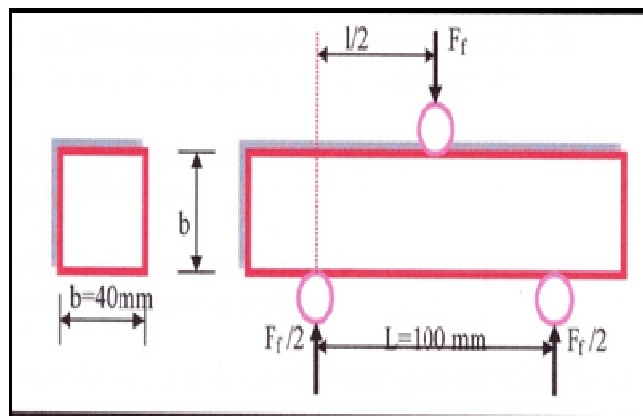


Figure 3 : dispositif de flexion par trois points.



Figure 4 : dispositif pour l'essai de la résistance à la flexion (Appareil BERTEST).

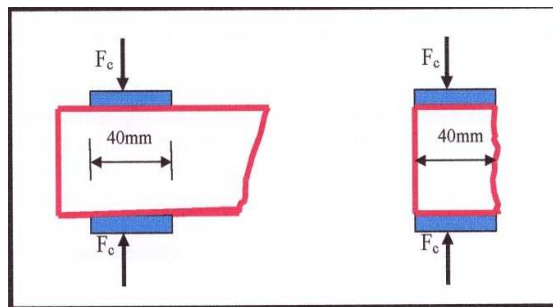


Figure 5 : dispositif de flexion par trois points.



Figure 6 : dispositif pour l'essai de la résistance à la compression (Appareil BERTEST).

4. Résultats et interprétations :

4.1 La résistance à la traction :

Le tableau 7 présente les R_f des PA et des PN à différents âges.

Tableau 7: résistance à la traction par flexion des PA et PN.

Pourcentage d'ajout (%)	Résistance à la traction par flexion (MPa)					
	2j		7j		28j	
	PN	PA	PN	PA	PN	PA
0	4,63	4,63	6,71	6,71	8,71	8,71
10	3,83	4,03	5,72	6,05	7,14	8,02
20	3,16	3,50	5,18	6,02	6,74	6,45
30	2,42	2,70	4,29	4,94	5,93	6,28

4.1 La résistance mécanique

Les différents résultats sont représentés en figure 7 pour les PA (pouzzolane artificielle), figure 8 pour les PN (pouzzolane naturelle) et l'évolution de la R_c de tous les mortiers en figure 9.

