

Effet de l'endommagement mécanique sur la diffusion des ions chlorure dans les bétons

Djerbi Assia

GeM (UMR CNRS 6183). – IUT de Saint Nazaire - 58 rue Michel Ange - BP 420, F-44606 Saint-Nazaire

RESUME. L'objectif de cet travail est d'étudier l'influence de la fissuration d'origine mécanique sur la diffusion des ions chlorure pour trois types de bétons, un béton ordinaire BO et deux bétons à hautes performances M75 et M75FS. La fissuration du béton peut être estimée selon deux types d'endommagements: un endommagement diffus généré par l'application de compression uniaxial pour des chargements variants entre 60% et 90% de la force ultime et un endommagement localisé obtenu par essai de traction par fendage. Les largeurs de fissures traversantes étudiées varient entre 16 et 240 μm . Le coefficient de diffusion est mesuré sur des échantillons sains et endommagés par essai de migration accéléré en régime permanent. Les résultats obtenus montrent qu'il existe une relation entre la variable d'endommagement d évaluée en endommagement diffus et le coefficient de diffusion des ions chlorure. Lorsque la fissuration est traversante le coefficient de diffusion dans la fissuration D_f augmente avec la largeur de cette fissuration et devient constant pour des largeurs supérieures à 80 μm , la valeur obtenue alors est celle de la diffusion libre dans l'eau.

MOTS-CLÉS : béton, diffusion aux ions chlorure, Endommagement.

ABSTRACT. The goal of this research is to study the effect of a mechanical damage on chloride diffusion into concrete. Three concretes are used, one ordinary concrete and two high performance concretes with two different mix designs. Two kind of damage are considered: the diffuse damage is obtained by uniaxial compression with loading varying from 60% to 90% of the ultimate strength, and a localised damage is obtained using a splitting tensile test, the crack width is ranging from 16 to 240 μm . The diffusion coefficient of cracked and uncracked concrete is evaluated using steady state migration test. The relationship between the damage coefficient, d and the diffusion coefficient was obtained in diffuse damage. If the crack is traversing the results showed that the migration coefficient through the crack D_{cr} increases with increasing crack width and is constant when the crack width is more than 80 μm , this value is the chloride diffusion in free water.

KEYWORDS: Damaged, chloride diffusion, concrete.

1. INTRODUCTION

La durabilité des ouvrages en béton armé en environnement marin est liée à la pénétration d'agents agressifs dans son réseau poreux. La diffusion aux ions chlorure est un paramètre de transport relatif à cette pénétration. Les ions chlorure pénètrent dans le béton non saturé selon des processus diffusif et convectif. Le coefficient de diffusion des ions chlorure quantifie leur aptitude à pénétrer au sein du matériau et donc à contribuer à la dégradation des structures en béton armé. De nombreux travaux ont été développés pour mesurer directement ce paramètre ou pour établir et appliquer des modèles au matériau considéré comme sain et homogène. Or, dans une structure en service le matériau est rarement "sain". Son taux d'endommagement est lié aux diverses agressions extérieures mécaniques et/ou chimiques. Les sollicitations mécaniques créées et développent une fissuration qui modifie la structure poreuse du matériau et par suite ses paramètres de transfert.

Plusieurs auteurs ont étudié l'influence de l'endommagement mécanique sur ces paramètres de transfert. Les résultats obtenus sur le couplage endommagement diffusion aux ions chlorures montrent que l'endommagement influe sur cette dernière. En endommagement diffus, la variation de la diffusivité est observée pour des niveaux de charge très élevés (Saito, 1995) et (Sugiyama, 1996). Lorsque la fissuration est traversante en régime permanent la diffusion aux ions chlorure peut être modélisée par un modèle de transfert en parallèle (Gerard, 1996) et (Tognazzi 1998), en supposant que le coefficient de diffusion dans la fissuration est celui de la diffusion libre dans l'eau. L'objectif de ce travail est d'étudier expérimentalement l'influence de la fissuration obtenue à partir des sollicitations mécaniques sur le coefficient de diffusion aussi bien en endommagement diffus que localisé. Les essais ont été réalisés sur trois types de béton, un béton ordinaire BO et deux bétons à haute performance M75 et M75FS. Le coefficient de diffusion est obtenu par essai de migration en régime permanent.

