



Etude de l'influence des paramètres de la pouzzolane naturelle sur la résistance mécanique des mortiers à base de ciments composés (Study of the influence of natural pozzolan parameters on the strength of mortars based composite cements)

O. Chaib*¹, M. Mouli¹, M. Hanifi², M. Hamadache¹

¹Laboratoire Matériaux, département de Génie Civil, Ecole National Polytechnique, Oran,

²Laboratoire de construction, transport et protection de l'environnement, Université de Mostaganem

Reçu le 20 Octobre 2015; Révisé le 23 Janvier 2016 et accepté le 7 Février 2016

*Corresponding Author. E-mail: ouaddahchaib@yahoo.fr ; Tel: (+213771723824)

Abstract

The valorization of additions cementitious as Pozzolan (active addition), is currently one of the most recent developments in the production of cement, because its use is an improvement on the mechanical properties of cementitious materials (mortar and concrete). Its general use reduces consumption of clinker, contribute to solve economically and environmental problems such as:

- Reduce the emission of CO₂ from cement production operations
- Control the environmental impact of products over their entire life cycle.

The main objective of this work is to study the possibilities of obtaining other cements elaborated with natural pozzolan, these additions are available in large quantities in Algeria. In the past, several studies have been the subject of extensive research in order to upgrade the pozzolan in the preparation of cement paste, pozzolanic mortars and concretes. Our experimental work investigates the advantages and the possibility of partial replacement of cement by natural pozzolan in the mortar, six mortar mixtures: one specimen with Portland cement (control) and five mixtures with 20%, 30%, 35%, 40% and 50% of replacement of cement by pozzolan were tested. The results of this research confirm that the use of pozzolan at 20% and 30% of the weight of cement contribute to improve the sustainability of construction.

Keywords : Pozzolan, binary mortar, mechanical strength, Cement.

Résumé

La valorisation des ajouts cimentaires tel que Pouzzolane (ajout actif), fait actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car son utilisation apporte une amélioration sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires (mortier et béton). D'une manière générale son utilisation fait réduire la consommation du clinker, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement :

- réduire l'émission du CO₂ des opérations de production de ciment
- maîtriser l'impact environnemental des produits sur leur cycle de vie complet.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier les possibilités d'obtenir, d'autres ciments composés élaborés à base de pouzzolane naturelle. On sait que ces ajouts existent en très grande quantité. Dans le passé, plusieurs études ont fait l'objet de recherches poussées dans le but de revaloriser la pouzzolane dans l'élaboration de pâtes, mortiers et bétons pouzzolaniques. Notre travail expérimental étudie les avantages et la possibilité de substitution partielle du ciment par l'ajout pouzzolanique dans le mortier. Cette étude expérimentale consiste à préparer un ciment normalisé avec addition minérale en remplaçant un certain pourcentage de clinker par

l'ajout pouzzolanique substitué à divers pourcentages (20%, 30%, 35%, 40% et 50%). Les résultats tirés de ce travail de recherche confirment que les taux de 20% et 30% de pouzzolane contribuent positivement à l'amélioration de la durabilité de la construction. Il ressort que la quantité d'ajout pouzzolanique, et la composition chimique du ciment confectionné sont les principaux paramètres qui influent sur la variation des résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers testés.

Mots clés : Pouzzolane, Mortier binaire, Résistance mécanique, Ciment.

1. Introduction

Dans le domaine du génie civil, le matériau le plus utilisé dans le monde est le béton. Ce matériau manufacturé est une association d'un squelette granulaire composé de sable et de graviers, avec un liant hydraulique, le ciment hydraté. Le ciment n'est pas une invention récente. Dès l'antiquité, les romains ont constaté qu'un mélange de chaux avec des cendres volantes de Pouzzoles était capable, une fois hydraté, de former un produit résistant et durable. Ce ciment dit pouzzolanique a servi à la construction d'ouvrages. Les ciments ont un rôle essentiel dans le comportement des ouvrages en béton. L'intérêt et l'impact des ajouts résident en premier lieu dans le fait qu'ils permettent l'obtention d'un ciment dont les performances sont aussi bonnes que celles d'un CPA (ciment Portland) de même classe de résistance. L'objectif recherché dans cette étude est de fabriquer une variété de ciment composé à base de minéraux pour subvenir aux besoins et satisfaire le marché algérien et apporter un plus à l'économie nationale. Notre travail de recherche fixe comme objectif la fabrication de ciments à base de pouzzolane ; un ciment pouzzolanique selon les normes existantes. L'objectif principal est de déterminer les propriétés physico-mécaniques de mortiers élaborés à partir de plusieurs liants. Ces liants sont des ciments composés fabriqués à base de pouzzolane naturelle: Pour cela nous avons élaboré cinq ciments composés : à base de pouzzolane pour des taux de substitutions 20%, 30%, 35%, 40%, 50%. De nombreux travaux de recherches précédents ont montré des améliorations sur le plan des caractéristiques mécaniques des mortiers et bétons contenant cette pouzzolane[1] [2] [3]. Dans cette étude nous avons suivi l'évolution des résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers élaborés à des différents pourcentages d'ajouts substitués seuls (mortiers binaires) ou au ciment Portland et ceci aux échéances : 1, 3, 28, 45jours, 90jours et 180jours.