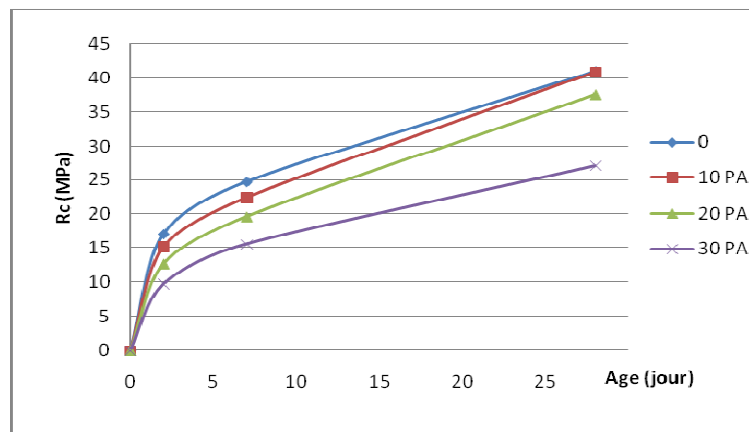


Figure 7: Evolution de R_c des PA en fonction de l'âge

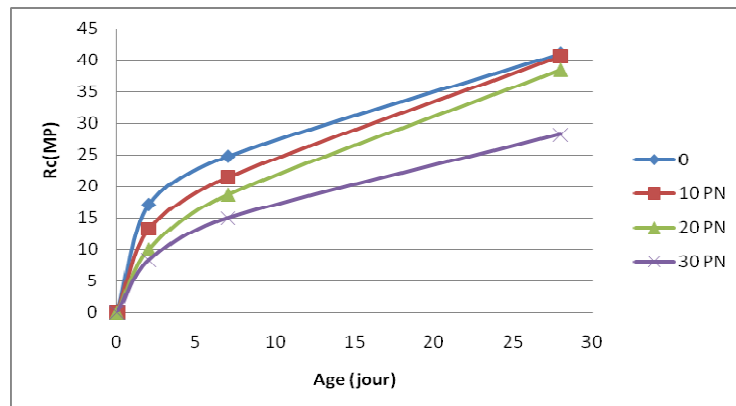


Figure 8: Evolution de R_c des PN en fonction de l'âge

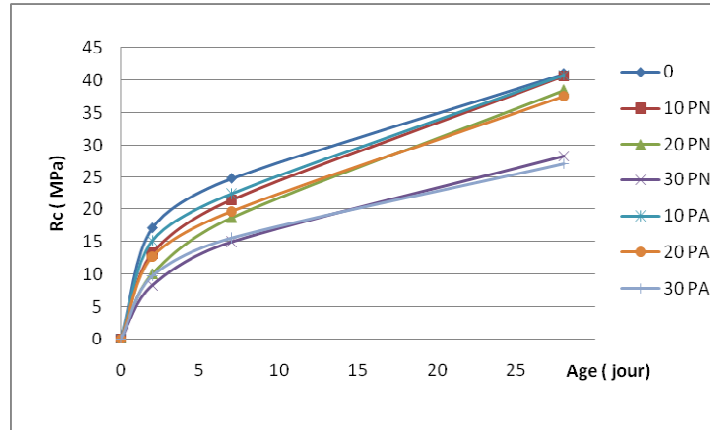


Figure 9 : Evolution de la résistance mécanique des différents mortiers (PA et PN) en fonction de l'âge.

L'analyse des différents graphes (figures 3, 4 et 5) permet d'apporter les commentaires suivants :

- Les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute.
- La résistance à la compression diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage d'ajout au jeune âge surtout à 2j, 7j et 28 jours. A titre d'exemple, un remplacement du ciment par 30% de PA (la vase calcinée) diminue la résistance à la compression de 41.68%, 26.31% et 19.74% à 2j, 7j et 28 jours respectivement (figure 7), aussi la substitution de 30% de PN diminue la résistance à la compression de 36.68%, 6.16% et 24.45% à 2j, 7j et 28 jours respectivement (figure 8). Ces résultats sont prouvés par (Ghrici et al, 2005) et (Boumediene, 1999).
- La résistance à la compression de 10PA et de 10PN rejoint celle du T à 28 jours, nous recommandons de comparer leurs comportements à plus long terme.
- La différence de la résistance à la compression des mortiers qui contiennent de 10% à 30% de la pouzzolane naturelle et ceux qui contiennent de 10% à 30% de la vase calcinée ne dépasse pas 5% quelque soit l'âge (figure 9).

Cette diminution de la résistance est attribuée principalement à l'activité lente de la pouzzolane naturelle et pouzzolane artificielle (la vase calcinée). Ce phénomène s'explique par l'interaction entre la silice réactive qui se situe dans la partie vitreuse de la pouzzolane naturelle et artificielle et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libéré par l'hydratation du CPA ce qui donne à la pouzzolane naturelle et artificielle la propriété de fixer la chaux. La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, ceci mène à une hydratation moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances (effet de retardateur de prise).

4.2 Durabilité

Après 24h jusqu'à 28 jours les différents PN et PA augmentent leurs aptitudes à résister aux attaques acides.

On constate une perte de masse permanente à compter de 1 jour jusqu'à 28 jours d'immersion dans les acides.

- Pour les mortiers contenant 10%, 20% et 30% de P.N et immergés dans HCl la réduction de la perte de masse est de 44.6%, 54.63% et 45.61% respectivement. Et pour ceux immergés dans H_2SO_4 la réduction de la perte de masse est de 21.66%, 61.02% et 65.89% respectivement par rapport au mortier témoin.
- Pour les mortiers contenant 10%, 20% et 30% de P.A et immergés dans HCl la réduction de la perte de masse est de 24.76%, 33.5% et 30.98% respectivement. Et pour ceux immergés dans H_2SO_4 la réduction de la perte de masse est de 48.70%, 75.38% et 84.80% respectivement par rapport au mortier témoin.

Les figures 10 et 11 nous reportent la comparaison entre les différents mortiers immergés dans 5% de HCl (10) et dans 5% H₂SO₄ (11).

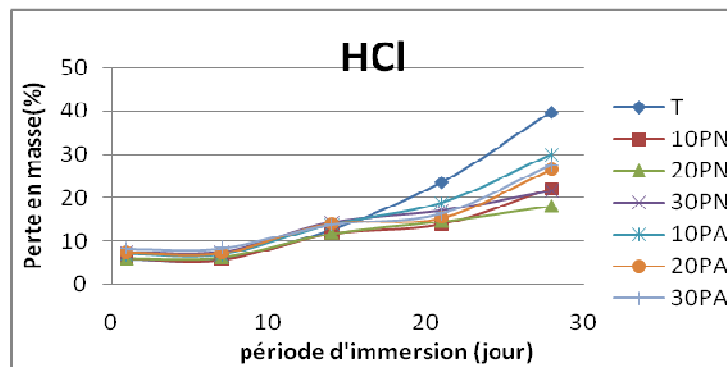


Figure 10: perte de masse des différents mortiers à 28 jours d'immersion (5% HCl).

