
Interaction Endommagement/ transfert dans les bétons saturés et partiellement saturés

Amor Ben Fraj^{1*}, Nouredine Houhou², Stéphanie Bonnet³,
Abdelhafid Khelidj³

¹ CETE IdF- Laboratoire Ecomatériaux, Rue de l'égalité prolongée, BP 134, 93352 Le Bourget Cedex, France

² IFSTTAR- Département matériaux, Groupe CPDM, 58 boulevard Lefebvre, 75732 Paris cedex, France

³ GeM, UMR CNRS 6183 - Institut de recherche en génie civil et mécanique, Université de Nantes - IUT Saint- Nazaire, 58 rue Michel Ange, BP 420, F-44606 Saint- Nazaire cedex, France

*amor.ben-fraj@developpement-durable.gouv.fr

RESUME. Dans ce travail nous nous intéressons à l'influence des sollicitations mécaniques sur les paramètres de transfert des bétons saturés et non saturés, notamment la perméabilité au gaz et la diffusion des ions chlore. Pour ce fait, un nouveau dispositif expérimental a été développé afin de soumettre des échantillons en béton à des cycles d'humidification/ séchage dans des conditions environnementales contrôlées. Nous avons observé que les paramètres de transfert ont tendance à augmenter avec l'augmentation des sollicitations mécaniques. Un seuil a été identifié pour l'accroissement rapide de la perméabilité. En conditions non saturés, et suite à l'application d'une charge de 55% de la charge limite, un effet compactage a été observé, se traduisant par une diminution de 30 et 10%, des coefficients de diffusion apparents des bétons B45 et B45L, respectivement.

ABSTRACT. In this research work, we focus on coupling transfer parameters in saturated and unsaturated conditions, to mechanical solicitations. A new experimental set up has developed to apply drying/ wetting cycles in regulated environmental conditions. Results show that transfer parameters increase when solicitation increases. A critical deformation was noted, for rapid increasing of gas permeability. In unsaturated conditions, apparent diffusion coefficients of B45 and B45L, decreases by 30 and 10%, respectively, for applied loading of 55%.

MOTS CLES: Chlorures, diffusion, perméabilité, endommagement, humidité, non saturé, laitier.

KEYWORDS: Chloride, diffusion, permeability, damage, humidity, unsaturated, slag.

1. Introduction

En zone littorale, le béton est particulièrement exposé aux actions de l'eau de mer, riche en agents agressifs. Ces agents, et notamment les chlorures, peuvent pénétrer dans le béton d'enrobage via la porosité du matériau et amorcer la corrosion des armatures d'acier. Ainsi la durabilité du béton est intimement liée à l'évolution de son réseau poreux. Cette évolution pourrait être affectée par les sollicitations mécaniques, qui peuvent endommager le béton et engendrer une modification de ses propriétés de transfert.

L'endommagement du béton et ses conséquences sur la durabilité du matériau constituent un enjeu scientifique et industriel majeur dans le domaine du génie civil. Aux plans national et international, de nombreux chercheurs se sont intéressés à cette problématique en étudiant la perméabilité au gaz et le phénomène de diffusion des ions chlore dans le béton. Pour les chlorures, ces travaux se sont généralement focalisés sur la partie immergée de l'ouvrage, considérée comme saturée en eau de mer. Parmi ces études, nous évoquons celle de Tognazzi (Tognazzi *et al.*, 1996), qui avait montré une multiplication par 4 la perméabilité au gaz du béton, à partir d'une contrainte de compression de 90 à 95% de celle au pic. D'autres auteurs ont confirmé cette tendance pour des sollicitations en compression uniaxiale, avec des seuils différents et dépendants, des fois, du rapport E/C. L'influence de la fissuration par compression uniaxiale (en phase pré-pic) sur la diffusion des ions chlore en milieu saturé, a fait aussi l'objet de plusieurs recherches, notamment celles de Samaha *et al.* (Samaha *et al.*, 1992) et Saito *et al.* (Saito *et al.*, 1995). Leurs résultats ont montré une augmentation rapide de la charge en chlorures passant à travers le béton, à partir d'un seuil de contrainte, autour de 20% pour les premiers et 60% pour les seconds. Plus récemment, Djerbi (Djerbi, 2007) avait montré une diminution remarquable du temps de retard (de pénétration des chlorures) du béton, après un chargement à 90% de la contrainte au pic.

