

EFFET DU CHLORURE DE SODIUM SUR LA DURABILITÉ DES BHP

Rabah CHAID¹, Raoul JAUBERTHIE², Mohamed Tahar ABADLIA³

¹UR : Matériaux - Procédés et Environnement, UMBB-Algérie

²Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, INSA-Rennes

³UR : Matériaux - Procédés et Environnement, UMBB-Algérie

CONTEXTE INDUSTRIEL DE LA RECHERCHE : Elle consiste à produire un béton de grande durabilité en milieu marin, à un coût compétitif et avec un impact environnemental minimal, ceci en optimisant l'utilisation de la pouzzolane afin de remplacer une partie de ciment dans le béton. Les résultats obtenus confirment que les bétons incorporant cet ajout, lorsqu'ils sont conçus, fabriqués et utilisés convenablement, peuvent offrir une performance supérieure au béton classique de ciment portland, autant par leurs propriétés mécaniques que par leur durabilité.

I. INTRODUCTION

Le matériau béton, demeure depuis son existence au début du XIX^e siècle, l'élément clé dans la construction et constitue toujours une partie intégrante dans l'ossature de l'ouvrage. Son emploi large et intensif soulève le problème de sa qualité et de sa durabilité.

L'utilisation de la pouzzolane conjuguée avec un superplastifiant est connue pour améliorer la résistance mécanique et la durabilité des bétons à hautes performances. Les mécanismes d'action de la pouzzolane dans le béton reposent sur des effets de natures physique et chimique.

L'obtention d'un béton à hautes performances ou à haute résistance est devenue le but essentiel que les chercheurs visent ; mais ceci n'est possible que si la matrice du béton est plus dense et plus compacte.

La compacité de la pâte de ciment peut être améliorée par la formation des silicates de calcium hydratés (C-S-H) de deuxième génération.

Ces derniers s'obtiennent par introduction de fines particules siliceuses dotées d'un rôle pouzzolanique ce qui

contribue à l'augmentation de la résistance et de la durabilité des bétons [1,2].

La durabilité d'un matériau à matrice cimentaire est fonction de sa capacité à résister aux dégradations mécanique, hydrique, physique et chimique qu'il subit. L'évaluation de cette durabilité nécessite la connaissance du comportement du béton à long terme [3].

Bien composé et correctement mis en œuvre, le béton est généralement stable vis-à-vis des agents agressifs courants. Toutefois, tous les facteurs conditionnant la pérennité d'un ouvrage en béton n'étant pas toujours maîtrisés, il importe de prendre un certain nombre de précautions destinées à prévenir les dégradations ultérieures [4].

Dans un environnement chlorhydrique les sels dissous attaquent le béton. Le chlore peut s'insérer dans le réseau cristallin des C-S-H. Il fait disparaître les fibres et crée une structure alvéolaire : il se forme un treillis dont les mailles deviennent de plus en plus lâches quand la quantité de chaux dissoute augmente.

Récemment, Gagné et coll. [5] ont étudié l'importance du pH de la solution interstitielle sur la pénétration des ions

Constituants Bétons	Ciment kg/m ³	Sable kg/m ³	Gravier (3/8) kg/m ³	Gravier 8/15 kg/m ³	Eau l/m ³	Plastifiant l/m ³	Pouzzolane kg/m ³
Béton sans ajout	475	573	130	915	150	8	---
Béton de pouzzolane	451	573	130	915	150	8	24

Tableau 1 : Compositions des différents bétons.

chlore. Ils ont trouvé que cette pénétration augmentait de façon significative avec la diminution du pH [6].

Le mécanisme de ces dégradations fait intervenir de nombreux paramètres en relation avec les caractéristiques du ciment et du béton, la nature de l'agent agressif et les conditions d'exposition. Nous considérerons ici quelques uns des facteurs qui conditionnent la résistance chimique du béton vis-à-vis d'un environnement chlorhydrique.

L'objectif de notre travail réside dans :

L'incorporation dans le mélange de béton de la pouzzolane naturelle, visant l'élaboration d'un béton à hautes performances.

L'étude de la durabilité des bétons élaborés avec et sans pouzzolane conservés dans un milieu agressif constitué de chlorure de sodium (3 %) dilué dans l'eau.

II. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le dosage optimal en granulats, en ciment et en eau, afin de réaliser un béton de qualités requises (résistance, durabilité...) par des spécifications liées au contexte de réalisation d'un ouvrage.

En ce qui concerne nos travaux, l'idée principale est d'élaborer un béton dense à partir d'un squelette granulaire le plus compact possible et d'un dosage en ciment et en eau compatible avec la résistance, la durabilité et l'ouvrabilité désirées.

La formulation des bétons (*tableau 1*) réalisée suite à des essais d'étude et de convenance a été basée sur la méthode de Dreux Gorisse conjuguée à celle de coulis [7]. Lesquelles nous ont conduit à des compositions de béton satisfaisantes, après optimisation des divers constituants :

- rapport eau/liant et teneur en adjuvant.
- diamètre maximal des gros granulats.
- mouture et teneur de la pouzzolane.

Les différentes éprouvettes de béton préparées, sont conservées en salle humide (20°C, 95% HR) pendant 24 h. Elles sont ensuite mises dans le bain de conservation, milieu chlorhydrique (5 % CaCl₂) pour des durées de 28 j, 3 mois et 1 an.

Les essais de résistance mécanique sont réalisés au moyen d'une presse hydraulique asservie de capacité 600 kN. En parallèle, nous avons mené des études de vitesse de propagation du son, d'absorption d'eau, d'imperméabilité à l'air et de pénétration des ions chlorures.

Les essais d'absorption d'eau (*figure 1*) déterminent le taux ou la vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une éprouvette de béton posée sur de petits supports de telle manière, que seules les cinq (5) premiers millimètres du bas de l'éprouvette soient immergés.

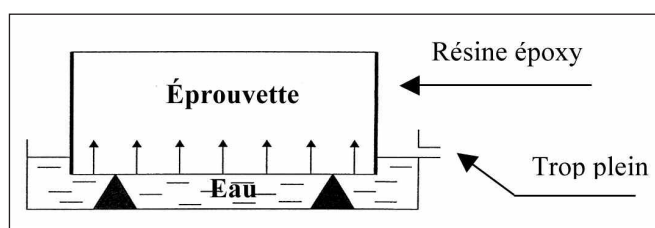


Figure 1 : Schéma de l'essai d'absorption d'eau.

Les faces latérales des éprouvettes (7x7x7cm³) ont été enduites d'une résine époxydique. On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps.

