

Quatorzième édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Sherbrooke, Québec, Canada
22-23 août 2013

INFLUENCE DU DOSAGE EN FIBRES ET DU POURCENTAGE D'ARMATURE SUR LA PERMÉABILITÉ À L'EAU DU BÉTON ARMÉ

M. Hubert, C. Desmettre, J.-P. Charron

Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), École Polytechnique de Montréal, Québec, Canada.

RÉSUMÉ : En condition de service, les ouvrages en béton armé subissent diverses sollicitations qui peuvent amener des fissures et compromettre leur intégrité et durabilité. Ces fissures offrent un chemin préférentiel pour la pénétration d'eau et d'agents agressifs dans la matrice cimentaire, accélérant ainsi la détérioration du béton et des armatures. Dans ce contexte, la perméabilité est devenue l'un des critères fondamentaux de durabilité. Ce projet de recherche étudie l'influence du dosage en fibres et du pourcentage d'armature sur la perméabilité à l'eau du béton armé via des essais de perméabilité à l'eau effectués sous chargement en traction uniaxiale sur des tirants en Béton à Haute Performance (BHP), en Béton Fibré à Haute Performance (BFHP) et en Béton Fibré à Ultra-haute Performance (BFUP). En condition de service, la perméabilité est réduite de 73 %, 94 % et 99.7 % par rapport au BHP conventionnel, respectivement pour des dosages volumiques en fibre de 0.75 % (BFHP), 1.5 % (BFHP) et 2 % (BFUP). L'augmentation du pourcentage d'armature de 1.23 % à 2.47 % réduit la perméabilité de 35 % en condition de service.

1. INTRODUCTION

La durabilité des ouvrages en béton armé est influencée par les propriétés de transport de l'eau telles que la perméabilité, l'absorption capillaire et la diffusion. En service, les structures résistent à diverses sollicitations d'origine interne (hydratation, retrait, fluage), mécanique (charge de service) et environnementale (variation de température et d'humidité) qui peuvent développer des fissures et compromettent leur intégrité et durabilité. La présence d'une fissuration accélère la pénétration d'eau et des ions chimiques agressifs (chlorures, sulfates, alcalis, etc.) et peut favoriser certains mécanismes de dégradation (corrosion des barres d'armature, dégradation par les sulfates, réaction alcalis-granulats, etc.). Ces détériorations réduisent la durée de vie des ouvrages par rapport à celle estimée lors de la conception, augmentent les coûts de réhabilitation et peuvent parfois porter atteinte à la sécurité structurale des ouvrages. Il s'ensuit une congestion du réseau routier qui nuit à la santé des gens, au développement socio-économique et à l'environnement. Dans ce contexte, la durabilité des ouvrages est devenue une priorité des instances gouvernementales et des chercheurs. L'étude de la perméabilité à l'eau du béton fissuré est l'un des indicateurs direct de durabilité à considérer pour maximiser la durée de vie des infrastructures du génie civil.

La perméabilité du béton peut être définie comme la capacité d'un matériau poreux à être traversé par un fluide sous un gradient de pression (Neville, 1996). Un béton à l'état non fissuré est peu, voir non perméable et le transport d'eau est contrôlé par la porosité de la matrice (Powers et al., 1954; Nokken et Hooton, 2008). Comme les ouvrages en service sont généralement fissurés, l'intérêt des chercheurs à examiner la perméabilité du béton sous chargement s'est manifesté logiquement au cours des dernières années. Pour cet état fissuré, le comportement est modifié et les ouvertures de fissure contrôlent la perméabilité du béton. Les récentes études portant sur la perméabilité du béton fissuré sont difficilement comparables puisqu'aucun test standard n'existe. Pour la majorité des études, les spécimens sont chargés afin d'obtenir un état fissuré, puis sont déchargés avant de réaliser l'essai de perméabilité (Ludirja et al., 1989; Wang et al., 1997; Kollek, 1999; Rapoport et al., 2002; Picandet et al., 2009; Yi et al., 2011; Akhavan et al., 2012). Dans certains cas, des ouvertures de fissures sont créées sous l'action d'un chargement indirect en traction (Wang et al., 1997; Rapoport et al., 2002; Picandet et al., 2009, Yi et al., 2011; Akhavan et al., 2012). Cette technique a l'inconvénient de former une seule fissure localisée et centrée sur le spécimen. D'autres essais favorisent la localisation de la fissure par le biais d'une entaille (Charron et al., 2007, 2008; Yi et al., 2011). Ces méthodes permettent d'approfondir l'état des connaissances sur les propriétés de transport du béton quant à la tortuosité, la connectivité et la rugosité des fissures, mais sont peu représentatives du comportement réel des ouvrages en service qui sont armés et multifissurés de manière aléatoire. Ceci a mené certains chercheurs à solliciter le béton sous l'action d'un chargement direct en traction uniaxiale afin d'obtenir une représentation adéquate du patron de fissuration en plus d'en mesurer la perméabilité simultanément (Lawler et al., 2005, Charron et al., 2007). Plus récemment, la présence d'armature a été incorporée dans des essais de perméabilité (Desmettre et Charron, 2011).