Aucune étude expérimentale n'a été faite sur le transfert des chlorures dans des bétons non saturés, endommagés. Dans cette étude, nous nous proposons de tracer les profils en chlorures des bétons endommagés par compression uniaxiale et soumis à des cycles d'humidification/ séchage. Un nouveau dispositif expérimental automatisé a été développé pour cette fin. Il permet de simuler la marée dans des conditions environnementales contrôlées.

2. Matériaux

Trois bétons ont fait l'objet de cette étude: un béton ordinaire de rapport Eau/Liant de 0,7 et deux autres bétons similaires, dont un contient du laitier avec un rapport Eau/Liant de 0,48. Les détails des formulations et leurs propriétés sont résumés dans le tableau 1.

Constituants (kg/m ³)	B30	B45	B45L
Graviers Boulonnais, 12-20 mm	563,4	561,2	561,2
Graviers Boulonnais, 4-12 mm	433,7	432	432
Sable Boulonnais, 0-4 mm	903,5	867,8	867,8
Ciment CEM I 52.5 N PM ES	260	350	242,9
Laitier	-	-	104,1
Superplastifiant	-	3	3
Eau	182	168	166,6
Eau-sur-Liant (E/L)	0,7	0,48	0,48
Porosité à l'eau (%)	13,24	10,21	9,73
Résistance à la compression (MPa), à 28j	38,2	66,7	60,2
Résistance à la compression (MPa), à 90j	48,6	74,7	81,6
Déformation au pic, ϵ_c ($\mu\text{m/m}$), à 90 j	2500	2800	3000
Module élastique dynamique (GPa), à 90 j	41,9	47,4	48,97

Table 1. Détails des formulations et leurs propriétés

Les bétons sont préparés par gâchée d'environ 65 litres et sont coulés dans des moules cylindriques. Une trentaine d'éprouvettes 11 x 22 cm issues d'une même gâchée a été confectionnée pour chacune des séries. Pour déterminer les propriétés mécaniques, les éprouvettes ont été coulées dans des moules en carton. Nous avons utilisé des moules métalliques pour les éprouvettes destinées aux mesures de paramètres de transfert. Afin de contrôler l'humidité dans le béton au cours de l'essai d'humidification/ séchage, 3 éprouvettes témoins de chaque série ont été coulées dans des moules en carton à l'intérieur desquelles on a fixé solidement des tiges lisses (en acier stub) de 5 mm de diamètre, implantées radialement jusqu'à 5 cm de profondeur. Autour du moule en carton, on a placé un moule en PVC sur lequel on a collé des cales épaisses en PVC afin de maintenir les tiges au moment du coulage. Toutes les éprouvettes ont subi la même cure. Avant d'être démoulées, elles ont été entreposées 24 heures en chambre humide à 20°C et 95% ($\pm 5\%$) d'humidité relative. Elles ont ensuite été plongées trois mois dans l'eau à 20°C, avant d'être rectifiées.

3. Méthodes

3.1. Endommagement mécanique

Les sollicitations en compression uniaxiale ont été appliquées à l'aide d'une presse hydraulique programmable asservie en force de 2400 kN. Un programme de chargement a été créé afin de mieux contrôler les déplacements et les vitesses de chargement et de déchargement. Ces vitesses ont été gardées constantes : 4,3 kN/s. Le cycle de chargement commence par un palier de contrainte minimum (préchargement) de 10 Mpa suivi d'un palier de contrainte maximum, f_{max} , compris entre 55 % et 85 % de la résistance moyenne respective, f_c . Ce dernier est maintenu pendant 2 heures, de manière à permettre d'une part le fluage à court terme, se traduisant par la propagation de microfissures dans le matériau et d'autre part, la relaxation du matériau. Les déplacements axiaux sont mesurés au moyen d'une cellule extensométrique équipée de trois capteurs LVDT de 1 mm de course et de 1 μ m de précision chacun, disposés à 120° sur une longueur de base de 100 mm.

