

Influence de l'addition du sable de dune en poudre au ciment sur les propriétés des bétons

S. Guettala^(a, b), B. Mezghiche^b

a. Département de génie civil, Université de Djelfa, 17000 Djelfa, Algérie

b. Laboratoire de recherche en génie civil LRGCB, Université de Biskra, 07000 Biskra, Algérie

Résumé :

Ce travail expérimental a porté essentiellement sur l'étude de la possibilité d'utiliser le sable de dune en poudre (SDP) comme addition partielle en masse au ciment Portland. L'incorporation du sable de dune en poudre, sous forme de substitution au ciment Portland permet d'obtenir une nouvelle variété de ciment composé ayant des propriétés physico-mécaniques supérieures à celles du ciment Portland. Les résultats obtenus montrent que la contribution de l'addition du sable de dune en poudre à l'activité liante du ciment résulte essentiellement de trois effets : physique, physico-chimique et chimique. Ces effets agissent simultanément et de manière complémentaire sur les propriétés des bétons.

Abstract :

This experimental work has focused on studying the possibility of using dune sand powder (DSP) as part addition to Portland cement. The incorporation of dune sand powder as an alternative to Portland cement yields a new variety of cement compound with physico-mechanical properties superior to those of Portland cement. The results obtained show that the contribution of addition dune sand powder to the cement binding activity results primarily from three effects : physical, physico-chemical and chemical. These effects act simultaneously and in a complementary way on the properties of concretes.

Mots clés : Ciment Portland, Addition, Sable de dune en poudre (SDP), Ciment composé, Propriétés des bétons.

1 Introduction

Les additifs présentent une activité liante croissant avec leur quantité, leur finesse, leur composition minéralogique et le type de ciment influe également. En termes pratiques, cette activité liante se traduit par un gain de résistance [1]. Par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment, les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes, cependant plusieurs études récentes [2, 3, 4 et 5] s'accordent pour distinguer trois principaux effets des additions (un effet granulaire, un effet physico-chimique et un effet chimique). Le sable de dune est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie. Ce matériau est pratiquement non exploité, malgré les éventuelles caractéristiques qu'il peut présenter. La contribution de l'addition du sable de dune en poudre SDP à l'activité liante du ciment résulte essentiellement de deux effets : un effet physico-chimique et un effet chimique. Son rôle est d'une part de modifier le processus d'hydratation du ciment ainsi que la structuration des produits hydratés et, d'autre part, de réagir en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés. Ces effets agissent simultanément et de manière complémentaire sur les propriétés des bétons. Le troisième effet physique est l'effet granulaire relatif aux modifications induites par la présence des particules fines dans le squelette solide du mélange [6 et 7]. L'utilisation du ciment prémélangé au SDP est un excellent moyen pour diminuer les émissions de dioxyde de carbone, améliorer les résistances en compression et même la consistance du mélange frais (les pâtes deviennent plus fluides). Au bout de 28 jours, la résistance en compression à 5, 10 et 15% de SDP est supérieure à celle du ciment de référence CEM I. Le sable de dune en poudre joue un rôle bénéfique jusqu'à des teneurs de 20% avec un effet optimum pour un pourcentage de l'ordre de 5 à 10%. L'analyse par DRX a mis en évidence le rôle pouzzolanique du SDP. En effet, la faible quantité de portlandite détectée dans les pâtes de ciment en présence du SDP, traduit la réaction pouzzolanique partielle, qui contribue à l'augmentation de la résistance en compression et qui améliore la compacité des pâtes du ciment par trois effets : physique, physico-

chimique et chimique. Les résistances à jeune âge se développent à cause de l'accélération de l'hydratation du ciment combinée à l'effet physique, tandis que celles à moyen et surtout à long terme se développent grâce à la réaction pouzzolanique [6 et 7]. A la lumière de ce qui a été évoqué précédemment, l'objectif recherché est d'évaluer expérimentalement la contribution combinée des effets physique, physico-chimique et chimique de l'addition du SDP sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons.