L'absorption d'eau (S) est obtenue en utilisant l'expression suivante : $i = S \sqrt{t}$ [8].

i = l'augmentation de la masse en (g/mm²).

1g d'eau = 1 mm³ alors, (i) peut être exprimé en mm.

t : temps en mn.

S : absorptivité en mm / mn^{0.5}.

La perméabilité à l'air du béton est fortement influencée par son degré d'humidité. On a observé qu'en passant d'un état pratiquement saturé à celui séché au four à la température de 100-105 °C, le coefficient de perméabilité au gaz augmente près deux ordres de grandeur [9].

Du point de vue de la facilité d'essai, nous avons séché les éprouvettes jusqu'à masse constante dans une étuve de séchage à 105 °C pendant 24 heures.

L'appareillage employé pour la détermination de la perméabilité à l'air est représenté dans la *figure 2*, l'éprouvette est enduite d'une couche étanche (époxy) sur les 2/3 de la partie inférieure, cette peinture est appliquée à l'intérieur et à l'extérieur de l'éprouvette creuse afin d'éviter toutes infiltrations d'eau.

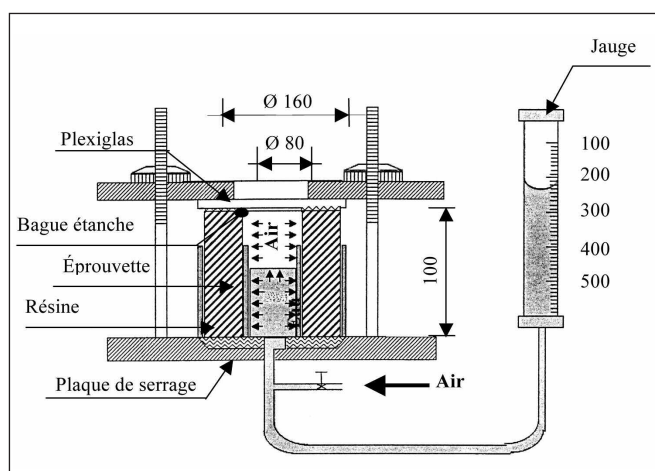


Figure 2 : Schéma de perméabilité à l'air [10].

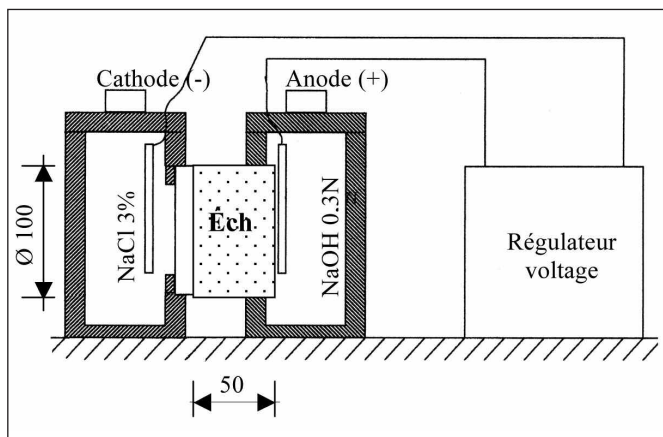


Figure 3 : Schéma de la cellule de perméabilité aux ions chlorures.

La perméabilité aux ions chlorures (*figure 3*) a été déterminée selon la norme ASTM.C-1202 [8]. L'essai consiste à mesurer l'intensité du courant engendré par une différence de potentielle égale à 60 volts, maintenue constante pendant 6 heures au moyen d'électrodes en acier inoxydable entre les deux extrémités d'un échantillon de béton, de formes cylindriques de 100 mm de diamètre et 50 mm de hauteur.

L'une des faces de l'éprouvette est au contact d'une solution de NaCl dosé à 30 g/l (compartiment amont : cathode), et l'autre face est au contact d'une solution de NaOH 0,3N soit 12 g/l (compartiment aval : anode).

La surface cylindrique de l'éprouvette est enduite d'une couche de résine époxydique étanche.

Pour les trois derniers essais, les mesures ont été réalisées à 28, 90, 180 et 365 jours. Les températures des solutions ont été déterminées au cours de l'essai.

L'effet pouzzolanique de l'ajout est mieux caractérisé sur pâte de ciment que sur le béton : les résultats sur pâtes présentent une meilleure précision et une plus faible dispersion que ceux obtenus sur les bétons.

Nous avons suivi l'évolution des phases cristallines présentes ou nouvellement formées par diffraction des rayons X et les minéraux sont observés au MEB, la micro analyse qui lui est associé permet de confirmer leur composition chimique.

Dans tout ce qui suit la légende suivante a été adoptée :

- BHP : Béton sans ajout.
- BHPZ : Béton avec ajout de pouzzolane.

III. MATÉRIAUX UTILISÉS

III.1. Pouzzolane

La région de Beni-saf (Algérie) de la basse de Tafna est considérée comme un centre du volcanisme basique à différenciation magmatique et à auréoles acides aux extrémités ouest de la région. Une étude sur cette région guidée par Gentil en 1903 a mis au jour la présence de zones volcaniques renfermant principalement de la pouzzolane.

En dépit d'énormes réserves de ce minerai dans la région, l'unique gisement exploité est un ancien volcan de forme conique qui a laissé sur ses flancs des dépôts de cendres. La quasi-totalité de ce minerai (1 000 à 1 400 tonnes/jour) est destinée à la production des ciments aux ajouts. Il est à noter que les études détaillées sur la durabilité des bétons à base de cet ajout restent limitées.

La pouzzolane observée sur le diffractogramme (*figure 4*) est constituée essentiellement de quartz (SiO_2), cordiérite ($\text{Mg}_2\text{Al}_3 [\text{AlSi}_5\text{O}_{18}]$), hématite (Fe_2O_3), analcime ($\text{Na} [\text{AlSi}_6\text{O}_{13}] \cdot \text{H}_2\text{O}$) et axinite ($\text{Ca}_2 (\text{Fe}, \text{Mn}) \text{Al}_2 [\text{SiO}_4]_4$), dont la partie amorphe est majoritaire.

La pouzzolane a une Surface Spécifique Blaine de **9 565** cm^2/g . la répartition granulométrique réalisée avec un granulomètre laser CILAS 1 180 est donnée *figure 5*. La granulométrie est très serrée, elle s'étale entre 2 et **15** μm seulement.

III.2. Ciment

Le ciment Portland utilisé est un CPA CEM I 52,5 de l'usine Saint Pierre Lacour (France), dont les compositions chimique et minéralogique de ce ciment calculée par la méthode de Bogue sont reportées sur le *tableau 2*.