La présente étude s'oriente sur les bétons fibrés qui se démarquent par leur comportement plus ductile en traction et leur durabilité supérieure. Les fibres servent à coudre les fissures et à transférer l'effort de traction à travers celles-ci. Ainsi, lorsque la résistance en traction ultime des bétons fibrés est atteinte, une phase adoucissante survient, elle se définit par l'apparition d'une macrofissure localisée et d'une réduction progressive de la résistance (au lieu d'une rupture fragile pour le béton sans fibre). Les Bétons Fibrés à Ultra-haute Performance (BFUP) se différencient des bétons fibrés conventionnels par l'ajout d'une phase écrouissante intermédiaire entre les résistances élastique et ultime (Naaman, 2008). Ce comportement écrouissant se décrit par la formation d'une multitude de microfissures et fait grandement augmenter la ductilité du béton. Pour ces deux gammes de bétons fibrés, le meilleur contrôle de la fissuration apporté par les fibres conduit à la création d'un nombre plus élevé de fissures, mais d'ouvertures plus fines, limitant la pénétration d'eau (Lawler et al., 2002; Hoseini et al., 2009). La multifissuration provenant du comportement écrouissant des BFUP diminue encore plus significativement la perméabilité (Charron et al., 2008). Malgré les avantages concrets procurés par les fibres en termes de durabilité, aucune règle de conception en service particulière n'a été proposée pour ces matériaux.

Un dispositif de perméabilité reproduisant de manière réaliste la pénétration de l'eau à l'intérieur du béton armé en service a été développé à l'École Polytechnique de Montréal (Desmettre et Charron, 2011). L'objectif général de ce projet est de proposer des critères de conception en condition de service offrant une durabilité adéquate pour différentes gammes de bétons fibrés. Ainsi, une campagne d'essais portant sur des tirants en bétons à haute et ultra-haute performances contenant différents dosages en fibre et en armature a été complétée afin d'améliorer l'état des connaissances sur leur durabilité, via l'étude de la perméabilité à l'eau. Cet article présente le comportement mécanique et la perméabilité des tirants, l'identification des critères de conception étant en cours de développement.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. Procédure expérimentale

Dans le cadre de ce programme expérimental, la perméabilité à l'eau a été mesurée sur des tirants comprenant une armature enrobée de béton et sollicités en traction uniaxiale. Le but du montage est de bien reproduire le comportement structural en service de la zone tendue d'un élément en béton armé sollicité en flexion telle que retrouvée dans les dalles et les poutres. Les tirants ont une longueur de 610 mm et une

section transversale de $90 \times 90 \text{ mm}^2$. Les tirants ont un enrobage de 40 mm correspondant aux spécifications des codes de construction canadiens et américains pour des conditions d'expositions sévères (CSA 2009; ACI.Committee.318 2003). Ces dimensions ont été choisies dans des travaux antérieurs afin d'avoir une répartition réaliste du patron de fissuration dans le béton armé (Desmettre et Charron, 2011).

2.2. Dispositif de chargement et de perméabilité

Une nouvelle configuration de l'essai permet d'appliquer aux tirants un chargement en traction uniaxiale quasi-statique via une presse hydraulique de capacité de 2.5 MN, de mesurer la perméabilité à l'eau et de caractériser l'ouverture des fissures simultanément (**Figure 1**), ces deux dernières mesures étant effectuées sur deux essais différents dans la précédente configuration de l'essai. Ainsi, les résultats des essais actuels permettent d'établir directement les correspondances entre la force appliquée, la contrainte moyenne dans la barre d'armature, la perméabilité et les ouvertures des fissures. Le transfert mécanique des efforts de la presse vers le spécimen se fait à l'aide de mâchoires hydrauliques. Celles-ci appliquent l'effort de traction sur des tiges filetées de haute résistance qui sont connectées à la barre d'armature du tirant via un coupleur. Un chargement de 0.05 mm/min est maintenu jusqu'à l'atteinte de la plastification de la barre d'armature.