2. Processus expérimental

2.1. Matériaux utilisés

2.1.1. Le ciment

Le ciment utilisé dans tous les essais est un ciment CPA-CEM I 42,5N provenant de la cimenterie de la farge, livré dans un sac de 50 kg, selon la Norme algérienne NA442[4]. Les résistances minimales garanties à 02 jours 08MPa et à 28jours 40,0MPa. Sa composition chimique et minéralogique est rapportée aux tableaux 1 et 2.

Tableau 1. Composition chimique élémentaire du ciment CPA-CEM I 42,5

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO libre
64,8	21	4	7	2,71	0,41	0,13	0,9	1,20

Tableau 2. Composition minéralogique du clinker

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
51,30	25,70	2,80	14,30

2.1.2. La pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle utilisée est d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamidi situé au sud de Béni-Saf. Le gisement est représenté par une montagne de forme conique appelée El-Kalcoul situé à la côte

absolue de 236 m. Cette pouzzolane est essentiellement formé de scories et de pierres ponce bien stratifiées, de couleur variant du rouge au noir [5]. La pouzzolane naturelle utilisée dans tous les essais est sous forme d'une poudre, résultante de concassage des scories pouzzolaniques, étuvées pendant 24 heures à une température de 50°C pour éliminer leur humidité, ensuite broyées jusqu'à ce que la poudre résultante puisse passer à travers un tamis de mailles 80 µm[5]. La composition chimique de la pouzzolane naturelle après le broyage est montrée dans le tableau 3.

Tableau 3. Composition chimique élémentaire de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Cl	Perte au feu
9.99	45.21	17.85	9.84	0,01	4.38	0,00	10,75

2.1.3. Le sable

Le sable utilisé est un sable normalisé NF EN 196-1[6], montre la répartition des grains du plus petit diamètre au plus grand selon la norme Afnor.

2.1.4. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la préparation des mortiers est l'eau potable du robinet, sa composition chimique est illustrée dans le tableau 4. [7]

Tableau 4. Analyse chimique de l'eau de gâchage.

Composé	Symbole	Teneur (mg/l)
Chlorures	Cl	127
Sulfates	SO ₄	190,23
Magnésium	Mg	54
Calcium	Ca	86
Dioxyde de carbone	CO ₂	2,43
Bicarbonates	CO ₃ H	138
Matières organiques		0,12
pH=7,50		

2. 2. Préparation des échantillons

Les échantillons d'essai ont été confectionnés selon la norme NF15 403[8] dans des moules prismatiques (40x40 x160 mm³) et compactés mécaniquement à l'aide d'une table à choc. Une fois arasés, les moules contenant les échantillons sont couverts de film plastique et stockés dans l'environnement de laboratoire sous une température de 20°C et une humidité relative d'environ 55%. Les rapports pondéraux utilisés expérimentalement sont : (liant/sable) = 1/3 et (eau/liant) = 0.5. Le démoulage est effectué après 24 heures et les échantillons sont conservés au laboratoire dans une eau saturée en chaux jusqu'au jour de l'échéance.

2. 3. Formulation des mortiers

Les mortiers contenant les ajouts : pouzzolane naturelle notée PZN (20% ; 30% ; 35% ; 40% et 50%) sont élaborés selon cinq combinaisons reportées aux tableaux 5, et désignées comme 5 ciments composés et du ciment CEMI de référence.