3.2. Perméabilité au gaz

La perméabilité au gaz a été mesurée à l'aide d'un perméamètre à charge constante de type Cembureau, sur des échantillons séchés à 60°C jusqu'à masse constante. Afin d'améliorer le système de mesure classique, nous avons placé des débitmètres massiques à l'entrée et à la sortie de la cellule de perméabilité. Ils convertissent un débit massique en débit volumique normalisé, notamment à la pression normalisée P_0 de 1013,25 mbars et à la température normalisée T_0 de 273,15 K. L'acquisition des mesures de débits est assurée automatiquement, en continu et en temps réel, grâce à une centrale d'acquisition. Ceci nous a permis de contrôler la stabilisation de l'écoulement et de minimiser les erreurs de mesure.

La perméabilité apparente k_A (m^2), se basant sur une mesure du débit volumique en aval Q_s (m^3/s) à pression de sortie (pression atmosphérique) P_{atm} (Pa) et à température ambiante T_a (K) est donnée par la relation suivante [1] :

$$k_A(T_a, P_{atm}) = \frac{2 \cdot \mu \cdot h}{S} \times \frac{Q_s(T_0, P_0) \cdot P_0}{(P_i^2 - P_{atm}^2)} \times \frac{T_a}{T_0} \quad [1]$$

Où S (m^2) ; μ (Pa.s) ; P_i (Pa) ; h (m), sont respectivement la surface de l'échantillon, la viscosité dynamique de l'azote, la pression d'injection et l'épaisseur de l'échantillon déterminés à la température ambiante de 293,15 K. La perméabilité intrinsèque est obtenue en appliquant la relation de Klinkenberg sur plusieurs mesures de perméabilité apparente à différentes pressions différentielles. Il s'agit d'une régression linéaire relative à l'écoulement visqueux.

3.3. Migration des chlorures

Avant de commencer l'essai de migration, les échantillons ont été complètement saturés d'une solution basique en utilisant la procédure AFPC-AFREM modifiée

(Ben Fraj, 2009). A l'issue de saturation, l'échantillon est placé entre les deux compartiments de la cellule de migration. Une tension électrique de 12 V est appliquée et des prélèvements réguliers sont effectués afin d'évaluer la concentration en chlorures cumulés, passant à travers l'échantillon, au cours du temps. Ceci nous permet, à l'atteinte du régime permanent, de calculer le coefficient de migration effectif en utilisant la relation de Nernst Planck simplifiée (Andrade, 1993) [2]:

$$D_e = \frac{RT}{zF} \cdot \frac{L \cdot Q}{\Delta E c_0 t} \quad [2]$$

Où c_0 (mol/m^3); Q (mol/m^2); z ; F (J/V); ΔE (V); R ($\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$); T (K), sont respectivement, la concentration amont en chlorures, le flux des chlorures arrivant dans le compartiment aval pendant le temps t (s), la valence de l'ion (= 1), la constante de Faraday (96480), le potentiel mesuré aux bornes de l'échantillon, la constante des gaz parfaits et la température absolue.

3.4. Transfert des chlorures dans les bétons non saturés

Les échantillons sont soumis à des cycles de 6 heures d'humidification, par une solution saline de 30 g/l de NaCl, et 6 heures de séchage. Les essais sont effectués à température constante (20 °C) et humidité contrôlée (Figure 1). Après une cure de trois mois, les échantillons sont endommagés (§ 3.1), puis préconditionnés : les échantillons en équilibre avec une atmosphère à 90 % d'humidité relative (HR) sont conservés dans la chambre humide. Ceux en équilibre avec des humidités inférieures sont séchés (Climent, 2003) dans une étuve ventilée, à 80 °C (à 60 °C pour les échantillons endommagés), jusqu'à l'atteinte de 75 % ou 50 % d'HR. L'humidité relative dans le béton est contrôlée à l'aide des sondes capacitatives, placées dans des réservations, réalisées au moment de la fabrication des éprouvettes cylindriques.

