
Effets de la nature de l'addition minérale sur la diffusion et la perméabilité au gaz des BAP

H. Siad ^{1*}, H.A. Mesbah ², H. Khelafi ³, G. Escadeillas⁴, M. Mouli⁵

¹ Université de Tiaret, Route Zaaroura, BP 78 Tiaret 14000, Algérie

² Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, INSA de Rennes (Laboratoire LGCGM), 20, av. des Buttes de Coësmes CS 70839, 35708 Rennes cedex 07; France

³ Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, USTO, BP1505 ElMnaouar (Laboratoire des Matériaux); Algérie

⁴ Université de Toulouse; UPS, INSA; LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions); 135 Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse cedex 04; France

⁵ Ecole Normale des Sciences et Technologie d'Oran, ENSET (Laboratoire des Matériaux)

RESUME. Les études antérieures se focalisant beaucoup plus sur la comparaison entre le BAP et le béton ordinaire vibré (BOV). Cet article vise à montrer l'influence de la nature de certains ajouts minéraux (filler calcaire, pouzzolane naturelle et cendre volante) sur les propriétés de transferts des bétons et à chercher une relation entre la diffusion et la perméabilité au gaz des BAP. Le programme expérimental comprend, au total, douze formulations couvrant trois différentes classes de résistances et quatre types de bétons. Les résultats expérimentaux obtenus montrent une étroite relation entre les indicateurs de durabilité et la nature de l'addition minérale dans les BAP. Pour les coefficients de diffusion des ions chlore et de perméabilité à l'hélium, nous avons pu remarquer que l'incorporation de la PZ ou de la CV dans les BAP a un effet très bénéfique sur ces deux paramètres de transferts.

ABSTRACT. The previous studies focus more on the comparison between the BAP and the ordinary vibrated concrete (BOV). This article aims to show the influence of the nature of some mineral additives (natural pozzolan, fly ash and limestone filler) on the transfer properties of concrete and seek a relationship between diffusion and gas permeability of SCC. Our experimental program comprises in total, twelve different formulations covering three classes of resistance and four types of concrete. The experimental results show a close relationship between sustainability indicators and the nature of the mineral addition in SCC studied. For the diffusion coefficients of chloride ions and helium permeability, we observed that the incorporation of NP or FA in SCC has a very beneficial transfers of these two parameters.

MOTS-CLES : bétons autoplaçants, addition minérale, durabilité, perméabilité au gaz, diffusion des ions chlore, propriétés de transferts.

KEYWORDS: self compacting concrete, mineral additions, durability, gas permeability, chloride ion diffusion, transfer properties.

1. Introduction

Les données de la littérature sur la durabilité des BAP ont montré qu'un grand nombre de recherches a concentré ses études sur la comparaison entre les BAP et les BOV de même résistance mécanique (Assié, 2004, RILEM, 2008) mais qu'il n'y a que peu d'informations sur l'effet du type d'addition minérale sur le comportement des BAP.

Nous avons choisi d'étudier l'influence du type et de la quantité d'addition minérale sur la diffusion des ions chlore et sur la perméabilité au gaz des BAP. Le choix de ces deux paramètres de transfert est justifié par le fait que la plupart des processus de détérioration touchant les structures en béton impliquent les transferts de matière à l'intérieur d'un matériau poreux comme le béton. Les additions, objets de notre étude, sont le filler calcaire, la pouzzolane naturelle et la cendre volante le BOV est considéré comme un béton de référence.

2. Matériaux utilisés

Le ciment utilisé est un ciment CEMI 52,5 N. Le sable, de fraction 0/4 est d'origine alvéolaire. Les gravillons, de fractions 4/6 et 6/12,5, sont issus de roches silico-calcaires.

Le tableau 1 regroupe les différentes caractéristiques physico-chimiques du ciment et des additions utilisées.