2. PROGRAMME EXPERIMENTAL

2.1. CARACTERISTIQUES DES BETONS

Trois bétons ont été confectionnés: un béton ordinaire BO de rapport E/C = 0,49 et deux bétons à hautes performances M75 et M75FS de rapport E/C 0,32 et 0,38 respectivement, ce dernier contient des fumées de silice. Les bétons sont préparés par gâchée d'environ 75 litres et sont coulés dans des moules cylindriques 11 x 22 cm. Le détail de chacune des compositions est présenté dans le tableau 1. Tous les bétons ont subi la même cure. Avant d'être démoulées, les éprouvettes ont été entreposées 24 heures en chambre humide à 20°C et 95% d'humidité relative (HR). Elles ont ensuite été plongées trois mois dans l'eau à 20°C. Les caractéristiques mécaniques et physiques obtenues à l'issue de la cure humide sont présentées dans le tableau 2.

Constituants (kg/m ³)	BO	M75	M75FS
Graviers calcaires, 12.5-20 mm	777	-	-
Gravillons calcaires, 4-12.5 mm	415	-	-
Graviers Boulonnais, 12.5-20 mm	-	550	579
Gravillons Boulonnais, 5-12.5 mm	-	475	465
Sable (Boulonnais), 0-5 mm	372	407	442
Sable de Seine, 0-4 mm	372	401	435
Ciment	353	461	360
Fumée de Silice	-	0	22
Superplastifiant	-	12,4	12
Retardateur	-	3,3	2,5
Eau d'ajout	172	146	136
Rapport E/C	0,49	0,32	0,38

Tableau 1 : Composition des bétons étudiés.

	BO	M75	M75FS
Résistance en compression à 28j (MPa)	44,5	75	83
Masse volumique sèche apparente (g/cm ³)	2,35	2,55	2,46
Porosité ouverte à l'eau à 90 j	10,9	7,4	7,2

Tableau 2 : Propriétés mécaniques et physiques des bétons.

2.2. ENDOMMAGEMENT MECANIQUE

2.2.1. Endommagement diffus obtenu par essai de compression

Les compressions uniaxiales ont été appliquées à l'aide d'une presse hydraulique programmable asservie en force de 2400 kN de capacité. Un seul cycle de charge comprenant un palier de contrainte maximum, $f_{\max}$, compris entre 60% et 90% de la résistance moyenne respective, f_c . Un temps de 2 heures est marqué sur chaque palier, de manière à permettre d'une part le fluage à court terme, se traduisant par la propagation de microfissures dans le matériau. Par ailleurs, le chargement est effectué manuellement. Trois éprouvettes ont été testées pour le palier de 90% de f_c pour un temps de chargement de 30 min, 1h et 2h. Les déformations sont mesurées à mi-hauteur de l'éprouvette au moyen d'une cellule extensométrique comprenant des pointeaux guidés par lame élastique, particulièrement adaptée au chargement cyclique. Cette cellule est équipée de trois capteurs LVDT, de 1 mm de course et de 1 μm de précision, disposés à 120° de manière à tenir compte de toutes déformations asymétriques (voir Figure 1).

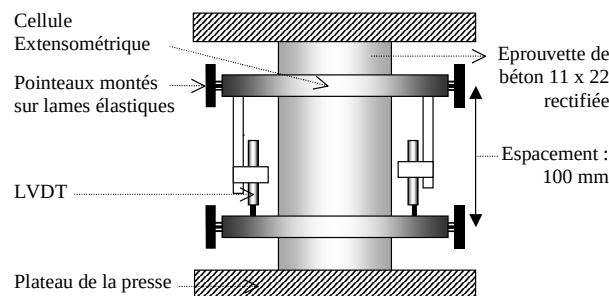


Figure 1 : Essai de compression uniaxiale.