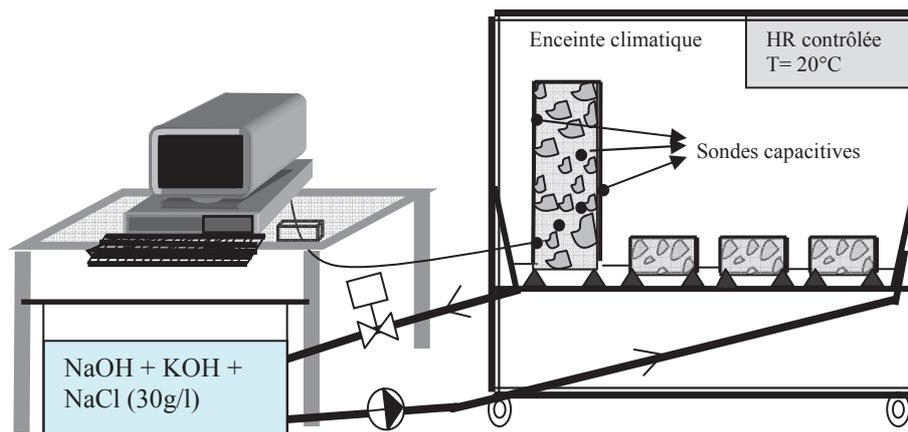


Figure 1. Nouveau dispositif expérimental pour application des cycles d'humidification/Séchage (Ben Fraj, 2009)

Quand l'équilibre est atteint, la teneur en eau est évaluée, puis extrapolée sur les disques de 5 cm d'épaisseur. Hormis la face de contact avec la solution saline, toutes les faces sont protégées de tout échange avec l'extérieur, afin d'assurer un écoulement unidirectionnel dans un milieu « semi infini ». Ensuite, les disques sont posés sur des plots en nylon, pointus, au fond d'un bac, qui lui est placé dans une enceinte climatique régulée en température et humidité. Le remplissage du bac par la solution saline est réalisé grâce à une pompe. Le niveau d'eau est contrôlé par un système de trop-plein, assurant le juste contact avec la surface inférieure des échantillons. Après 6 heures d'humidification, une électrovanne s'enclenche et vide le bac. Ce mouvement cyclique de la pompe et l'électrovanne est répété plusieurs fois. Il est assuré par une centrale d'acquisition et grâce à un programme que nous avons créé. Ce programme nous permet aussi l'acquisition en continu de l'humidité relative, mesurée par des sondes capacitives, au cœur de l'échantillon et sur toute la hauteur des éprouvettes 11 x 22 cm. A une échéance bien déterminée, des disques en béton sont sortis de l'enceinte, pesés et grignotés avec des pas de 2 à 3 mm. Chaque échantillon est filtré afin d'extraire les chlorures totaux. On pourrait ainsi tracer le profil de concentration en chlorures en fonction de la profondeur de pénétration. L'ajustement théorique du profil expérimental par la fonction erreur, solution de la deuxième loi de Fick [3], nous permet de déterminer un coefficient de diffusion apparent D_a (m^2/s) :

$$C(x,t) = C_s \times \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2 \times \sqrt{D_a t}} \right) \quad [3]$$

Où $C(x,t)$ (%); C_s (%), sont respectivement, la concentration en chlorures, mesurée à une profondeur x (m) après une durée d'exposition t (s) et la concentration en chlorures à la surface. Celle ci correspond à l'intersection de la tendance de la partie décroissante de la courbe chlorures = f (profondeur) et de l'axe des ordonnées.