2. 4. Essais réalisés

Les résistances mécaniques (flexion et compression) sont mesurées aux échéances : 1jour,3,28,45,90 et 180 jours à l'aide d'un appareil IBERTEST avec un chargement à une vitesse constante de 0.5 KN/S.

Les essais mécaniques sont effectués conformément à la Norme NF P15 471[9].

Tableau 5. Les différentes combinaisons «CPA + PZN»

Désignation	Ciment Portland (%)	Additions (%)
CEMI	100	0.0
PZN20	80	20
PZN30	70	30
PZN35	65	35
PZN40	60	40
PZN50	50	50

3. Résultats et discussions

3.1. Mortiers binaires

3.1.1 Essai de consistance et de prise

Les essais de prise et de consistances ont été réalisés au laboratoire (L.A.B.M.A.T ENSET Oran) sur les 05 variétés de ciment et sur le CEMI. Les résultats sont donnés dans le tableau 6

Tableau 6. Consistance, début et fin de prise des mortiers

Désignations	Pouzzolane naturelle (%)	Consistance (%)	Début de prise(mn)	Fin de prise (mn)
CEMI	0	25	164	310
PZN20	20	30	165	345
PZN30	30	32	160	325
PZN35	35	33	127	315
PZN40	40	34	110	305
PZN50	50	36	99	298

Tableau 7. Masses volumiques apparentes et absolues des ciments composés

Désignations	Masses volumiques apparentes (g /cm ³)	Masses volumiques absolues (g/cm ³)
CEMI	1.05	3.120
PZN20	1.04	3.040
PZN30	1.02	3.023
PZN35	1.00	2.97
PZN40	0.97	2.884
PZN50	0.95	2.857

3.1.2 Porosité

Les différents résultats ont été obtenus par la relation suivante : $P + C = 1$ avec $C = \frac{\text{Densité apparente}}{\text{Densité absolue}}$
 D'où $P = 1 - C$; Avec P désigne la porosité et C désigne la compacité

La figure 3 montre l'évolution de la porosité en fonction de la teneur en ajout. Plus le taux de pouzzolane augmente plus la porosité augmente, mais durant l'hydratation du ciment composé les pores ont tendance à diminuer à cause de la consommation de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) par réaction pouzzolanique [10]. L'ajout pouzzolanique réduit l'eau de gâchage et améliore la structure poreuse des matériaux en diminuant la dimension des pores [11], [12].