2 Matériaux

- Il s'agit ici d'un broyage du sable de dune, après en procède au tamisage. Le choix d'une addition par rapport à une autre est en général, après la disponibilité locale à des coûts acceptables, fait en fonction de la teneur élevée en silice. Nous avons utilisé un sable de dune de la région de Biskra. Du point de vue chimique la constatation importante à signaler est la présence d'un fort pourcentage en silice SiO_2 qui est supérieur à 74%, et par conséquent le sable de dune de Biskra est un sable siliceux. Nous avons analysé par diffractométrie aux rayons X le SDP, pour mettre en évidence sa nature minéralogique. Les résultats montrent que le SDP présente une structure siliceuse cristallisée du type low-quartz. La masse volumique apparente = 1300 kg/m^3 , la masse volumique des grains = 2770 kg/m^3 et la surface spécifique = $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$.

- Le ciment utilisé est un CEM I de classe 42.5 MPa. Il résulte du broyage du clinker avec environ 5% du gypse, pour la régularisation de la prise. Le clinker est celui de la cimenterie de Ain-Touta (Batna). L'analyse chimique du clinker montre qu'il est conforme à la norme NFP 15-301. La masse volumique apparente = 1120 kg/m^3 , la masse volumique des grains = 3050 kg/m^3 et la surface spécifique = $3200 \text{ cm}^2/\text{g}$.

- L'eau utilisée est l'eau potable (eau du robinet) qui contient peu de sulfate et dont la température est de $20 \pm 1^\circ\text{C}$, sa qualité est conforme aux prescriptions de la norme NFP 18-404.

- Le sable utilisé provient de la région de Biskra (Rivière d'Oued-Djedi). La courbe granulométrique du sable s'inscrit dans le fuseau recommandé. L'analyse granulométrique est donnée sur la FIG. 1. La masse volumique apparente = 1440 kg/m^3 , la masse volumique des grains = 2500 kg/m^3 , le module de finesse = 2,37 (préférentiel), l'équivalent de sable (ES à vue) = 73 (sable légèrement argileux de propreté admissible pour bétons de qualité courante) et l'équivalent de sable (ES piston) = 68.

- Nous avons utilisé des pierres concassées de fractions 7/15 et 15/25 de la région de AIN-TOUTA (Batna). La courbe granulométrique est présentée sur la FIG. 1. La masse volumique apparente = 1420 kg/m^3 , la masse volumique des grains = 2610 kg/m^3 et le coefficient de Los Angeles = 21% (dur).

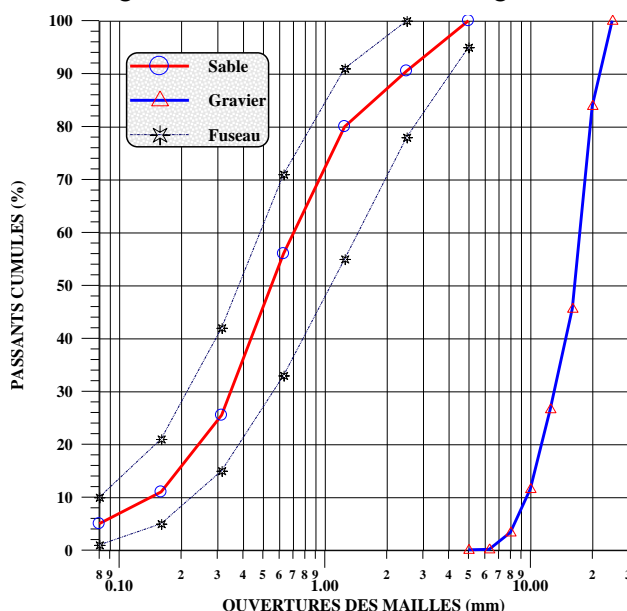


FIG. 1 – Courbe granulométrique du sable et gravier

3 Formulation des bétons

L'optimisation de la formulation des bétons s'appuie sur plusieurs critères qui doivent faire l'objet d'un compromis: la consistance, la résistance, la durabilité et l'économie. Devant la multiplicité des méthodes utilisées pour déterminer la composition des bétons, on a utilisé celle qui semble être la moins connue. C'est

la méthode de B. Scramtaiv. Cette méthode repose sur le fait que la somme des volumes absolus des matériaux d'origine dans un mètre cube est égale au volume de la composition du béton damé [8]. On désire réaliser un béton dont la résistance moyenne $R_{b28j} = 36$ MPa et dont la consistance est telle que son affaissement au cône soit de 7 ± 0.5 cm. Dans tous les essais le rapport $E/L \geq 0.4$, $A = 0.6$, $D_{\max} = 25$ mm et $S/G = 0.42$. Les compositions des trois mélanges de bétons sont reportées dans le TAB.1