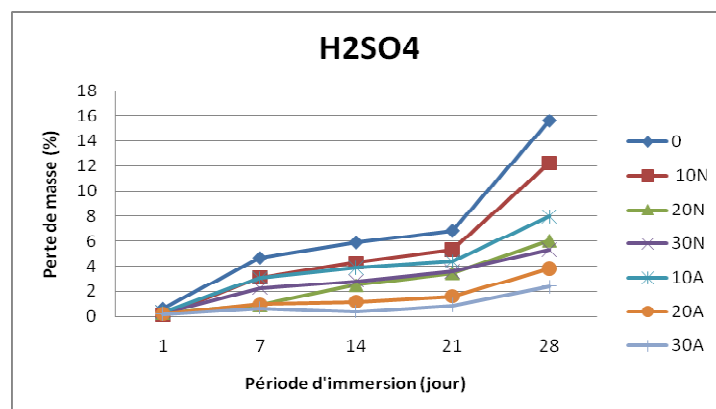


Figure 11: perte de masse des différents mortiers à 28 jours d'immersion (5% H₂SO₄).

L'apport des ajouts minéraux, sans tenir compte de leur contribution du point de vue économique et écologique, se manifeste en :

- la fixation de l'hydroxyde de calcium par l'ajout actif,
- diminution de la porosité de la pâte de ciment durci, ce qui freine la pénétration des agents agressifs.

On remarque que l'incorporation des additions minérale augmente la résistance chimique des mortiers dans les milieux agressifs (acide), comme il a été mise en évidence par plusieurs recherches (S. Sayamipuk, 1999).

La perte de masse est due au fait que le Ciment Portland Artificiel, 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'acide.

Pour le mortier en contact avec l'acide sulfurique (H₂SO₄), l'hydroxyde de calcium réagit avec l'acide sulfurique pour former le sulfate de calcium, qui est déposé comme gypse. 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'aluminate de calcium dans le ciment pour former le sulfoaluminate de

calcium hydraté (ettringite), qui, après cristallisation, peut causer l'expansion du mortier. La couche du gypse précipitée est facilement lixiviée ayant pour résultat une perte de masse considérable.

Dans les ciments avec ajouts, la quantité de CH étant de manière significative moins importante que dans le ciment sans ajout, cela est dû à la réaction pouzzolanique qui fixe la chaux. Par conséquent, les pores capillaires sont réduites par formation des gels CSH, bloquant ainsi l'absorption de la solution acide, d'où une réduction de la perte de masse.

Conclusion

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

- La pouzzolane artificielle (à base de la vase calcinée du barrage de Fergoug) peut être considérée comme matériaux pouzzolaniques puisqu'elle vérifie :
 - $AL_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 = 87.23 \%$
 - $I_{\text{vase calcinée}} = 0.73$
 - Silice (%) – Chaux (%) = 73.24 %
- La pouzzolane naturelle et la pouzzolane artificielle (à base de la vase calcinée de barrage FERGOUG) améliorent la résistance à la compression à long terme, car elles donnent naissance à un second C-S-H qui améliore le remplissage des pores, puis augmente la résistance mécanique.
- L'addition de la pouzzolane naturelle et la pouzzolane artificielle améliore le comportement des mortiers soumis aux attaques des acides HCl et H₂SO₄. Nous préconisons :
 - 20 % de la pouzzolane artificielle ou de la pouzzolane naturelle pour les solutions d'attaque contenant l'acide chlorhydrique.
 - 30 % de pouzzolane artificielle ou de la pouzzolane naturelle pour les solutions d'attaque contenant l'acide sulfurique.

Références bibliographiques

- ASTM C 618-94, « Coal fly ash and raw or calcined natural pozzolana for use as a mineral admixture in Portland cement concrete », ASTM standard, 3 pages.
- ASTM C 267-96 : Norme Américaine
- EN 196-1 : Norme européenne, « méthodes d'essais des ciments, partie 3 » Août 1995.
- S.Boumediene, 1999« effets de la pouzzolane naturelle sur les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers et la perméabilité des bétons », PF, université de Blida, octobre 1999, pp 58.
- Gherdaoui C et Benmalek MI, 2007 « l'influence des déchets industriels de carrière sur les performances des bétons » SNGID07 ,2007
- M Ghrici, Said-Mansour. M, Kenai. S., 2005 « Effets de la combinaison de la pouzzolane et du calcaire sur les propriétés des mortiers et des bétons » Congrès international Réhabilitation des Constructions et Développement Durable, Alger 3 et 4 Mai 2005.
- S. Sayamipuk (1999). "Strength and durability of mortars containing métakaolin from Thailand", PhD Thesis School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, pp 201.
- Semcha A. ,2006 « Propriétés physiques et chimiques de la vase ». Thèse de doctorat soutenue à l'USTO d'Oran (Algérie) et à l'université de Reims (France).