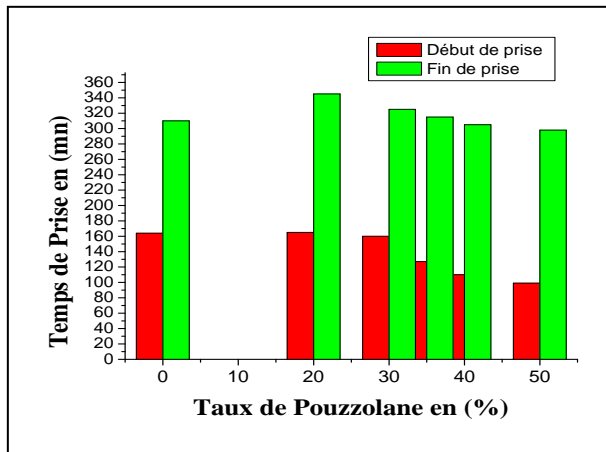


Figure 1. Début et fin de prise en fonction du taux pouzzolane

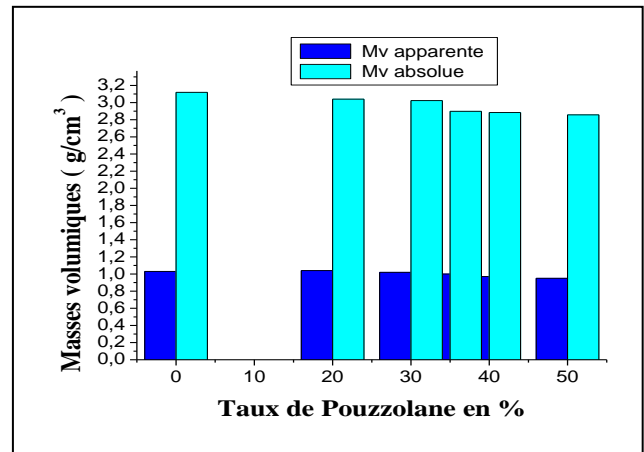


Figure 2. Masses volumiques absolues en fonction du taux de Pouzzolane

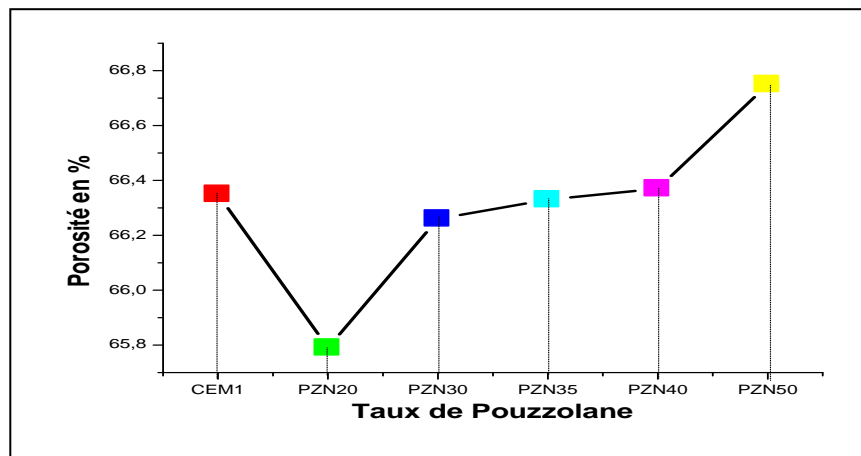


Figure 3. Variation de la porosité en fonction du taux de pouzzolane

3.1.3. Résistance à la compression

La figure4 illustre l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant : a) la pouzzolane naturelle conservée à l'air, b) la pouzzolane naturelle conservée dans l'eau.

Les figures 4a, 4b montrent la variation de la résistance en fonction du pourcentage de substitution de la pouzzolane sur la résistance à la compression des mortiers aux différentes échéances. D'après ces figures, nous remarquons que les résistances à la compression des mortiers élaborés avec les différents taux de substitution de la pouzzolane restent toujours inférieures à celle du mortier de contrôle et cela pour tous les âges. Au jeune âge, l'augmentation du dosage de la pouzzolane a un effet négatif sur la résistance à la compression. En effet cette résistance diminue 25% à 75% à l'âge de 1 jour et d'un écart de 15% à 52% à l'âge de 3 jours par rapport à celle du témoin pour des dosages en pouzzolane allant de 20 à 50%. Cette diminution a tendance à diminuer en fonction du temps car elle passe de 15% à 44% à l'âge de 28 jours et de 9% à 44%. À l'âge de 45 jours pour les mêmes taux de substitution (20 à 50%), de 20% à 36% pour l'âge de 90 jours et de 15% à 34% pour 180 jours ce qui met en évidence l'effet positif du taux de pouzzolane à long terme. Mansour [8] dans son étude a trouvé une réduction de 15% de résistance à la compression à l'âge 90 jours d'un mortier contenant 30% de pouzzolane par rapport au mortier contrôle avec un rapport E/L = 0.5. Cependant, avec les mêmes conditions, nous remarquons dans notre étude que le taux de pouzzolane influe sur la résistance: plus il augmente plus la résistance diminue.