4. Résultats et discussions

4.1. Endommagement

L'application des chargements à 55, 70 et 85% de la charge à la rupture a engendré une déformation maximale, ϵ_{\max} , de 617, 1095 et 1861 $\mu m/m$, respectivement, pour le B30. Ces déformations sont de 821, 1174 et 2029 $\mu m/m$ pour le B45 et de 900, 1543 et 2100 $\mu m/m$ pour le B45L. La comparaison des valeurs des déformations met en évidence la fragilité du B45 et B45L. Ceci pourrait être expliqué par le faible rapport E/L et la substitution partielle du ciment par du laitier.

4.2. Perméabilité au gaz

Sur la figure 2, représentant la variation de l'accroissement absolue de la perméabilité en fonction du rapport $\epsilon_{\max}/\epsilon_c$, nous distinguons bien deux parties de la courbe : Une première partie où la perméabilité croît légèrement, signe que les

microfissures sont encore négligeables et qu'elles ne sont pas encore connectées. La deuxième caractérise un accroissement accentué à partir d'un certain seuil de déformation. Ce seuil caractérise un réseau poreux connecté où les microfissures ne se referment plus même après déchargement de l'éprouvette.

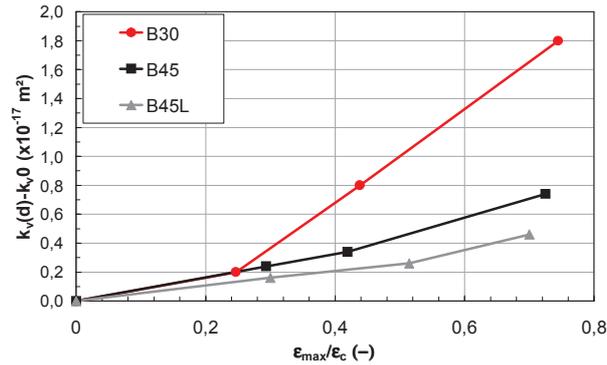


Figure 2. Accroissement de la perméabilité au gaz

Ce seuil a été également observé par Djerbi (Djerbi, 2007), qui l'avait situé à 0,4 quel que soit le béton testé. En accord avec ce qui a été obtenu par Sugiyama (Sugiyama *et al.*, 1996), nous pouvons affirmer qu'il existe plusieurs seuils, dépendamment du rapport E/L du béton. Il est inférieur ou égal à 0,25 pour le B30 et compris entre 0,25 et 0,52 pour le B45L.

3.3. Migration

La figure 3 illustre une augmentation régulière du coefficient de migration en fonction du taux de chargement.

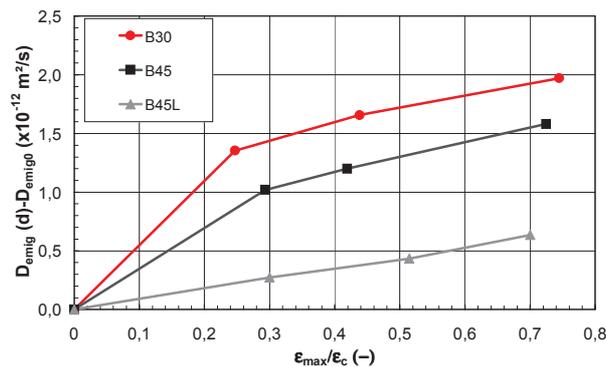


Figure 3. Accroissement de la migration des ions chlore

Contrairement à la perméabilité, aucun seuil n'a été identifié. En effet, la création des microfissures et leur connexion jouent un rôle de « court-circuit » vis à vis de la pénétration des ions chlore. Cette connexion du réseau poreux est plus importante pour le B30, qui présente une porosité plus forte. La création des microfissures réduit aussi la capacité du béton à fixer les chlorures et leurs ouvre des chemins préférentiels de diffusion.