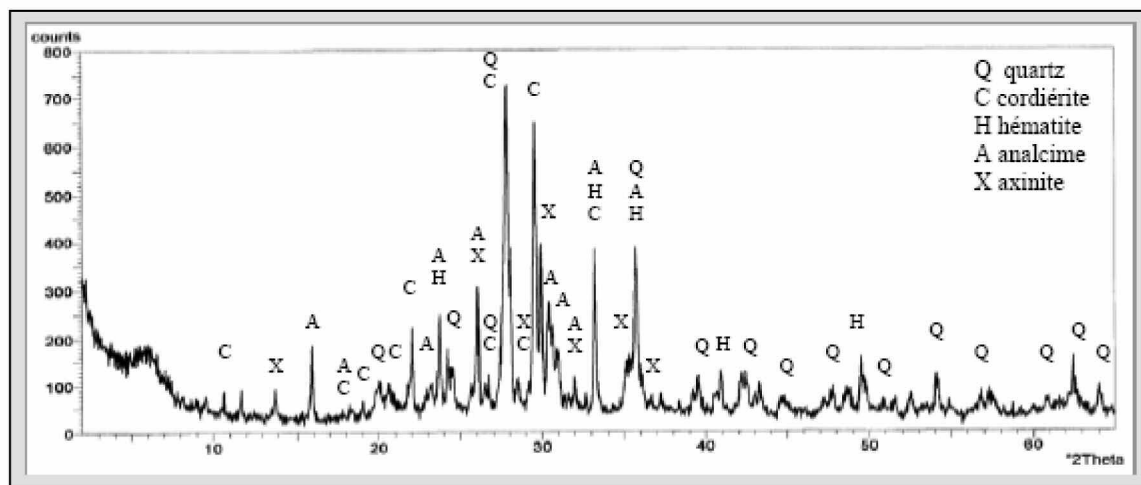


Figure 4 : Diffractogramme de la pouzzolane.

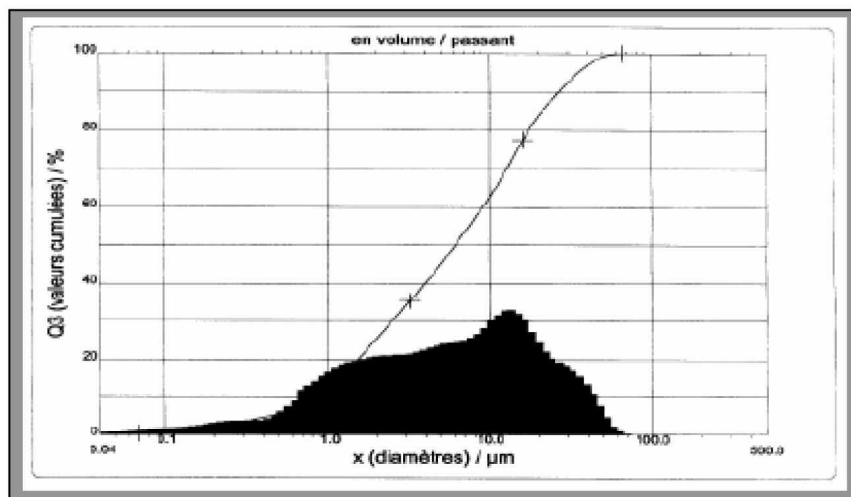


Figure 5 : Distribution granulométrique de la pouzzolane.

Éléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	RI	PAF	CaO _I
%	64,50	21,01	4,90	2,80	0,90	3,00	0,90	0,20	0,20	1,10	0,45
Minéraux	C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF				
%	65,94		10,47		8,24		8,52				

Tableau 2 : Compositions chimique et minéralogique du ciment CEM I 52,5.

Le diffractogramme (figure 6) réalisé sur le ciment anhydre montre bien la présence des différentes phases cristallines : les quatre minéraux essentiels (C₃S, βC₂S, C₃A et C₄AF) responsables de la prise et du durcissement et le gypse (CaSO₄.2H₂O) régulateur de prise.

Sur les courbes granulométriques partielle et cumulée du ciment anhydre de la figure 7, on peut observer une granulométrie continue moyenne entre 0,3 et 60 μm avec les classes granulaires suivantes :

- 90% des particules de diamètre inférieur ou égal à 56 μm.
- 50% des particules de diamètre inférieur ou égal à 18 μm.
- 10% des particules de diamètre inférieur ou égal à 2 μm.

La Surface Spécifique Blaine du ciment est 3 600 cm²/g.

Le taux de particules de diamètre inférieur à 56 μm (90%), reflète bien la finesse élevée du ciment, ce qui accroît la cinétique d'hydratation.

Cependant, la pouzzolane avec un diamètre des particules plus faible (inférieur à 15 μm) et une présager SSB trois fois plus grande que celle du ciment, nous laisse prétendre que celle-ci jouera effectivement un double rôle, filler en s'intégrant entre les particules du ciment et pouzzolanique par réaction avec la Portlandite pour donner naissance à des produits d'hydratation de deuxième génération.

La résistance vraie du ciment utilisé est mesurée sur des éprouvettes de mortier (4 x 4 x 16 cm³) conçues suivant la norme NF P 15-403 avec un rapport eau/ciment égal à 0,5 et conservées en salle humide (20°C, 95% HR) pendant 7j, puis stockées en salle climatisée (20°C, 50% HR) jusqu'à la réalisation des essais.

Les résultats des essais de ruptures à la flexion et à la compression sont reportés sur le tableau 3.

Autres propriétés physiques :

Consistance normale.....26 %.

Début de prise.....2 h 55 mn.

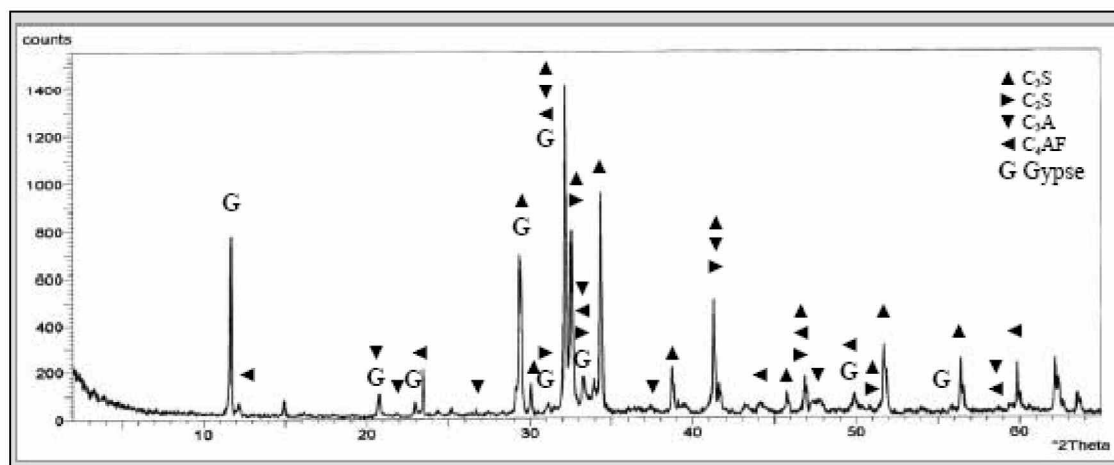


Figure 6 : Diffractogramme du ciment anhydre CEM I 52,5.