Composition %	C	FC	PZ	CV
SiO ₂	21	0.4	45.67	49.6
CaCO ₃	-	98.5	-	-
CaO	68	-	8.98	3.00
Al ₂ O ₃	5.81	-	15.1	23.8
Fe ₂ O ₃	3.26	-	10.14	17
Densité	3.13	2.70	2.61	2.2
finesse Blaine (m ² /kg)	380	406	365.6	384
Indice d'activité i ₂₈	-	0.75	0.81	0.79

Tableau 1. Analyse chimique et caractéristiques physiques du ciment et des additions utilisées.

Les trois types d'additions utilisés sont: un filler calcaire *BETOCARB*® P2, une pouzzolane naturelle qui provient de la région de Beni-Saf (Algérie) et une cendre volante silico-alumineuse de classe F.

3. METHODES D'ESSAIS

3.1. Méthodes de formulations

La formulation du béton autoplaçant est déterminée par le logiciel « BétonLab.Pro » en tenant compte des différentes données relatives aux matériaux utilisés.

Douze formulations ont été étudiées, couvrant ainsi trois différentes classes de résistances (30, 50 et plus de 70 MPa) et quatre types du béton, à savoir un BAP avec filler calcaire (BAP FC), un BAP avec pouzzolane naturelle (BAP PZ) un BAP avec cendre volante (BAP CV) et un béton ordinaire vibré (BOV) choisi comme béton de référence. La qualité du béton à l'état frais a été vérifiée selon les essais recommandés par l'AFGC (2002).

Le tableau 2 présente la composition des différents bétons élaborés

Composition (kg/m ³) Bétons	C	FC	PZ	CV	S (0/4)	G 4/6	G 6/12	E (l)	SP (l)	E/L ₁
BOV30	260	-	-	-	830	171	1000	183	0,9	0,7
BAP30 FC	260	260	-	-	807	165	660	199	2,9	0,7
BAP30 PZ	260	-	260	-	781	159	639	215	3,7	0,7
BAP30 CV	260	-	-	260	757	155	620	215	3,8	0,7
BOV 50	350	-	-	-	777	159	936	182	9,0	0,52
BAP50 FC	350	170	-	-	814	166	666	198	6,7	0,52
BAP50 PZ	350	-	170	-	790	161	646	214	6,0	0,52
BAP50 CV	350	-	-	170	774	158	634	214	4,0	0,52
BOV 70	450	-	-	-	746	154	900	176	2,9	0,39
BAP70 FC	450	70	-	-	839	171	687	183	9,7	0,4
BAP70 PZ	450	-	70	-	831	170	681	188	10,5	0,4
BAP70 CV	450	-	-	70	825	168	676	188	11,5	0,4

Tableau 2. Formulation des bétons d'essais

Le dosage du superplastifiant a été choisi de manière à avoir un étalement de 66 ± 1 cm pour tous les BAP et un affaissement voisin de 6 cm pour les BOV.

3.2. Méthode expérimentale

3.2.1. Diffusion des ions chlore

Pour la diffusion des ions chlores, nous avons utilisé le mode opératoire de l'essai de migration en régime transitoire ou essai « Tang Luping » (Tang, 1996) recommandé par la norme NT BUILD 492 (1999). Il consiste à appliquer une différence de potentiel entre deux faces d'un échantillon de béton afin de faire pénétrer les ions chlores par migration (figure 1).

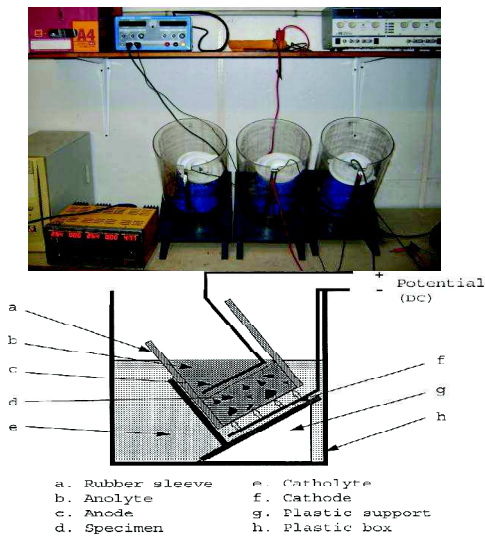


Figure 1. Dispositif expérimental de l'essai de diffusion des ions chlore et schéma de la cellule de migration [NT BUILD 492, 1999]