Le transport de l'eau sous gradient de pression s'effectue sur deux faces opposées des tirants (**Figure 2**). Les quatre autres faces sont scellées par l'application d'une membrane étanche. De par sa faible rigidité, la membrane ne participe pas à la reprise des efforts et a l'avantage de ne pas fissurer pour de grandes déformations. Ce scellement favorise ainsi un écoulement unidirectionnel, nécessaire au calcul du coefficient de perméabilité. Deux réservoirs en aluminium, saturés d'eau, sont installés sur les faces exposées du béton. Un système de serrage retient ces réservoirs et permet d'éviter les fuites d'eau. L'eau du cylindre d'entrée est mise en pression alors que le cylindre de sortie reste à la pression atmosphérique. La pression est ajustée de telle sorte que le tirant soit soumis à un gradient de pression de 50 kPa, correspondant à une hauteur d'eau de 5 mètres. Sous ce gradient de pression, l'eau chemine dans le circuit hydraulique du cylindre d'entrée vers celui de sortie (**Figure 1**). Des capteurs de pression sont installés aux bornes d'entrée et de sortie d'eau du spécimen afin de mesurer le gradient de pression. De plus, des capteurs de hauteur différentielle installés à la base des cylindres d'entrée et de sortie permettent la mesure du volume d'eau traversant le tirant, et donc le calcul des débits d'eau entrants et sortants du spécimen.

Les données disponibles permettent l'évaluation du coefficient de perméabilité, K_w , régi par la loi expérimentale de Darcy (1856) et présenté à l'**Équation 1**. L'application de cette équation requiert que l'écoulement d'un fluide incompressible, en occurrence l'eau, soit unidirectionnel, de régime laminaire et doit traverser un matériau poreux homogène. Malgré l'état hétérogène à la base du béton, il est acceptable de le considérer comme homogène à l'échelle macroscopique sous condition fissurée (Breyse & Gérard, 1997).

$$Q = K_w A \frac{\Delta H}{L} \quad (1)$$

où

Q	Débit d'eau (m^3/s)
K_w	Coefficient de perméabilité (m/s)
A	Aire de la section normale à la direction du flux (m^2)
$\frac{\Delta H}{L}$	Hauteur d'eau sur longueur d'écoulement (-)

Le coefficient de perméabilité du béton fissuré peut être estimé théoriquement avec la loi de Hagen–Poiseuille qui a été adaptée avec la loi de Darcy (**Équation 2**). Le débit d'eau dépend alors principalement de la caractéristique de la fissure en termes de longueur, d'ouverture et de rugosité de surface. Bien que les tirants présentent plusieurs fissures, il sera démontré que la considération de l'ouverture maximale des fissures mesurées permet d'obtenir une estimation raisonnable.

$$K_w = \frac{\xi \Delta p l_1 w_1^3}{12 A \eta \Delta H} \quad (2)$$

où

K_w	Coefficient de perméabilité (m/s)
ξ	Coefficient de rugosité de surface (-)
Δp	Différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la fissure (N/m ²)
w_1	Ouverture maximale de fissure (m)
l_1	Longueur de la fissure (m)
A	Aire de la section normale à la direction du flux (m ²)
η	Viscosité (Ns/m ²)
ΔH	Différence des hauteurs d'eau en amont et en aval du spécimen (m)

Ce dispositif mesure également la perméabilité du béton non fissuré, à la condition d'avoir initialement saturé d'eau la matrice du béton et d'effectuer la mesure sur une période prolongée. Ceci explique pourquoi les prismes subissent une cure humide continue. Le système de perméabilité offre une précision de 10^{-13} m/s sur la mesure du coefficient de perméabilité (Desmettre et Charron, 2011). Dans le cadre de ce projet, les mesures à l'état fissuré ont été privilégiées, la perméabilité a donc été mesurée avec une courte période de mesure.

2.3. Caractérisation de la fissuration

Les ouvertures de fissures sont mesurées simultanément à la perméabilité (Figure 2). Des capteurs de déplacement (Capteurs PI) sont collés en quinconce sur les faces perpendiculaires à celles exposées à la pénétration d'eau (**Figure 2**). Ceux-ci sont en contact direct avec le béton et sont installés de manière à ne pas mesurer la déformation élastique de la membrane. Au total, treize capteurs PI ayant une plage de lecture de 50 ou 100 mm mesurent l'évolution des fissures.