L'endommagement du béton est caractérisé par la perte de raideur du matériau, la variable d'endommagement, d a été évaluée par la méthode dynamique [Eq. 1]. Le module dynamique de chaque éprouvette est mesuré juste avant et juste après chaque sollicitation. La détermination du module dynamique est effectuée en utilisant une technique d'excitation par impulsion. L'appareil utilisé est un "Grindosonic". Il mesure selon deux modes propres de résonance (flexion et torsion) les fréquences des vibrations dans l'éprouvette.

$$d = \frac{E_0 - E(d)}{E_0} \quad [\text{Eq. 1}]$$

E_0 : le module de Young d'un béton sain (MPa), $E(d)$: le module de Young d'un béton après sollicitations mécanique et déchargement (MPa).

Après déchargement complet des éprouvettes, des disques de 50 mm d'épaisseur sont extraits de la partie médiane des éprouvettes à l'aide d'une lame circulaire diamantée. Le disque extrait constitue donc l'échantillon le plus représentatif de l'endommagement diffus encouru par l'éprouvette sollicitée. Ces disques sont ensuite rectifiés, et leur épaisseur est mesurée avec une précision de 0,1 mm. La surface latérale a précédemment été enduite de deux couches de résine époxy imperméable afin d'assurer un flux monodirectionnel des ions chlorure traversant les disques lors des mesures de diffusion.

2.2.2. Endommagement localisé obtenu par essai de traction par fendage

Cet endommagement est obtenu par essai de traction par fendage (essai brésilien) (Wang *et al.*, 1997). Trois disques sont extraits des éprouvettes saines par sciage. Ces disques ont été enduits de deux couches de résine puis rectifiés, leur épaisseur est comprise entre 47 mm et 50 mm. Une presse hydraulique asservie en force, de 300 kN de capacité, a été utilisée pour solliciter les disques de béton. En appliquant un effort de compression sur le plan médian du disque, la traction est générée perpendiculairement. Cette traction va engendrer des déformations localisées principalement dans le plan diamétral situé entre deux génératrices sur lesquelles s'applique l'effort. Deux capteurs LVDT de ± 5 mm de course avec une précision de 1 μm sont utilisés pour mesurer les déplacements transversaux sur chaque face du disque (figure 2). Sept disques ont été étudiés pour chaque type de béton, les déplacements latéraux maximums δ_{max} sont 100, 200, 300, 400, 500, 600 et 700 μm , les largeurs moyennes de fissuration obtenues varient entre 16 et 240 μm .

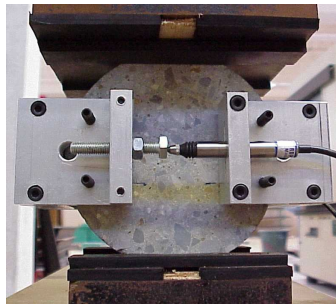


Figure 2 : Essai brésilien.

Après endommagement des disques une cartographie de fissuration a été effectuée sur chaque face du disque à l'aide d'un vidéo microscope. La fissuration traversante obtenue est située au centre du disque. Un zoom est effectué sur la fissure, au plus fort grossissement compris entre 100 x et 500 x, de manière à évaluer la largeur moyenne de la fissuration principale avec le maximum de précision.

2.3. ESSAI DE MIGRATION EN REGIME STATIONNAIRE

Cet essai de migration permet d'accélérer la pénétration des ions chlorure dans le béton par application d'un champ électrique (Andrade, 1993). Le coefficient de diffusion effectif D_e est déterminé en régime stationnaire. Après avoir saturé l'échantillon sous celui ci est placé entre deux compartiments remplis de solution basique à 1 g/l de NaOH et 4,65g/l de KOH. Le compartiment amont contient une solution chargée de 30 g/l en NaCl. Les compartiments amont et aval sont régulièrement renouvelés afin de respecter les conditions aux limites. L'application du champ électrique est effectuée par l'intermédiaire de deux électrodes, l'une en acier inoxydable (cathode), placée dans le compartiment amont, l'autre en cuivre-niobium platiné (anode), placée dans le compartiment aval (figure 3). La tension obtenue sur les faces du disque en contact avec les solutions est contrôlée à l'aide de deux électrodes de référence. Les ions chlorure vont se déplacer au sein du béton saturé à la fois par diffusion sous l'effet d'un gradient de concentration et par migration sous l'effet d'un champ électrique. La relation de Nernst-Planck [Eq. 2] permet d'obtenir le flux d'ions chlorure J créé par ces deux phénomènes dans le cas d'un béton saturé.