Le calcul du coefficient de diffusion effectif (D_{nSSn}) d'un corps d'épreuve s'effectue selon la formule suivante :

$$D_{nSSm} = \frac{0,0239 (273 + T)L}{(U - 2)t} \left(X_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)LX_d}{U - 2}} \right) \quad [1]$$

Où D_{nSSn} : coefficient de diffusion effectif ($\times 10^{-12}$ m²/s),
 U: tension appliquée (V),
 T: température de la solution (°C),
 L: épaisseur de l'échantillon (mm),
 X_d : profondeur de pénétration (mm),
 t: la durée de l'essai (heures).

3.2.2. Perméabilité au Gaz

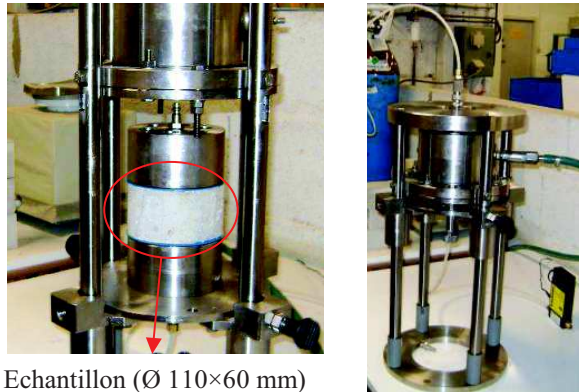
Le gaz utilisé dans cette étude est l'hélium. L'essai utilisé a été choisi selon les recommandations de Cembureau (Kollek, 1989) et RILEM TC 116-PCD (1999). Une pression d'entrée de 2,0 bars a été utilisée dans notre étude. Le dispositif expérimental est présenté sur la figure 2.

Le coefficient apparent de perméabilité au gaz (K_{app}) a été calculé selon la relation de Hagen-Poiseuille (RILEM, 1999, Khan, 2003):

$$K_{app} = \frac{2 \mu P_2 QL}{A (P_1^2 - P_2^2)}$$

[2]

Avec Q: débit du Gaz utilisé en (m^3/s),
 A: section de l'échantillon en (m^2),
 L: épaisseur de l'échantillon en (m),
 μ : viscosité dynamique du gaz utilisé en (Pa.s),
 P1 et P2: pression absolue du gaz à l'entrée et à la sortie en (Pa)



Echantillon ($\varnothing 110 \times 60$ mm)

Figure 2. Dispositif expérimental utilisé pour la mesure de la perméabilité au gaz

4. Résultats expérimentaux et analyses

4.1. Coefficients apparents de diffusion (D_{nssm})

La variation des coefficients de diffusion apparents des bétons étudiés en fonction du temps est présentée sur les figures 3, 4 et 5.