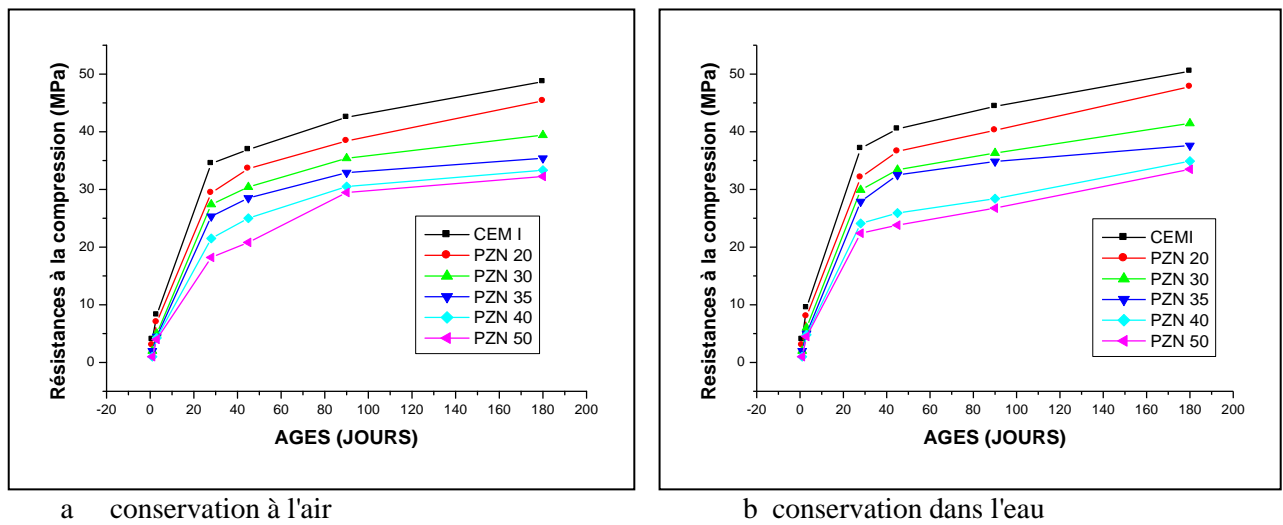


Figure 4. Evolution de la résistance à la compression des mortiers binaires en fonction de l'âge

D'après la figure "4.b" nous remarquons que les résistances à la compression des mortiers élaborés avec différents taux de substitution de la pouzzolane et conservés dans l'eau passent d'un écart de 16% à 53% à l'âge de 3 jours et de 14 à 40% pour l'âge de 28 jours et de 10 % à 41% à l'âge de 45 jours, pour des taux de substitutions allant de 20 à 50% , de 17% à 41% à 90 jours et de 20% à 42% pour 180 jours de pouzzolane respectivement. Mais en comparant les résultats des deux figures 4.b et 4.a ; nous constatons qu'il y a une nette amélioration de résistance de compression, c'est dû essentiellement à un rapport de l'eau d'hydratation, pour les éprouvettes conservées dans l'eau. Ceci peut être attribué aussi à l'activité pouzzolanique qui est lente au jeune âge et se développe à long terme en fixant la portlandite Ca(OH)_2 libérée par l'hydratation du ciment Portland donnant naissance à des C-S-H supplémentaires de deuxième génération occupant un espace important de la matrice cimentaire et contribuant ainsi au développement de la résistance selon la littérature [13] [14] [15] [16].

3.1.4. Résistance à la traction

Au jeune âge (1 à 3 jours), les résistances à la flexion des mortiers contenant la pouzzolane sont faibles comparativement à celle du mortier témoin et deviennent comparables à long terme (28 et 180 jours) pour un taux de 20% selon les figures 5c et 5d. Nous constatons une nette diminution de la résistance à la flexion pour une teneur en pouzzolane élevée.