$$J(x,t) = -D_e \frac{\partial C}{\partial x} + D_e \frac{zF}{RT} \frac{\partial E}{\partial x} C(x,t) \quad [\text{Eq. 2}]$$

$C(x,t)$: la concentration dans le béton (mol/m^3), D_e : le coefficient de diffusion effectif du béton (m^2/s), F : la constante de faraday = $9,648.10^4 \text{ J.V}^{-1}.\text{mol}^{-1}$, R : la constante des gaz parfait = $8,3144 \text{ J.mol.K}^{-1}$, T : la température (K), z : la valence du chlore, E : potentiel électrique (V), x : la distance parcourue (m), t : temps (s).

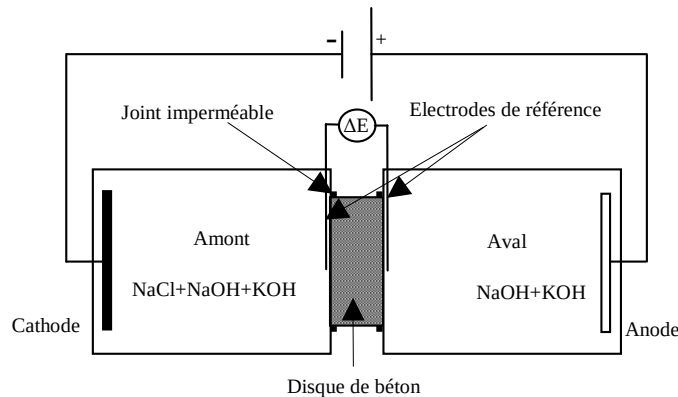


Figure 3 : Cellule de migration.

L'application d'un champ électrique E suffisamment important supérieur à 10V permet de négliger le premier terme de l'équation [Eq. 2] relatif au flux diffusif par rapport au second relatif au flux causé par le gradient électrique (Andrade, 1993). De ce fait le coefficient de diffusion D_e est déterminé par l'équation [Eq. 3] avec $\partial E / \partial x = \Delta E / L$, L est l'épaisseur du disque du béton. La tension appliquée est de 13,6 V, et celle mesurée aux bornes de l'échantillon varie autour d'une valeur moyenne de 12 V.

$$D_e = \frac{JRTL}{zFCAE} \quad [\text{Eq. 3}]$$

La diffusion des chlorures dans le béton sous régime stationnaire correspond à une vitesse de déplacement des ions constante. Le coefficient de diffusion effectif est déterminé à partir de la mesure de la concentration en chlorures dans le compartiment aval, par dosage de solutions prélevées à intervalle de temps régulier (au moins tous les jours). Ce dosage se fait par titration potentiométrique au nitrate d'argent AgNO_3 de 0.05M.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. INFLUENCE DE L'ENDOMMAGEMENT DIFFUS SUR LA DIFFUSION DES IONS CHLORURE