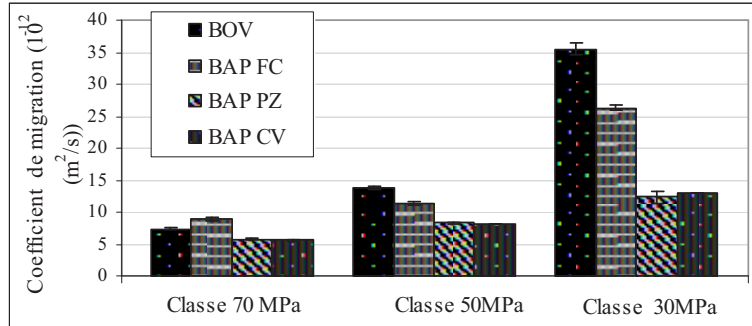


Figure 3. Coefficient de migration des bétons étudiés, après 28 jours de cure

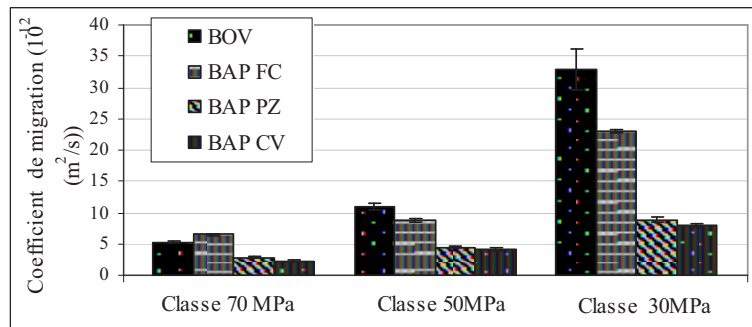


Figure 4. Coefficient de migration des bétons étudiés, après 90 jours de cure

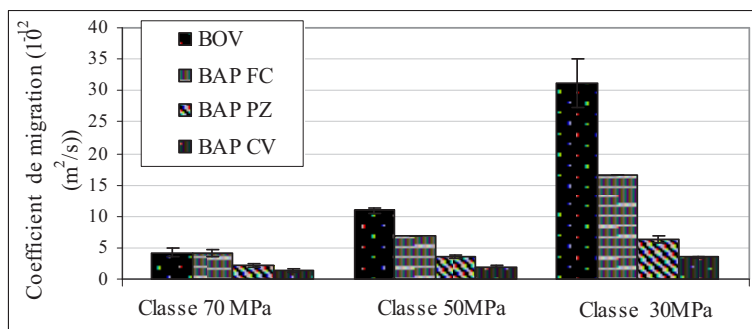


Figure 5. Coefficient de migration des bétons étudiés, après 360 jours de cure

Pour la même classe de résistance, la comparaison entre les formulations du BAP permet de constater l'influence positive de l'incorporation de la pouzzolane naturelle ou de la cendre volante. Les BAP PZ et les BAP CV présentent des coefficients nettement inférieurs à ceux des BAP FC et la différence est d'autant importante que

la classe de résistance est faible (différence de plus de 50 % pour la classe 30 MPa). Ces résultats sont en accords avec ceux d'Audenaert et al. (2003) et Heirman et al. (2006) qui ont étudié la pénétration des ions chlore dans les bétons. La diminution de D_{nssm} est très probablement liée à la distribution des pores et à leurs tailles plus petites dans les BAP PZ et les BAP CV. L'origine vient de la réaction pouzzolanique de la pouzzolane naturelle et de la cendre volante qui engendre la formation de C-S-H pouzzolanique, comble une partie de la porosité capillaire et conduit à une diminution du coefficient de diffusion (Nguyen, 2006).

Du point de vue des comparaisons entre BAP et BOV, le BAP présente en général des coefficients de diffusion plus faibles par rapport au BOV de même classe de résistance, surtout pour les bétons de plus faibles résistances. Coppola et al. (2004) ont relié la différence du comportement à la grande quantité de l'ajout minéral (pouzzolane naturelle, cendre volante et filler calcaire) dans la pâte du BAP qui favorise une microstructure plus dense dans la zone interstitielle et contribue ainsi à diminuer le coefficient de diffusion des ions chlore.

4.2. Perméabilité au gaz

La variation des coefficients apparents de perméabilité au gaz est présentée en fonction du temps de conservation sur les figures 6, 7 et 8.