3.4. Transfert en non saturé

La figure 4, présentée dans la page 9, montre les profils en chlorures totaux des trois bétons sollicités à des cycles d'humidification/ séchage (6h/ 6h), pendant un mois (60 cycles) et à une humidité relative de 75%. Il s'agit d'une comparaison des échantillons sains à d'autres sollicités à des paliers de chargement de 0 à 85% de la charge limite. On peut conclure qu'en phase pré-pic, les sollicitations mécaniques ne révèlent pas une grande influence sur la concentration et la profondeur de pénétration des ions chlore. Étant le processus moteur du transfert des chlorures dans le béton non saturé, l'absorption ne semble pas affectée par les microfissurations induites par le chargement des échantillons. L'ajustement théorique des profils expérimentaux, nous a permis de déterminer les coefficients de diffusion apparents, dont nous avons représenté l'accroissement en fonction de la déformation (figure 5).

Nous avons choisi de ne pas représenter les coefficients de diffusion du B30, qui sont très élevés et très indicatifs. En effet la concentration en chlorure à $x = 5$ cm est supérieure à zéro, ce qui met en question l'hypothèse d'un milieu semi- infini.

Pour les bétons B45 et B45L, on note une diminution du coefficient de diffusion à la suite d'un chargement à 55%, suivie d'une augmentation remarquable après l'application d'un chargement de 70 et 85%. On peut ainsi penser à un éventuel « effet compactage » pour les faibles taux de chargement, qui permet de fermer certains pores et diminuer l'interconnectivité du réseau poreux.

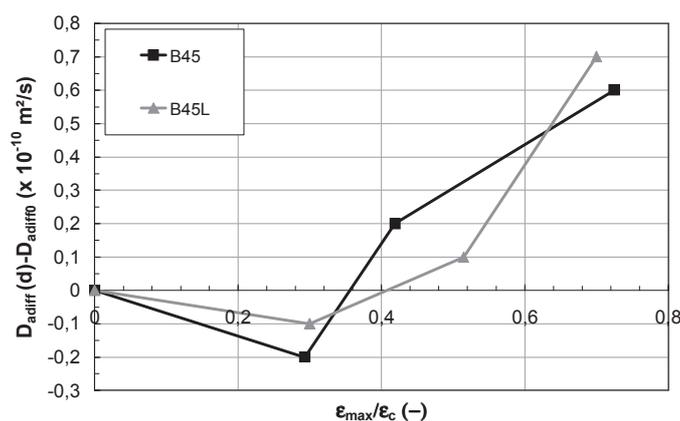


Figure 5. Accroissement de la diffusion en non saturé

Ce résultat reste à confirmer, surtout que cette tendance n'a pas été observée pendant les essais de perméabilité et de migration.