3.1.1. Effet des sollicitations mécaniques sur le flux des ions chlorure

La variation de la concentration dans le compartiment aval en fonction du temps pour les deux types de béton BO et M75 pour différents niveaux de chargement appliqué est présentée sur la figure 4. L'application des sollicitations mécaniques affecte de façon très sensible la cinétique de diffusion des ions chlore. Il apparaît en effet, une augmentation régulière du coefficient de diffusion effectif avec l'augmentation de la charge appliquée et le temps de maintien de la charge. Cette variation a été également observée par (Sugiyama, 1996) lors d'essais sous contrainte. La moyenne réalisée sur les coefficients de diffusion des deux échantillons sains, nous donne $1,88 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ pour le BO et $6,77 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ pour le M75 alors que l'application de la charge à 90% pour un temps de maintien de la charge de 2 heures présente un coefficient de diffusion de $5,74 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ pour le BO et $12,88 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ pour

le M75. On observe aussi une diminution du temps de retard en fonction de la charge appliquée. En effet le temps de retard, mesurant la durée de la phase transitoire est d'environ 58h pour le BO et 85h pour le M75 pour un béton sain alors qu'ils varient de 6h à 20h pour les disques endommagés.

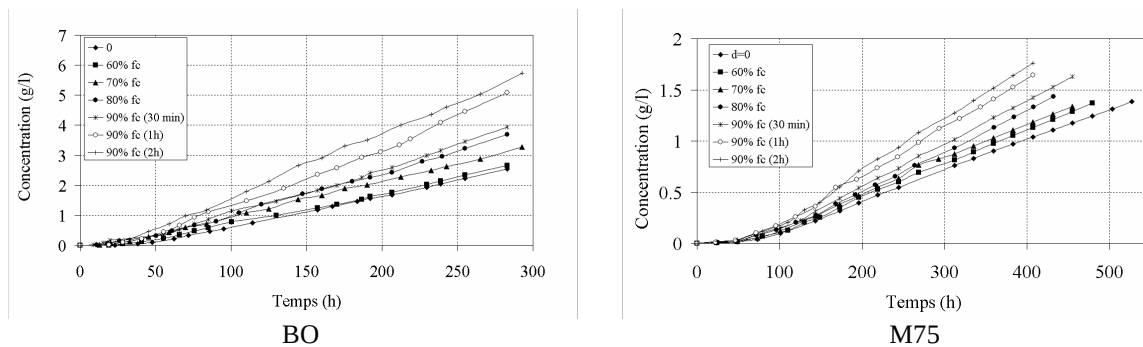


Figure 4 : Evolution de la concentration des ions chlorure dans le compartiment aval des bétons BO et M75.

3.1.2. Relation endommagement-coefficient de diffusion aux ions chlorure

La diffusivité relative d'un béton microfissuré peut être définie comme le rapport entre la diffusivité du matériau endommagé et celle du matériau sain $D_e(d)/D_0$. Les résultats expérimentaux montrent que la diffusivité relative apparaît comme une fonction du volume relatif des fissures. Cette dernière peut être reliée à la variable d'endommagement d , par une relation exponentielle [Eq. 4] (figure 5). Cet accroissement est d'autant plus marqué pour le BO qui présente un coefficient de diffusion du béton sain plus grand que le M75. Pour un chargement de $0,9 f_c$ le facteur d'accroissement est plus important pour le BO qui est de l'ordre de 2,5 par rapport au M75 de l'ordre de 1,9.

$$\frac{D_e(d)}{D_0} = \exp\left[(5,54 d)^{0,85}\right] \quad \text{Avec } R^2=0,95 \quad [\text{Eq. 4}]$$

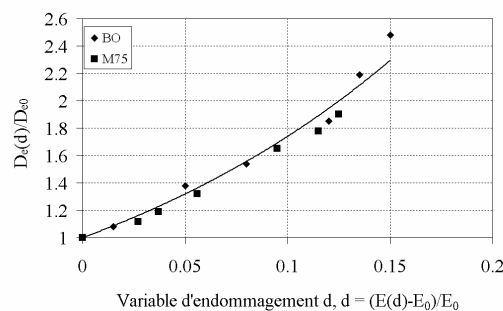


Figure 5 : Relation entre le rapport d'accroissement du coefficient de diffusion et la variable d'endommagement.