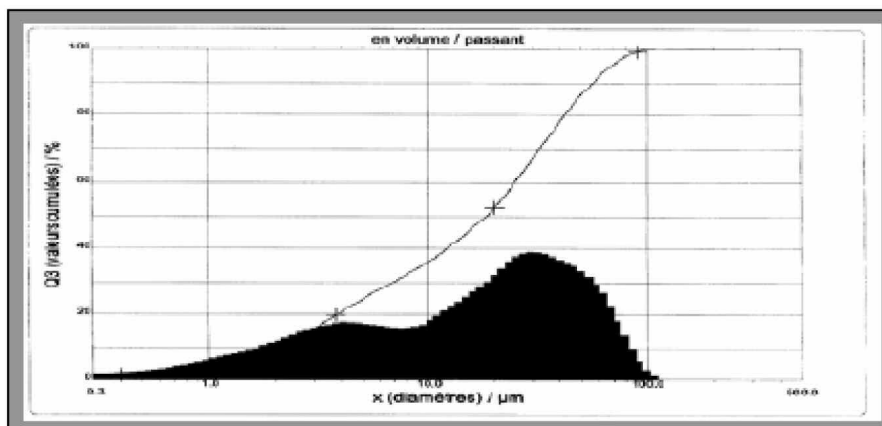


Figure 7 : Distribution granulométrique du ciment anhydre CEM I 52,5.

Résistance (MPa)	02 j	07 j	28 j
flexion	4,8	6,8	7,7
compression	30	45	61

Tableau 3 : Évolution de la résistance du ciment CEM I 52,5.

Chaleur d'hydratation (12h)189 J/g.
 Retrait à 28j565 $\mu\text{m/m}$.
 Stabilité chimique0,3 mm.

III.3. Granulats

Le choix des granulats à utiliser pour le BHP doit tenir compte des facteurs tels que : le diamètre maximal, la forme des particules, la granulométrie, la résistance à l'écrasement...

Le granulat idéal serait un granulat de 10 à 14 mm environ de diamètre, propre, de forme régulière (cubique ou proche), de nature concassée et ne doit pas contenir de particules plates, allongées ou accidentées [11].

Les essais préliminaires concernant aussi bien la rhéologie des mélanges de béton que son écrasement en tant que matériau durci ont permis de sélectionner les granulats de classe 3/8 et 8/15 pour la confection de ces bétons.

Quant au sable utilisé, c'est un sable grossier d'oued, dont le module de finesse vaut 2,47 : ceci correspond à des sables utilisés pour la recherche de résistances élevées. Cependant, la teneur de la partie supposée argileuse, soit de diamètre inférieur à 0,14 mm est de 7,3 %.

III.4. Adjuvant

Pour éviter la floculation des grains fins issus du ciment et de la pouzzolane, nous avons utilisé un superplastifiant réducteur d'eau de type mélanine, fourni par la société SIKa. Conformément à la norme NF EN 934-2, il doit être utilisé à une dose inférieure ou égale à 5% du poids du liant.

Le SIKAMENT FF 86 permet la confection de bétons fluides particulièrement adaptés aux bétons à très hautes performances (résistance caractéristique > 50 MPa). La plage d'utilisation recommandée (par le fournisseur) est 0,4 à 2 % du poids du ciment selon les performances recherchées.

Le SIKAMENT FF 86 est ajouté en même temps que l'eau de gâchage. Son effet sera maximum s'il est introduit sur un béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

IV. RÉSULTATS ET ANALYSES

La durabilité d'un béton n'est pas une de ses caractéristiques, mais plutôt sa réponse aux charges en service et aux conditions environnementales. Ainsi, la durabilité d'un béton dépend d'une multitude de caractéristiques du matériau, mais aussi de l'agressivité de son environnement.

Dans un élément en béton exposé à un milieu agressif, les agents extérieurs peuvent pénétrer dans sa matrice à travers des fissures et microfissures. Ces agents agressifs peuvent, par la suite, réagir avec les hydrates pour diminuer davantage sa capacité portante.

Deux phénomènes physico-chimiques principaux entrent en jeu :

- Expansion et fissuration par formation très localisée d'ettringite. Les contraintes sont dues à une ettringite "naissante" mal cristallisée. Lors de cette cristallisation, les pressions engendrées sont supérieures à la résistance en traction du béton d'où la fissuration.
- Dissolution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et des C-S-H qui deviennent plus poreux. Selon P.K. MEHTA, le gonflement de l'ettringite serait dû à une adsorption d'eau [4]. Dans nos essais de laboratoire antécédents [7] nous avons montré qu'il existe une teneur et une finesse optimales de pouzzolane qui conduisent à l'obtention des bétons hautes performances.

Des matrices à granulométrie resserrée ont un comportement amélioré. L'amélioration est en relation d'une part avec leur plus grande compacité et leur taux d'hydratation plus élevée et d'autre part avec la présence d'une grande quantité de C_3A disponible rapidement pour former de l'ettringite primaire non expansive. Les proportions d'alumine restant pour une cristallisation ultérieure d'ettringite expansive sont réduites [4].

Les résultats de mesure de la masse volumique entre 28 et 365 jours sont illustrés dans la *figure 8*. On note que la masse volumique des deux types de béton augmente dans le temps. Ce qui est en corrélation avec l'évolution de la compacité.

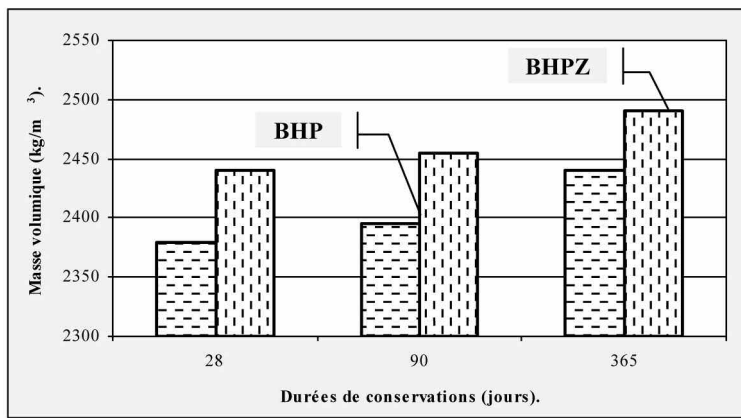


Figure 8 : Évolution des masses volumiques des différentes éprouvettes de béton.