Constituants	Bétons		
	BO	B10	B20
Eau/liant	0.52	0.49	0.46
Ciment	350	315	280
Sable 0/5	538	538	538
Gravier 7/15	446	446	446
Gravier 15/25	828	828	828
10% Sd	-	35	-
20% Sd	-	-	70

BO : Béton ordinaire à base de CEM I
 B10 : Béton à base de CEM I + 10% SDP
 B20 : Béton à base de CEM I + 20% SDP

TAB. 1 – Compositions des bétons en (kg/m³)

4 Résultats et discussions

4.1 Propriétés physiques

4.1.1 Consistance

Il est important de connaître les propriétés du béton à l'état frais avant prise et durcissement. Parmi ces propriétés, la consistance qui peut se définir comme la facilité de la mise en œuvre des bétons. L'essai d'affaissement au cône d'Abrams norme NF P 18-451 est actuellement en usage dans le monde entier ; il fournit des mesures fiables, de variabilité restreinte. En fonction des affaissements obtenus, la classe de consistance des différents bétons est plastique (l'affaissement varie de 5 à 9 cm).

4.1.2 Porosité volumique

Gallé [9] indique que la porosimétrie à l'eau peut être une méthode plus réaliste que la porosimétrie par intrusion de mercure. En effet, la porosimétrie à l'eau prend en compte la micro-porosité capillaire (c-à-d. les pores dont le diamètre moyen est compris entre 0,8 et 2 μm) ainsi que la porosité des C-S-H (volume interfoliaire) car l'eau peut pénétrer dans des espaces d'une taille de 0,5 μm . A partir du volume de l'éprouvette, on peut alors calculer sa porosité volumique représentant le rapport de son volume poreux à son volume total. Sur une base expérimentale, soit par la pesée hydrostatique d'une éprouvette saturée, on détermine alors le volume total de l'éprouvette (fraction poreuse et solide) et on calcule ainsi sa porosité volumique, $\varepsilon_{\text{expé}}$ à partir de la relation suivante :

$$\varepsilon_{\text{expé}} (\%) = ((M_{\text{sss}} - M_{\text{sèche}}) / (M_{\text{sss}} - M_{\text{eau}})) \times 100 \% \quad (1)$$

Où :

$\varepsilon_{\text{expé}}$: Porosité volumique établie expérimentalement par pesée hydrostatique, excluant le volume d'air piégé et/ou entraîné (%);

M_{sss} : Masse de l'éprouvette saturée, superficiellement sèche (g);

$M_{\text{sèche}}$: Masse sèche de l'éprouvette (g);

M_{eau} : Masse de l'éprouvette saturée, superficiellement sèche, pesée dans l'eau (g).

La procédure d'évaluation de la porosité est la suivante : Les éprouvettes sont séchées dans une étuve à 105°C pendant 24 heures, puis immergées dans l'eau pendant 48 heures, l'échantillon est mis ensuite dans un bain d'eau bouillante pendant 5 heures, les éprouvettes sont retirées pour être pesées à l'air et à l'eau (pesée hydrostatique). La méthode utilisée dans ce test est celle établie par ASTM désignation C 624 [10]. La porosité est estimée après 28 et 180 jours de durcissement sur des éprouvettes cubiques de (10×10×10) cm³. Les résultats obtenus sont représentés sur la FIG. 2.