3.2. INFLUENCE DE L'ENDOMMAGEMENT LOCALISE SUR LA DIFFUSION DES IONS CHLORURE

3.2.1. Influence de la fissuration sur la diffusion aux ions chlorures

Les coefficients de migration évalués en régime stationnaire sont reportés dans la figure 6.a. La fissuration du béton affecte le coefficient de diffusion des ions chlorure ce dernier augmente avec l'accroissement de la largeur moyenne de fissuration et présente la même tendance pour les trois types de bétons BO, M75 et M75FS. Pour des largeurs inférieures à $48 \mu\text{m}$ le coefficient de diffusion obtenu est similaire à celui évalué pour un béton sain, la variation devient importante au delà de cette largeur

critique ceci est observé pour les trois types de béton. Soit D_{e0} , le coefficient de diffusion effectif mesurer sur les disques de béton sain et D_e le coefficient de diffusion des disques de béton fissurés. Le rapport D_e/D_{e0} croît en fonction de la largeur moyenne de fissuration (figure 6.b), l'augmentation devient importante pour des largeurs de fissures supérieures à 80 μm . Le rapport D_e/D_{e0} du M75FS augmente d'une manière significative par rapport au M75 et au BO. Ceci peut être expliqué par l'existence d'un transfert perpendiculaire à la fissuration qui est très important pour le BO par rapport au M75 et M75FS, car ce transfert croît avec l'augmentation de la porosité du béton.

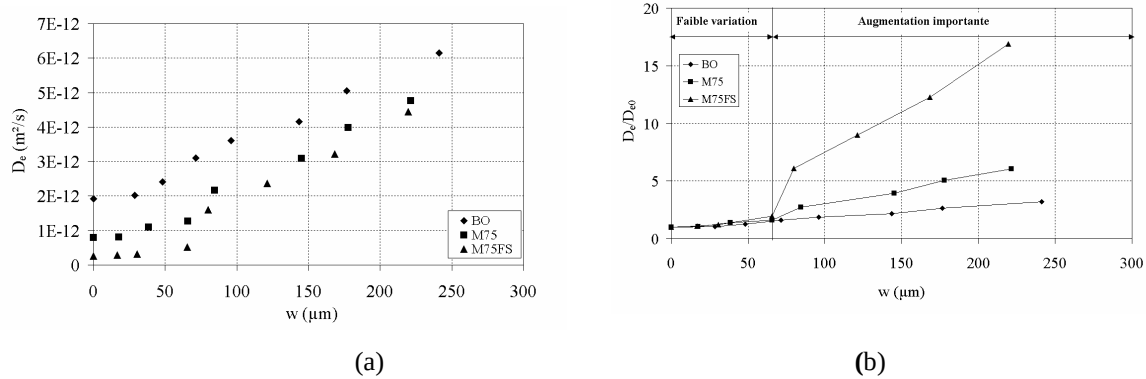


Figure 6 : Influence de la largeur de fissuration sur le coefficient de diffusion des ions chlorures.

3.2.2. Détermination du coefficient de diffusion dans la fissuration

La diffusion des ions chlorure à travers un échantillon fissuré peut être schématisée par la figure 7 (Tognazzi 1998). Cette schématisation nous permet d'écrire que le flux total J_t traversant le matériau (échelle globale) est égal à la somme du flux traversant la matrice poreuse J_0 et du flux traversant la fissure principale J_f [Eq. 5]. On suppose alors que la fissure est perpendiculaire aux faces planes du disque fissuré :

$$(A + S_f) J_t = A J_0 + S_f J_f \quad [\text{Eq. 5}]$$

Avec A et S_f les sections du matériau et de la fissure.

En supposant que la hauteur L_f de la fissure traversante est égale à l'épaisseur du disque L . Le coefficient de diffusion à travers la fissuration D_f exprimé par [Eq. 6] est obtenu à partir des [Eq. 3] et [Eq. 5].

$$D_f = \frac{A(D - D_0) + S_f D}{S_f} \quad [\text{Eq. 6}]$$

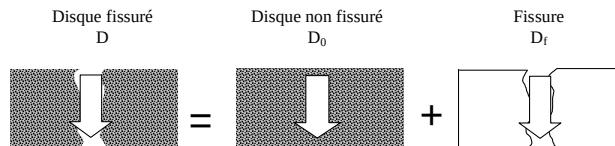


Figure 7 : Hypothèse de partition du flux des ions chlorure à travers un échantillon fissuré.