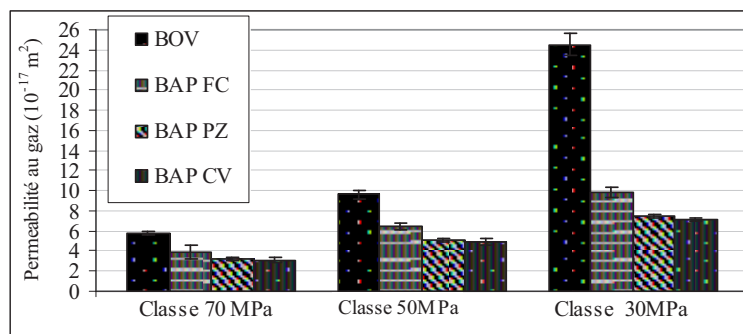


Figure 6. Coefficient de perméabilité au gaz des bétons étudiés, après 28 jours de cure

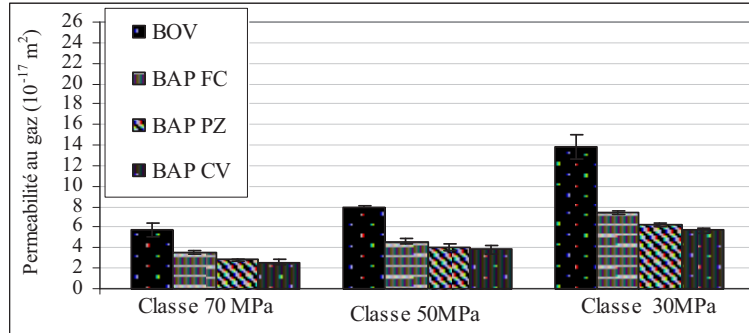


Figure 7. Coefficient de perméabilité au gaz des bétons étudiés, après 90 jours de cure

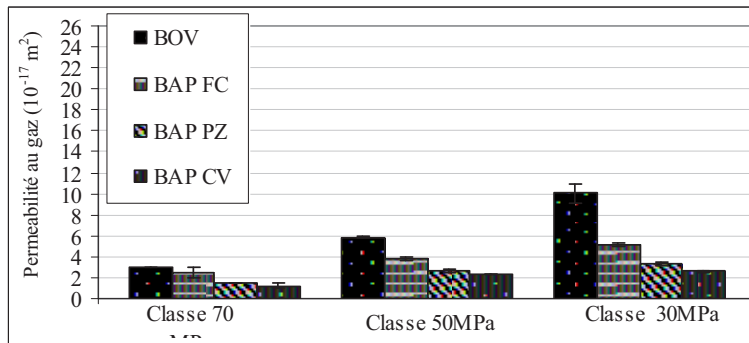


Figure 8. Coefficient de perméabilité au gaz des bétons étudiés, après 360 jours de cure

Après 28 jours de cure (figure 6), nous notons des coefficients plus ou moins proches pour les BAP de même classe de résistance. Néanmoins, les formulations des BAP FC présentent une perméabilité légèrement supérieure par rapport à celles des BAP PZ ou des BAP CV. La différence semble augmenter après 360 jours de conservation, en particulier pour la classe 30 MPa où nous trouvons un écart de 35 % et 50 %, respectivement par rapport au BAP30 PZ et au BAP30 CV. La pouzzolane naturelle et la cendre volante utilisées, permettent généralement de diminuer la perméabilité au gaz des BAP. Ceci est dû à la microstructure plus dense et à la réaction pouzzolanique et peut s'expliquer par le raffinement et la segmentation de la porosité capillaire engendrée par l'hydratation des particules de pouzzolane naturelle et de cendre volante. La comparaison entre la perméabilité du BAP et du BOV montre que, toutes les formulations de BAP présentent de faibles coefficients par rapport à celui du BOV de même classe de résistance.

4.3. Relation entre les coefficients de perméabilité au gaz et les coefficients de diffusion des ions chlore

Des travaux antérieurs (Tanget Nilsson, 1993, Sugiyama et al. 1996) ont déjà mentionné l'existence d'une grande corrélation entre la perméabilité au gaz et la diffusion des ions chlores. La figure 9 représente les coefficients de perméabilité au gaz en fonction des coefficients de diffusion des ions chlore des différents bétons.