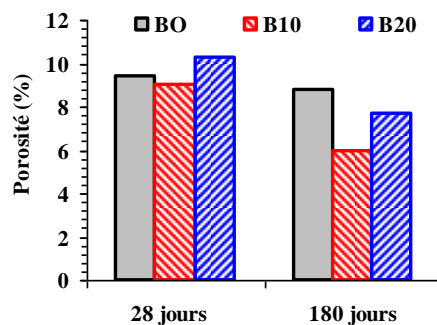


FIG. 2 – Porosité accessible à l'eau des bétons en fonction du temps

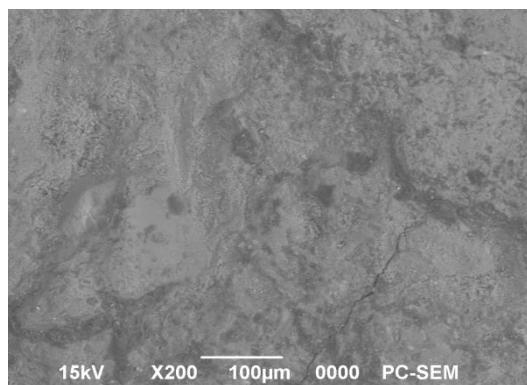
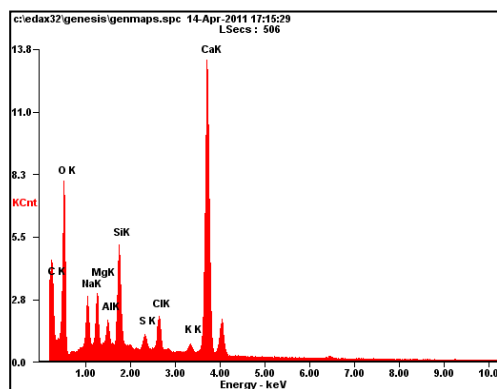
La porosité du matériau est le premier indicateur de la durabilité, car la porosité est le siège des agressions extérieures : plus le matériau est poreux, plus la pénétration d'agents est facilitée, et donc plus sa durabilité est limitée. Les résultats montrent que : À 28 jours de durcissement, la porosité du béton B10 est inférieure à celle des autres bétons, ce qui est expliqué par la bonne qualité de l'interface mortier/gravier. À 180 jours, la porosité diminue pour atteindre les valeurs représentées sur la FIG. 2, l'addition du 10 % SDP a provoqué une réduction de l'ordre de 32% de la porosité par rapport à celle du béton ordinaire. Les bétons améliorent leur porosité à long terme, ce qui confirme la continuation des réactions d'hydratation, conduisant ainsi au développement de la structure interne par la production de nouveaux produits d'hydratation qui précipitent pour fermer les pores déjà existant dans la structure, en faisant diminuer le nombre de gros pores et augmenter celui des petits pores. Pour le béton B20, une croissance de la porosité de l'ordre de 9.6% à moyen terme (28 jours). Par contre à long terme (180 jours) une réduction de l'ordre de 12.5% à celle du BO.

4.1.3 Interface mortier/gravier

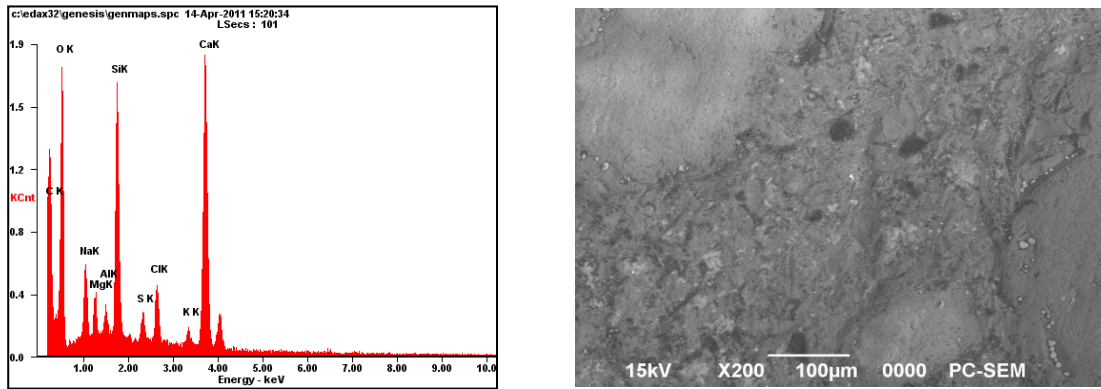
L'interface mortier/gravier est souvent décrite comme une zone dont l'épaisseur, variable de 10 à 50 μm , dépend principalement des propriétés pouzzolaniques des additions minérales. Cette zone présente une forte porosité ce qui induit des caractéristiques mécaniques médiocres. Il est souvent avancé que l'adhésion entre le gravier et le mortier conditionne la résistance mécanique des bétons [11 et 12].