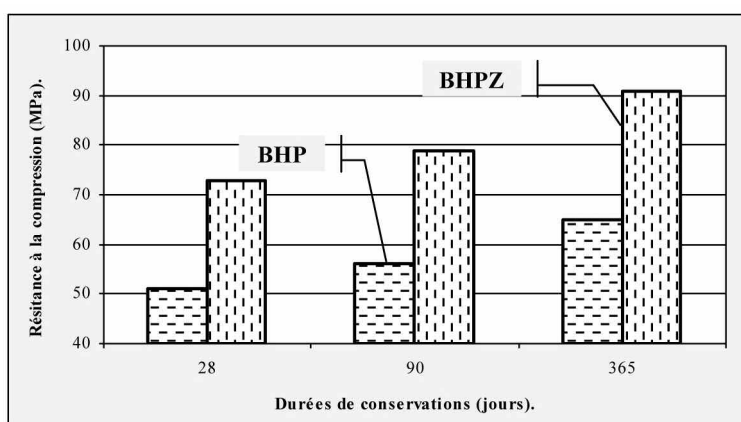


Figure 9 : Évolution des résistances à la compression des différentes éprouvettes de béton.

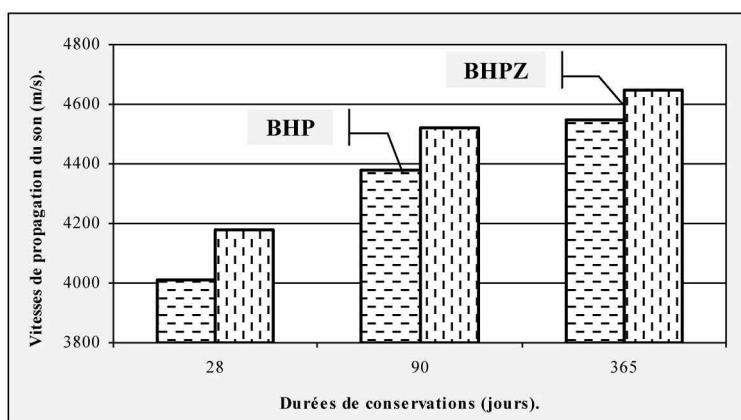


Figure 10 : Évolution des vitesses de propagation du son à travers les différentes éprouvettes de béton.

On remarque que la masse volumique du béton avec ajout de pouzzolane est nettement supérieure à celle du béton sans ajout. Ceci s'explique par le fait que la pouzzolane par sa forte surface spécifique et son rôle chimique densifie la matrice.

La **figure 9** illustre l'évolution de la résistance mécanique à la compression des différents bétons, conservés dans le milieu chlorhydrique. Pour les éprouvettes de BHPZ on observe un gain de résistance de 40 % à 365 jours par rapport aux éprouvettes de BHP.

La substitution d'une partie de ciment par la pouzzolane est responsable de l'accroissement des résistances mécaniques, grâce à la finesse de ses particules et à sa réactivité pouzzolanique.

L'évolution de la vitesse de propagation du son dans les deux compositions de béton est reportée **figure 10**. Elle est croissante avec la durée de conservation.

Un écart non négligeable est observé entre le béton de pouzzolane et le béton sans ajout : sa matrice est considérablement plus dense, ce fait confirme les résultats obtenus précédemment, résistance mécanique améliorée, masse volumique supérieure.

De même l'absorption d'eau évolue dans le temps (**figure 11**). Elle décroît très rapidement au jeune âge, mais de façon plus importante pour le béton à la pouzzolane.

La pouzzolane a contribué à la formation de CSH de deuxième génération par combinaison avec la Portlandite du ciment et à l'élimination des pores capillaires ou la diminution de leurs tailles. Cet effet est nettement significatif après 365 jours de durcissement.

La pouzzolane naturelle limite donc l'absorption d'eau avec le temps. L'incorporation de 5 % de pouzzolane a permis une réduction de 37 % de l'absorption d'eau après une année.

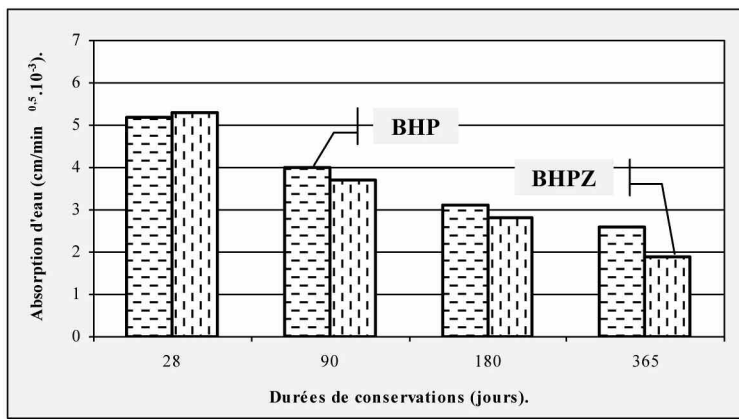
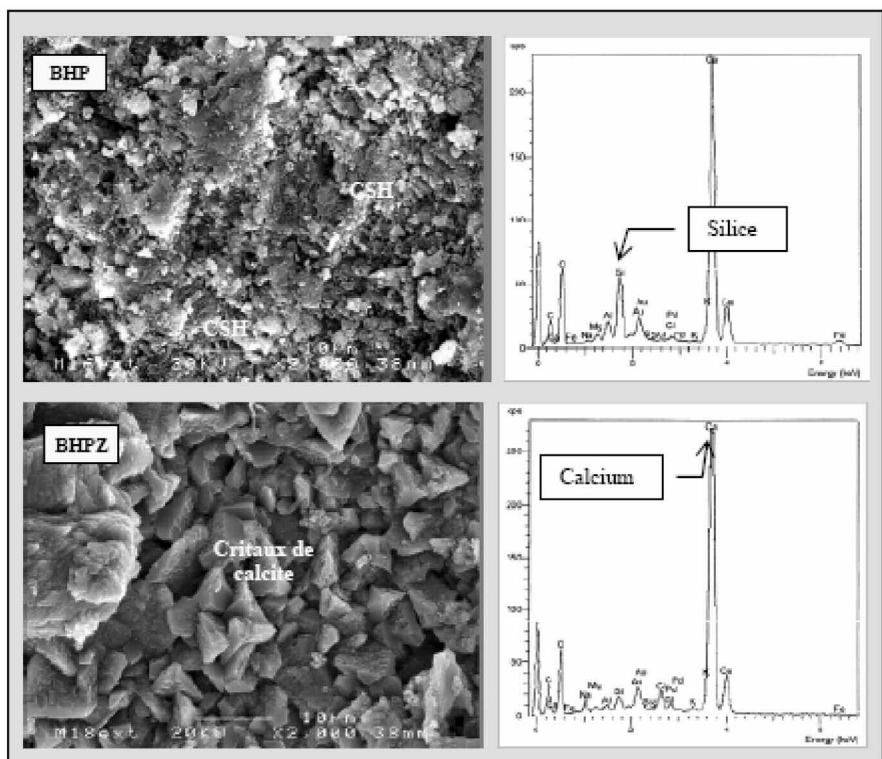