Le coefficient de diffusion des ions chlorure à travers la fissure D_f augmente linéairement avec l'augmentation de la largeur de fissuration pour des largeurs comprises entre 30 et 80 μm , et devient constant pour des largeurs de fissuration supérieures à 80 μm [Eq. 7] (Figure 8). La valeur moyenne de D_f obtenue est proche de la diffusion libre dans l'eau qui est de l'ordre de $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Cette tendance est indépendante de la composition du béton en ce qui concerne notre étude (figure 6.a).

$$\left\{ \begin{array}{ll} D_f (m^2/s) = 2 \times 10^{-11} w - 4 \times 10^{-10} & 30 \mu m \leq w \leq 80 \mu m \\ D_f (m^2/s) \approx 1.3 \times 10^{-9} & w \geq 80 \mu m \end{array} \right. \quad [\text{Eq. 7}]$$

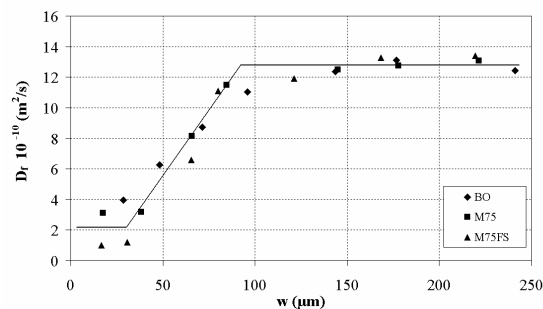


Figure 8 : Variation du coefficient de diffusion à travers la fissure en fonction de la largeur de fissure et du temps de retard.

4. CONCLUSION

L'endommagement diffus contribue à l'accroissement du coefficient de diffusion des ions chlorure, cet accroissement est plus prononcé pour le BO que pour le M75. Ceci peut être expliqué par la formation de microfissures connectées réparties dans l'échantillon. Cette formation est plus accentuée pour le BO que pour le M75. Il existe une relation unique entre le rapport $D_e(d)/D_{e0}$ et la variable d'endommagement « d » pour les deux bétons BO et le M75. La fissuration traversante peut être obtenue par l'essai de traction par fendage. Le rapport D_e/D_{e0} pour le M75FS est supérieur à celui obtenu pour le M75 et le BO. Cette variation peut être expliquée par l'existence d'un transfert perpendiculaire à la fissuration qui est plus important pour le BO que pour le M75 et le M75FS. Ceci est du probablement à la forte porosité du BO par rapport aux BHP. Le coefficient de diffusion à travers la fissuration D_f est indépendant de la composition du matériau. D_f croît avec l'augmentation de la largeur de la fissuration et devient constant pour des largeurs de fissuration supérieures à 80 μm.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Andrade C. (1993) « Calculation of chlorid diffusion coefficient in concrete from ionique diffusion measurements » *Cement and Concrete Research*, vol. 23, n° 3, p. 724-742.
- Gerard B. (1996) « Contribution des couplages mécanique-chimie-transfert dans la tenue à long terme des ouvrages de stockage de déchets radioactifs », Thèse de Doctorat, ENS Cachan.
- Saito M., (1995) « Chlorid permeability of concrete under static and repeated loding » *Cement and Concrete Research*, vol. 28, n° 12, p. 803-808.
- Sugiyama T., Bermner T.W., Holm T.A. (1996) « Determination of chloride diffusion coefficient and gas permeability of concrete and their relationship » *Cement and Concrete Research*, vol. 26, n° 5, p. 781-790.
- Tognazzi C. (1996) « Couplage fissuration dégradation chimique dans les matériaux cimentaires: caractérisation et modélisation », Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse.
- Wang K., Jansen C., Shah S.P, Karr A.F. (1997) « Permeability study of cracked concrete » *Cement and Concrete Research*, vol. 27, n° 3, p. 381-393.