Pour examiner la zone de transition interfaciale à 180 jours des bétons BO et B10, nous avons procédé à un agrandissement ($\times 200$) à partir d'un MEB sur surfaces polies. Les analyses ont été faites au laboratoire de l'université de Biskra. Le microscope électronique à balayage utilisé pour ce travail est un JEOL JSM – 6390 LV équipé d'une microsonde pour l'analyse en sélection d'énergie.

Pour cela, les échantillons sont d'abord coupés et polis afin de présenter une surface plane. La qualité des analyses est donc directement liée à la qualité du polissage. La surface analysable est de $(2 \times 2) \text{ cm}^2$ et l'épaisseur de l'échantillon ne doit pas dépasser 1.5 cm. Les photos obtenues au MEB et la microanalyse élémentaire par spectrométrie X sont présentées sur les FIGS. 3a et 3b.



a. Béton ordinaire à base de CEM I



b. Béton à base de CEM I + 10% SDP

FIG. 3 – Observation au MEB de la zone de transition interfaciale et la microanalyse élémentaire par spectrométrie X

Les FIGS. 3a et 3b représentent respectivement l'observation au MEB du point de contact mortier/gravier des bétons BO et B10. On peut voir que, la zone de transition interfaciale est presque inexistante pour le béton B10, le mortier est en contact direct avec le gravier. Inversement, une microfissure sépare le mortier du gravier pour le béton ordinaire et la fissuration amorcée au sein du mortier. La microstructure des bétons se différencie essentiellement au niveau du degré de décollement à l'interface mortier/gravier. Pour le béton B10, La réaction pouzzolanique permet d'augmenter la résistance à l'interface mortier/gravier. En effet, la portlandite cristallise à la surface des graviers, la réaction avec le SDP permet de consommer celle-ci et de créer des hydrates de type C-S-H II semi-cristallisé de deuxième génération bien liés aux graviers. La microanalyse élémentaire par spectrométrie X montre que le rapport (CaO/SiO_2) plus faible dans le cas du béton B10 de l'ordre de (1.11) par rapport à celui du béton ordinaire de l'ordre de (1.58). Selon [13 et 14], cette diminution du rapport (CaO/SiO_2) traduit parfaitement la fixation de la portlandite par le sable de dune en poudre (réaction pouzzolanique).

4.2 Propriétés mécaniques

Dans cette partie, il s'agit des essais de compression, flexion et traction par fendage sur des éprouvettes cubiques, prismatiques et cylindriques, respectivement [8]. On a confectionné trois sortes de bétons BO, B10 et B20, chaque série comprend trois échantillons. Les éprouvettes ont été conservées à l'eau pour éviter tout échange d'eau avec l'extérieur, la température a été maintenue constante à $20 \pm 1^\circ C$. Les résultats obtenus des résistances à 7, 28, 90 et 180 jours, sont illustrés sur la FIG. 4.

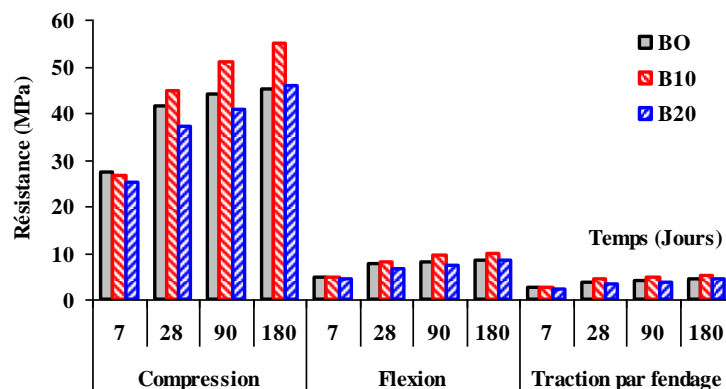


FIG. 4 – Résistance à la compression, flexion et traction par fendage des bétons en fonction du temps