Figure 11 : Évolution de l'absorption d'eau des différentes éprouvettes de béton.

Figure 12 : Observation au MEB de la surface des éprouvettes de béton conservées dans le milieu chlorhydrique.



La très faible absorption d'eau des BHPZ caractéristique principale des bétons à hautes performances a une importance pour "imperméabiliser" la peau des bétons.

Les surfaces des éprouvettes (figure 12) des deux bétons sont observées au microscope à balayage et une microanalyse est réalisée sur les cristallites formées. La surface des éprouvettes de béton de pouzzolane est saine et couverte d'une couche de cristaux de calcite bien formés.

La carbonatation apparaît seulement à la surface des échantillons. L'absence de portlandite, à l'intérieur, couplée à une porosité insignifiante explique l'absence de calcite. Les formations cristallines superficielles du BHP sont visiblement plus attaquées par la solution chlorhydrique que celle du béton avec pouzzolane.

Les mesures de la perméabilité à l'air (figure 13) des bétons sont beaucoup moins courantes que celles concernant la perméabilité à l'eau. Leur intérêt est pourtant évi-

dent dans certains types d'ouvrages (réacteurs nucléaires) qui doivent être étanches à l'air. À titre indicatif, la perméabilité intrinsèque (gaz) du béton avec un rapport E/C = 0,33 est de $18 \text{ à } 15 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ [12].

Les résultats de la présente étude montrent jusqu'à une échéance de 12 mois, que le coefficient de perméabilité à l'air du BHP est nettement plus élevé que celui du BHPZ, cela est dû à l'amélioration des caractéristiques microstructurales de la pâte de ciment par l'ajout de pouzzolane naturelle.

La perméabilité à l'air du BHPZ est 2 à 16 fois plus faible que celle du BHP. La faible perméabilité du BHPZ limite les transferts à travers le matériau et donc les effets des agressions.

Les résultats des essais de perméabilité aux ions chlore (figure 14) montrent que la substitution d'une partie de ciment par la pouzzolane permet de réduire de façon consi-

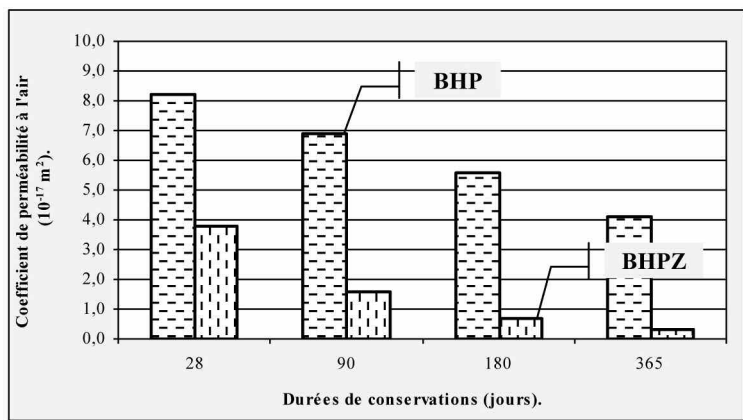


Figure 13 : Évolution du coefficient de perméabilité à l'air des différentes éprouvettes de béton.

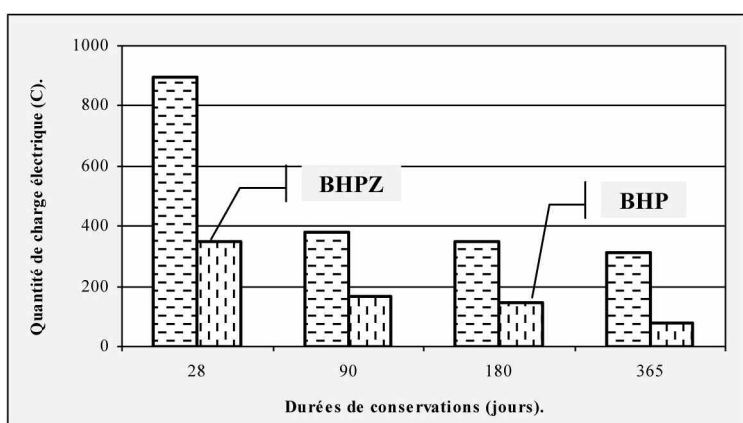


Figure 14 : Évolution de la charge électrique des différentes éprouvettes de béton.

dérable, tant la pénétration des ions chlore que la charge électrique véhiculée à travers l'échantillon.

Évidemment, cette réduction s'accroît avec l'âge du béton lors de l'essai compte tenu de la réactivité pouzzolane de l'ajout qui réduit la quantité de chaux hydratée dans la matrice cimentaire.

Cette diminution est liée au colmatage des pores des BHPZ et au faible rapport CaO/SiO_2 des CSH dans les pâtes contenant la pouzzolane naturelle, puisque les ions de sodium (Na^+) et de potassium (K^+) tendent à être inclus dans ces gels (CSH) à faible teneur en calcium.

Ce phénomène réduit la quantité d'alcalis dans la solution interstitielle ainsi que la conductivité électrique [13], donc augmentation de la résistivité électrique du béton. Lorsque le ciment est substitué par 5 % de pouzzolane finement broyée, la charge électrique diminue d'un facteur 2 à 4, respectivement à 28 et 365 jours.

Feng et al [14] ont utilisé 10 % de fumée de silice avec un rapport $\text{E/L} = 0,42$, ils ont trouvé que la charge électrique est réduite de 13.