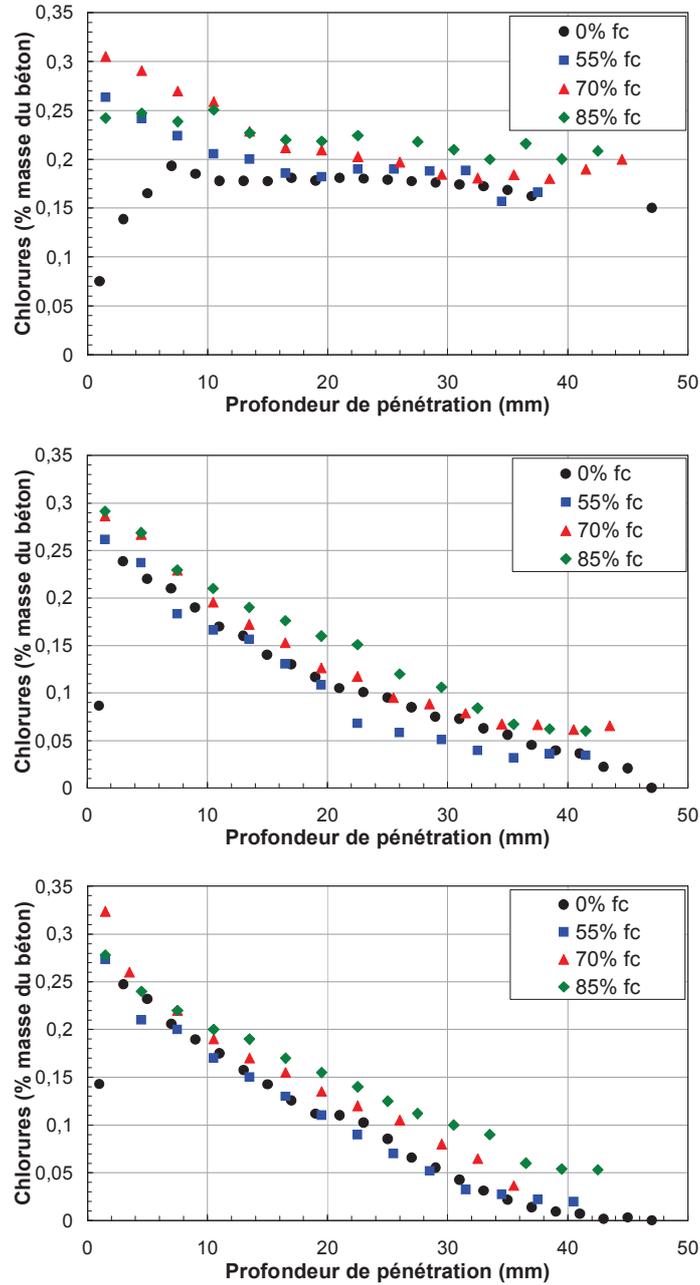


Figure 6. Profils en chlorures des bétons B30, B45 et B45L

4. Conclusion

En endommageant les échantillons, on crée des microfissures qui se propagent dans le matériau et s'interconnectent. Ces (micro)fissures représentent un chemin préférentiel pour les agents agressifs tels que les ions chlore. Ainsi, nous avons observé que les paramètres de transfert ont tendance à augmenter avec l'augmentation des sollicitations mécaniques. En accord avec la littérature, on a identifié un seuil d'accroissement de la perméabilité du B30, à 25% de la contrainte au pic. Les seuils d'accroissement pour les deux autres bétons n'étaient pas remarquables. Il nous semblait que l'endommagement n'était pas suffisamment important pour engendrer des grandes variations de perméabilité. Nous avons observé aussi, qu'en appliquant une charge à 55% de la charge limite, les coefficients de diffusion (en non saturé) du B45 et du B45L diminuaient. On pensait à un éventuel « effet compactage » que pourrait générer le chargement par compression, en diminuant les porosités globales des échantillons.

Remerciements

Ce travail a été soutenu financièrement par le projet national MAREO et le projet européen DURATINET.

5. Références

- Andrade C., "Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements", *Cement and Concrete Research*, vol. 23, n°3, 1993, p. 724-742.
- Ben Fraj A., Transfert dans les bétons non saturés: influence des laitiers et de l'endommagement mécanique, Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2009.
- Climent M.A., De Vera G., Lopez J.F., Viqueira, E. and Andrade C., "A test method for measuring chloride diffusion coefficients through nonsaturated concrete- Part I", *Cement and Concrete Research*, vol. 32, n°7, 2002, p. 1113-1123.
- Djerbi A., Influence de l'endommagement mécanique sur la perméabilité au gaz et sur la diffusion des ions chlore des bétons, Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2007.
- Saito M., "Chloride permeability of concrete under static and repeated loading", *Cement and Concrete Research*, vol. 25, 1995, p. 803-808.
- Samaha H. and Hover K., "Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete", *ACI Materials Journal*, vol 89, n°1, 1992, p. 416-424.
- Sugiyama T., Bremner T. and Holm T., "Effect of stress on gas permeability in concrete", *ACI Materials Journal*, vol 93, n°5, 1996, p. 443-450.
- Tognazzi C., Genin P. and Torrenti J., "Influence de la fissuration et de l'hygrométrie du béton sur sa perméabilité, Séminaire EDF Durabilité des Ouvrages, Moret, 1996.