Pour tous les bétons la résistance en compression augmente progressivement avec l'âge de conservation dans l'eau, ce qui peut s'expliquer par le développement du phénomène d'hydratation du ciment en fonction du temps en présence d'une humidité suffisante (FIG. 4). Cela est dû à la cinétique de la réaction d'hydratation du ciment et de la réaction du SDP avec la portlandite. La présence du SDP accélère la réaction d'hydratation du ciment Portland. Cet effet accélérateur sur l'hydratation, combiné à l'effet de remplissage dû à leur

finesse, peut conduire à de meilleures résistances des bétons. La résistance en compression, montre que le béton B10 est clairement supérieur aux bétons BO et B20, ce qui permet également de réduire la teneur en ciment pour une résistance et un affaissement donnés. Cette dernière caractéristique est très intéressante du point de vue économique, étant donné que le ciment est l'ingrédient le plus cher dans la composition des bétons. Un autre avantage est qu'il permet au béton de poursuivre l'amélioration de ses performances mécaniques même après la période de 28 jours. L'effet du SDP sur la résistance à la flexion et la traction par fendage est similaire à celui de la résistance à la compression. On a remarqué aussi que la résistance à la traction est environ 10 fois plus faible que la résistance à la compression. Les résistances en compression des bétons sont inversement proportionnelles à la porosité. La contribution du SDP à l'amélioration de la résistance en compression est beaucoup plus significative que celle sur le remplissage de la porosité. Le SDP influe sur cette contribution qui semble être le résultat d'un effet structurant améliorant la solidité mécanique des liaisons mortier/gravier que le résultat d'un effet quantitatif sur le volume des produits hydratés formés.

5. Conclusion

A la lumière des essais réalisés, on peut affirmer que l'utilisation du ciment prémélangé au sable de dune en poudre est un excellent moyen pour diminuer les émissions de dioxyde de carbone, améliorer les propriétés physiques et mécaniques des bétons. L'utilisation du sable de dune en poudre améliore globalement la structure poreuse des bétons et contribue aussi à la densification de l'interface mortier/gravier. De ce fait, le sable de dune en poudre modifie les propriétés mécaniques, ce qui permet une nette augmentation de la durabilité des bétons. Ces résultats justifient bien l'intérêt que présente la valorisation du sable de dune.

References

- [1] Bessa A., Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers. Thèse de Doctorat de l'université de Cergy Pontoise, 2004.
- [2] Benezet J.C., Benhassaine A., Influence de la taille des particules sur la réactivité pouzzolanique de poudres de quartz. Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, n°. 219, 17-28, 1999.
- [3] Kara Ali R., Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires. Thèse de Doctorat de l'université de Cergy Pontoise, 2002.
- [4] Lawrence P., Cyr M., Ringot E., Mineral admixtures in mortars, effect of type, amount and finesses of fine constituents on compressive strength. Cement and Concrete Research (Elsevier) vol.35 (6), 1092-1105, 2005.
- [5] Cyr M., Lawrence P., Ringot E., Efficiency of mineral admixtures in mortars, quantification of physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. Cement and Concrete Research (Elsevier) vol.36 (2), 264-277, 2006.
- [6] Guettala S., Mezghiche B., Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing dune sand powder. Construction and Building Materials (Elsevier) vol. 25(3), 1263-1269, March 2011.
- [7] Guettala S., Mezghiche B., Mellas M., Influence of addition dune sand powder to cement, on the properties physical-mechanical and deformability of concrete. Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing) vol. 13(6), 765-781, December 2012.
- [8] Mezghiche B., Les essais de laboratoire des matériaux de construction. Publication Universitaire Biskra, 120, 2005.
- [9] Gallé C., Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry. A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying. Cement and Concrete Research (Elsevier) vol.31 (10), 1467-1477, 2001.
- [10] AFPC-AFREM., Durability of concretes, Recommended methods for measurement of quantities associated with the durability, Compte rendu des Journées Techniques du 11 et 12 Décembre, Toulouse, France, 283, 1997.
- [11] Liao K.Y., Chang P.K., Peng Y.N. and Yang C.C., A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete. Cement and Concrete Research (Elsevier) vol.34 (6), 977-989, 2004.
- [12] Gao J.M., Qian C.X., Liu H.F., Wang B. and Li L., ITZ microstructure of concrete containing GGBS. Cement and Concrete Research (Elsevier) vol.35 (7), 1299-1304, 2005.
- [13] Baron J., Ollivier J.P., La durabilité des bétons. Press de l'école national des ponts et chaussées, 1992.
- [14] Carles-Gibergues A., Grandet J., Ollivier J. P., Evolution dans le temps de l'auréole de transition de pâtes contenant des ajouts. Laboratoire de Génie Civil I.N.S.A. Colloque international Toulouse France, 17-18-19 Novembre, liaisons pâtes de ciment- matériaux associés, RILEM, 1982.