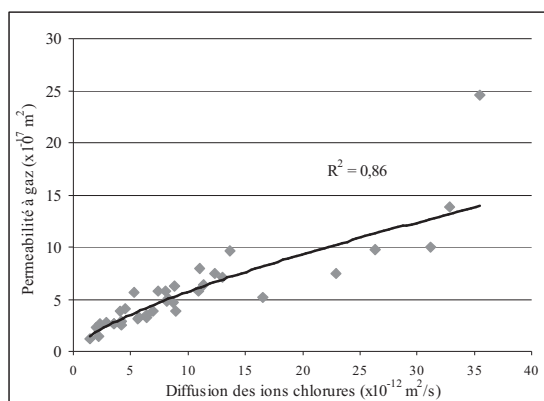


Figure 9. Variation des coefficients de perméabilité au gaz en fonction des coefficients de diffusion des ions chlore.

Nous pouvons constater en premier lieu que la perméabilité au gaz augmente avec le coefficient de diffusion des ions chlore. Ceci confirme l'existence d'une relation étroite entre la perméabilité et la diffusion. Indépendamment du type d'addition minérale dans les BAP et du type de béton, le coefficient de corrélation est de l'ordre de 0,86. Selon Sugiyama et al. (1996), la corrélation entre les coefficients de perméabilité et ceux de diffusion est due au fait que ces deux propriétés physiques sont liées en grande partie au même facteur qui est le rapport Eau/Liant.

5. Conclusion

En fonction des résultats expérimentaux de notre étude, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Le type d'addition minérale utilisée dans les formulations de BAP influe considérablement sur la diffusion et sur la perméabilité des BAP. Le BAP PZ présentent des coefficients de diffusion et de perméabilité très proches de ceux du BAP CV et nettement inférieurs à ceux des BAP FC.

- Les coefficients de diffusion des formulations du BOV sont en général supérieurs à ceux des formulations de BAP, en particulier pour l'addition de pouzzolane naturelle ou de cendre volante.
- Le BAP PZ montre une bonne résistance contre l'intrusion des ions chlore et de gaz d'hélium.

6. Bibliographie

Assié S., «Durabilité des bétons autoplaçants», Thèse de doctorat, INSA Toulouse, 2004.

AFGC, «Interim recommendations for use of Self-Compacting Concrete», Association Française de Génie Civil, 2002.

Tang L. «Chloride transport in concrete – measurement and prediction», PhD thesis, Publication P-96:6, Dept. of Building Materials, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Suède, cite dans (Amiri et Aït-Mokhtar, 2007), 1996.

Nordtest Method NT Build 492, «Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments», 1999.

RILEM TC 116-PCD., «Permeability of concrete as a criterion of its durability Final report: Concrete durability - An approach towards performance testing». *Materials and Structures*, 32 (217), 163–173, 1999.

Audenaert, K. Boel, V. De Schutter, G., «Chloride penetration in self compacting concrete by non steady state migration test». *International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, pp. 818 – 825, 2003.

Heirman G., Vandewalle L., Boel V., Audenaert K., De Schutter G., D'Hemricourt J., Desmet B., Vantomme J., « Chloride penetration and carbonation in self-compacting concrete». *ConcreteLife'06 - International RILEM-JCI Seminar on Concrete Durability and Service Life Planning: Curing, Crack Control, Performance in Harsh Environments*, pp 13 – 23, 2006.

Nguyen T. S., « Influence de la nature du liant et de la température sur le transport des chlorures dans les matériaux cimentaires ». Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.

Coppola L., Cerulli T., Salvioni D., «Sustainable Development and Durability of Self-Compacting Concretes». *ACI special publications*, 221(2), pp 29-50, 2004.

Tang, L. et Nilsson, L.-O., «A study of the relationship between air permeability and chloride diffusivity in concrete», *Durability of building materials and components* 6, E&FN Spon, p. 249-258, 1993.

Sugiyama, T. Bremner, T.W. and Tsuji, Y., « Determination of chloride diffusion coefficient and gas permeability of concrete and their relationship», *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 5, pp. 781-790, 1996.