Wee et al [15] ont trouvé que la quantité de charge passée d'un béton contenant 10 % de fumée de silices avec un $\text{E/L} = 0,5$ est 37 fois moins que celle du béton ordinaire.

Nous avons remarqué que le gradient thermique du BHP à la fin de l'essai est plus élevé que celui du BHPZ.

Cet essai a montré une plus grande résistance à la perméabilité aux ions chlore pour des bétons contenant de la pouzzolane naturelle. Ceci confirme la contribution de la pouzzolane face à la corrosion des BHPZ dans le milieu chlorhydrique.

L'hydratation des mélanges conduit à la formation de portlandite CH, de calcite CC, de monocarboaluminate $\text{C}_4\text{ACH}_{13}$ et d'un gel silico hydraté C-S-H pour toutes les compositions étudiées. Les observations au microscope électronique à balayage nous ont permis de préciser la structure des mélanges de béton durci, la micro analyse qui lui est associé permet de confirmer leur composition chimique.

Dans la pâte sans ajout (figure 15) certains pores sont remplis de cristaux d'hydroxyde de calcium, qui se présentent sous les formes habituelles de prismes et de plaquettes juxtaposées.

Des éléments fibreux de C-S-H et des aiguilles d'ettringite (E) sont également présents au voisinage des pores. Les fibres de silicates hydratés sont empilées et collées les unes aux autres et présentent des orientations multidirectionnelles. La structure lamellaire montre différentes morphologies. La majorité des empilements sont formés de fines aiguilles de silicates hydratés accolés les unes aux autres. L'autre configuration possible montre une juxtaposition de cristaux hexagonaux d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2).

La pâte de pouzzolane présente une structure des C-S-H et C-A-H plus homogène et une porosité très réduite, par voie de conséquence une présence d'ettringite secondaire (expansive) limitée.

En ce qui concerne la portlandite, elle se trouve en majeure partie combinée à la silice et l'alumine constituants actifs de la pouzzolane, pour donner naissance aux hydrosilicates et hydroaluminates de calcium de

deuxième génération, produits présentant une morphologie très dense.

Les observations au microscope électronique à balayage ont permis de mettre en évidence la morphologie des produits d'hydratation pour les deux pâtes de ciment.

De la même manière, nous avons mené une étude par diffraction de rayons X sur l'évolution de l'hydratation des composés du ciment avec et sans ajout de pouzzolane.

Les Radiogrammes de diffraction X des pâtes conservés dans la solution chlorhydrique sont reportés **figure 16**. Ils mettent clairement en évidence :

- En présence de pouzzolane, l'intensité des raies des composés anhydres est accentuée comparativement à celle du BHP. L'hydratation des composés anhydres se trouve freinée, conséquence de la densification de la matrice par l'ajout de pouzzolane ultrafine.
- Les raies de Portlandite et d'ettringite sont moins intenses. La pouzzolane se combine en majeure partie avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment et offre un grand nombre de sites de germination pour la précipitation des produits d'hydratation d'où densification de la matrice.

V. CONCLUSIONS

L'ajout de pouzzolane naturelle finement broyée, nous a permis de garantir la pérennité des bétons au sens mécanique de la structure, mais surtout, en fonction de ses interactions avec le milieu environnant.

La compacité élevée, la faible perméabilité à l'air, à l'eau et la faible porosité des bétons à hautes performances améliorent leur résistance aux agressions chimiques.

L'aptitude des bétons élaborés, vis-à-vis de la protection des armatures métalliques contre la corrosion sera excellente.

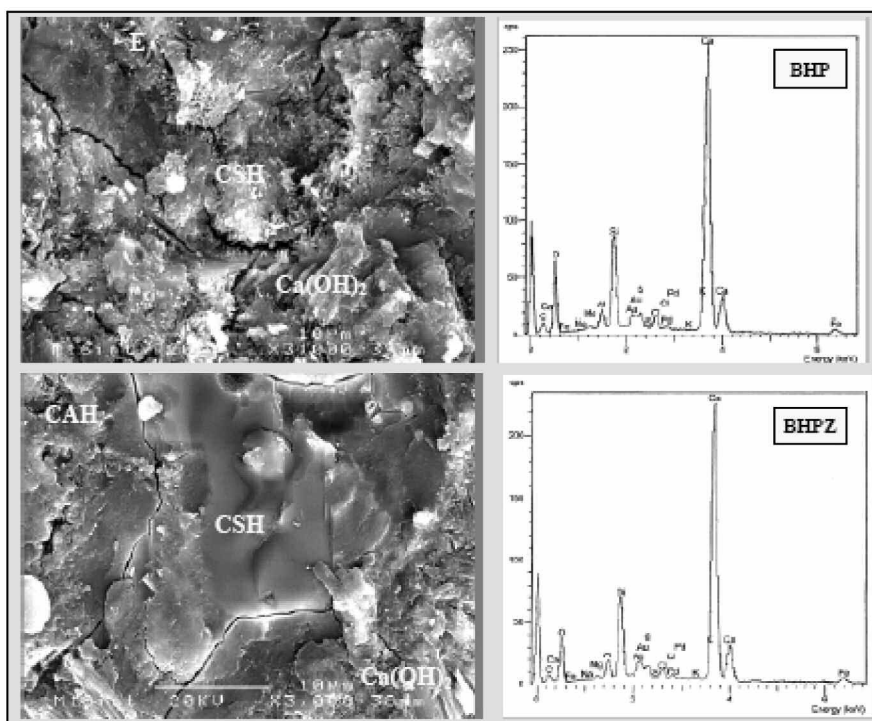
La pouzzolane entrant dans leur composition permet de ralentir la pénétration des agents agressifs et notamment des ions chlorures au cœur des bétons.

Cette étude expérimentale conduite conjointement au sein du Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, INSA-Rennes et du Laboratoire bâti dans l'environnement, USTHB-Alger a porté sur la substitution d'une partie de ciment par de la pouzzolane dans le but d'élaborer un béton de hautes performances.

Ainsi la granulométrie des particules de la pouzzolane, d'une surface spécifique BLAINE supérieure à celle du ciment, contribue à densifier la pâte par un effet physique de type filler qui conduit à un empilement plus compact des grains solides. Par ailleurs, la réaction chimique pouzzolanique conduit à modifier la microstructure des produits d'hydratation en réduisant la dimension des pores de la pâte hydratée.

L'incorporation de la pouzzolane dans le béton, permet d'améliorer leurs caractéristiques physico - mécaniques, engendrant une matrice plus dense, un béton plus compact et une adhérence entre les différents constituants plus développée par rapport à un béton à hautes performances sans ajout cimentaire. Par conséquent, des résistances mécaniques et chimiques dans le milieu chlorhydrique plus élevées.