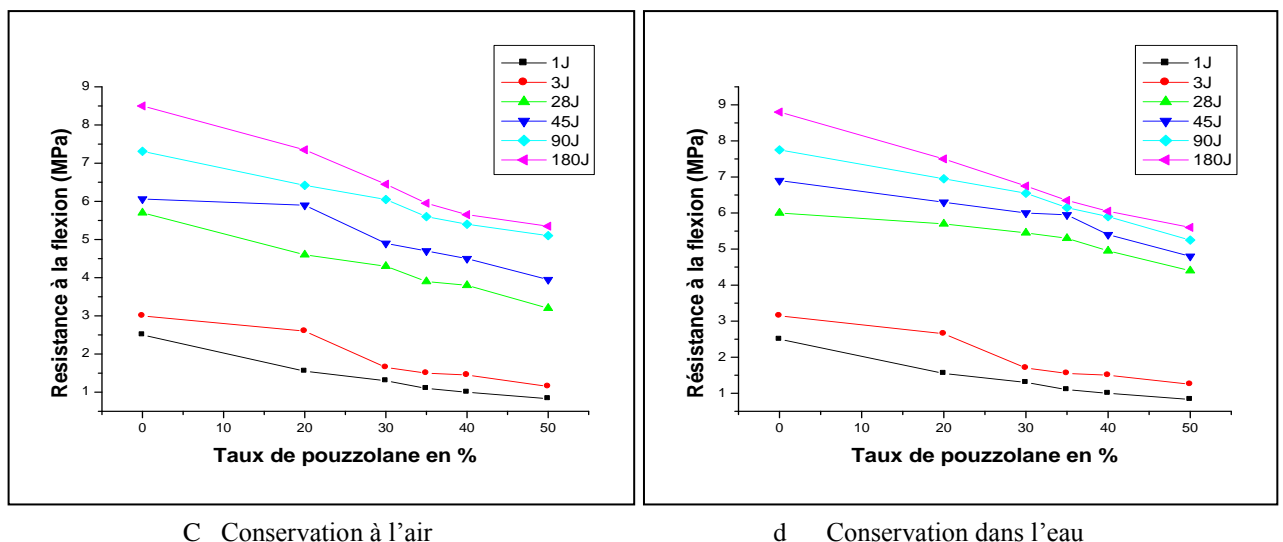


Figure 5. Evolution de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage de la pouzzolane

Conclusion

L'étude entreprise dans ce travail indique qu'il est possible d'exploiter les gisements de ressources naturelles telles que la pouzzolane naturelle disponibles en Algérie pour produire des ciments composés.

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

Nous remarquons que la consistance est proportionnelle aux taux d'ajouts, plus le taux augmente plus la consistance augmente. Nous remarquons aussi que la masse volumique absolue est supérieure à la masse volumique apparente, la figure 3.4 montre la diminution de la masse volumique pour les deux cas de figure ce qui explique la bonne contribution de l'ajout pour la compacité ; ce qui explique la bonne durabilité.

Les résistances de ces mortiers augmentent en fonction du taux de substitution du Pouzzolane mais restent inférieures à celle du mortier de contrôle et cela pour tous les âges.

Au jeune âge, l'augmentation du taux d'ajout a un effet négatif sur la résistance à la compression, et à la flexion mais une fois l'âge devient important la résistance augmente.

A long terme et pour un taux de pouzzolane de 20 % la résistance à la compression s'approche de la résistance de référence.

Acknowledgements-Je tiens à Remercier l'équipe du comité d'organisation scientifique du workshop international des déchets et développement durable Octobre 7, 8, 9 à 2015 Tanger, Maroc.

References bibliographies

1. Massazza F., Italcementi, *Cem. Concr. Compos.* 15 (1993) 185-214.
2. Shannag M. J., Yeşinobal A., *Cement and Concrete Res.* 25 (1995) 647-657.
3. Abd-El.Aziz, M.A., Abd.El.Aleem S., Heikal M., *Constr. Build. Mater.* 26 (2012) 310–316.
4. NA442« Ciment –composition, spécification et critères de conformité des ciments courants »Equiv EN 197-1 2001 P15-101-1Le 19-à'62004 comité 37 N°20
5. Mouli M., Khelafi H., *Engineering Structures* 8 (2007) 1791-1797
6. NF EN 196-1: Méthodes d'essais des ciments – Partie 1: détermination des résistances mécaniques (April). Comité Européen de Normalisation (CEN), AFNOR, Paris, France (2006).
7. Hamadache, M., Mouli, M., Bouhamou, N., Dif, F., Benosman, S., In: Proceedings (PROC_89) of RILEM International workshop on performance-based specification and control of concrete durability 13 (2014)133-140.
8. NF 15 403 NF 15 403 Préparation des éprouvettes, réalisations, malaxages 25 Novembre 2011
9. NFP 15 471 (EN 196-1) Détermination des résistances mécaniques Avril 2006.
10. James S. Fabiyi., *J. Mater. Environ. Sci.* 4 (6) (2013) 848-854
11. Rahmouni A., Boulanouar A., Boukalouch M., Géraud Y., Samaouali A., Harnafi M., Sebbani J., *J. Mater. Environ. Sci.* 5 (3) (2014) 931-936
12. Bessenouci M Z., Bibi Triki N E., Khelladi S., Draoui B., Abene A., *Physics Procedia.* 21 (2011) 59 – 66
13. Ghrici M., Kenai S., Said Mansour M., *Cem. Concr. Compos.* 29 (2007) 542-549.
14. Feldman R.F., Cheng G.M., *Cement Concrete Res* , 15(1985) 585-592.
15. Mansour S., Kadri EH., Kenai S., Ghrici M., *Constr Build Mater.* 25 (2011) 2275-2282
16. Siad H., Mesbah H.A., Khelafi H., Kamali S., Mouli M., *Arab. J. Sci. Eng.*, 35 (2010) 183-195

(2016) ; <http://www.jmaterenvirosci.com>