Figure 15 : Observation au MEB de la microstructure interne des éprouvettes de pâte conservées dans le milieu chlorhydrique.



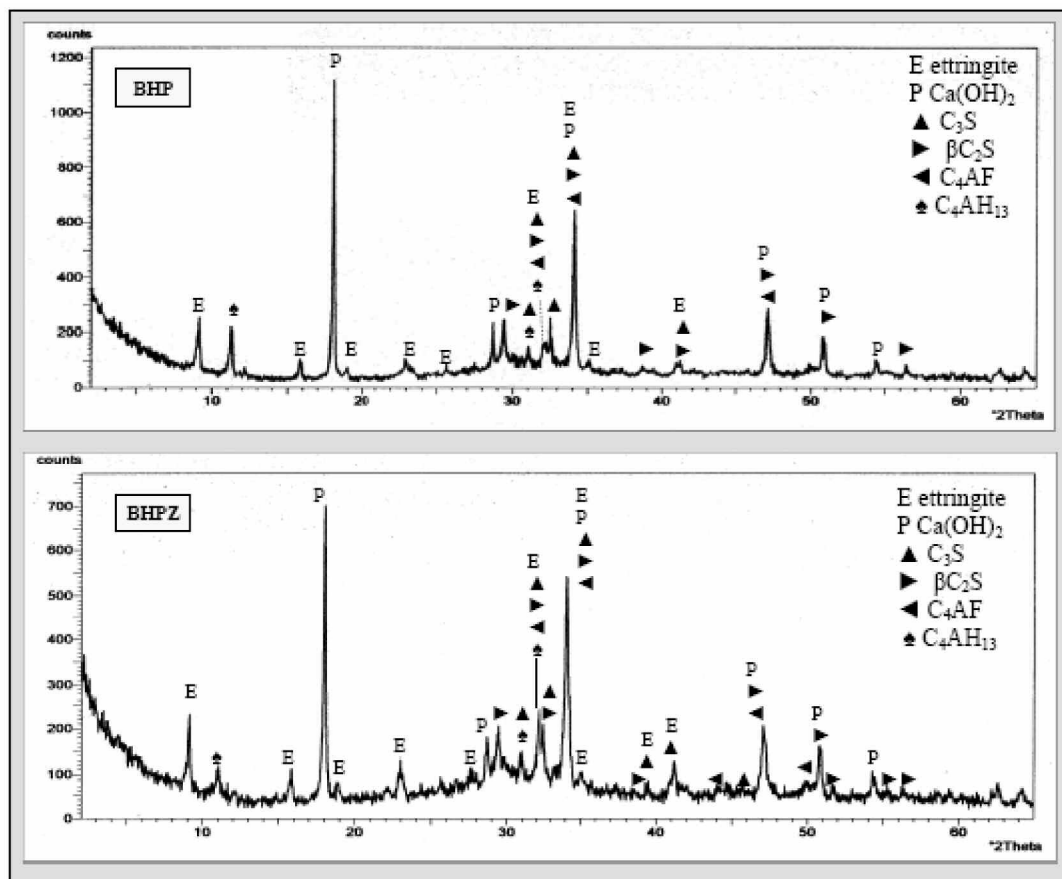


Figure 16 : Radiogramme des échantillons des différentes pâtes conservées dans le milieu chlorhydrique 365j.

VI. RÉFÉRENCES

- [1] Buil M., « comportement physico-chimique du système ciment - fumée de silice », Annales de l'ITBTP, Paris, 1990, Vol. 485, p. 19-29.
- [2] Aïtcin P.-C., Bétons haute performance, édition Eyrolles, ISBN 2-212-01323-X, 2001.
- [3] Burlion N., Yurtdas I. et Skoczylas F., Comportement mécanique et séchage de matériaux à matrice cimentaire. Comportement mortier/béton, *revue française de génie civil*, vol. 7, n°2/2003, p. 145-165.
- [4] Regourd M., Honain H., Levy P. et Mortureux B., Résistance du béton aux attaques physico-chimiques, 7^e congrès international de la chimie des ciments, vol. 3, VII, p. 104-109.
- [5] Gagné R., Aïtcin P.-C. and Lamoth P., Chloride-ion permeability of different concretes, In : *Proceedings of the 6th International Conference on durability of building materials and components*, Omiya, Japan, 1993, E & FN Spon, London, ISBN 0-419-18690-5, p. 1171-1180.
- [6] Gagné R., Pigeon M., Aïtcin P.-C., chloride-ion attack on low water cement ratio pastes containing silica fume, 4^e conférence internationale sur l'utilisation des cendres volantes, fumée de silice, laitier et autres pouzzolanes naturelles dans le béton, Istambul, Turquie 1991.
- [7] Chaid R., Jauberthie R., Bali A. et Abadlia M.-T., Formulation des bétons de hautes performances avec des ajouts cimentaires locaux, *Revue : Algérie équipement*, n°38, janvier 2004, ISSN 111-5211, p. 3-7.
- [8] Said Mansour M., Etude des propriétés des mortiers et bétons à base de ciments ternaires, *Thèse de Doctorat Université de Bida*, 2003.
- [9] Neville A.-M., Propriétés des bétons, *Editions Eyrolles*, P. 806, Sept 2000.
- [10] Talah A., Mérida A., Kharchi F. and Chaid R., Measure permeability to the air of the pozzolana (HPC) high performances concretes, *NucPerf 2006, Corrosion and Long Term Performance of Reinforced Concrete in Nuclear Power Plants and Waste Facilities*, on March 2006, Caradache, French, p. 27-30.
- [11] NF EN 934 - 2, Adjuvants pour béton, mortier et coulis, Partie 2 : adjuvants pour béton, Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage (indice de classement), p. 18.
- [12] Malier Y., La microstructure, dans les bétons à très hautes performances – caractérisation, durabilité, applications, *presses de l'école nationale des ponts et chaussées*, 2-85978-187-0, p. 667, 1992.
- [13] Talbort C., Pigeon M., Mardrand J. and Hornain H., Properties of Mortar mixtures containing high amount of various supplementary cementation materials, *Proceeding : Doctorate, American Concrete Institute*, 1995.
- [14] Feng N., Feng X., Hao T. and Xing F., Effet of ultrafine mineral power on the charge passed of the concrete, *cement and concrete research*, vol 32, p. 623 - 627, 2002.
- [15] Wec T.-H., Suryavanshi A.-K. and Tin S.-S., Evaluation of rapid chloride permeability test (RCPC) results for concrete containing mineral admixtures, *ACI Materials Journal*, vol 97, n° 02.2000, p. 221-232.