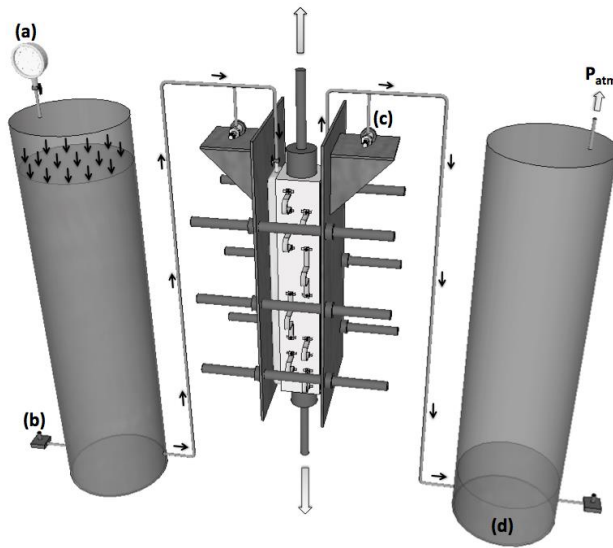


Figure 1 Dispositif de perméabilité

a) Manomètre et cylindre d'entrée, b) Capteur de hauteur différentielle, c) Capteur de pression, d) Cylindre de sortie.

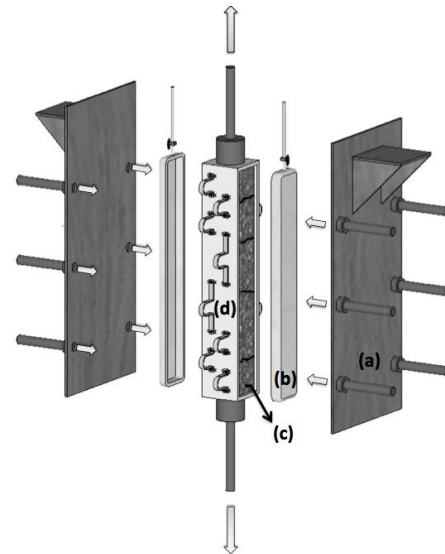


Figure 2 Cellule de perméabilité

a) Système de serrage, b) Réservoir d'eau en aluminium, c) Béton exposé, d) Membrane étanche et Capteurs PI.

2.4. Programme expérimental

Dans le cadre de ce programme expérimental, la perméabilité à l'eau a été étudiée sur trois types de béton : un Béton à Haute Performance (BHP), un Béton Fibré à Haute Performance (BFHP) et un Béton Fibré à Ultra-haute Performance (BFUP). Le BHP, d'une résistance en compression de 50 MPa, a été choisi pour son utilisation courante dans les infrastructures en béton armé et servira de référence. Le tirant en BHP était renforcé d'une barre d'armature 10M ($\Phi = 11.3$ mm) pour un taux de renforcement de 1.23 %. Pour les tirants en BFHP de 50 MPa, des dosages en macrofibres métalliques à crochet ($l_f = 35$ mm ; $\Phi_f = 0.55$ mm) de 0.75 % et 1.5 % ont été sélectionnés. De plus, pour le tirant en BFHP contenant un volume de fibres de 0.75 %, des taux d'armatures de 0 %, 1.23 % (10M) et 2.47 % (15M ($\Phi = 15.9$ mm)) ont été choisis. Le tirant en BFUP de 120 MPa comprenait un volume de microfibres métalliques ($l_f = 10$ mm ; $\Phi_f = 0.02$ mm) de 2 % et était renforcé d'une barre d'armature 10M. Au final, 24 prismes divisés en 6 conditions d'essais ont été testés, tel que résumé au **Tableau 1**.

Tableau 1 Programme expérimental

Identification	Béton	Volume de fibre (%)	Pourcentage d'armature ρ (%)
BHP - 0% - 10M *	BHP - 50MPa	0	1.23
BFHP - 0.75% - 10M	BFHP - 50MPa	0.75	1.23
BFHP - 0.75% - 15M	BFHP - 50MPa	0.75	2.47
BFHP - 0.75% - NA	BFHP - 50MPa	0.75	0
BFHP - 1.5% - 10M	BFHP - 50MPa	1.5	1.23
BFUP - 2.0% - 10M	BFUP - 120MPa	2.0	1.23

* La matrice cimentaire du BHP est presque identique à celle des BFHP (**Tableau 2**).

Comme pour la fabrication d'un ouvrage en béton fibré, une attention particulière a été apportée lors de la mise en place des bétons fibrés dans les tirants afin d'assurer une orientation favorable des fibres pour optimiser leur efficacité. Les prismes étaient décoffrés après 24 heures avant d'être submergés dans des bacs d'eau saturés en chaux pour une période de 45 jours.

La composition des bétons est présentée au **Tableau 2**. Le BHP et les BFHP ont été produits avec un ciment portland binaire de type Gub-SF. La composition de la pâte cimentaire est presque identique pour ces bétons et leur rapport eau/liant (E/L) est de 0.43. Pour les BFHP, une quantité de pierre équivalente au volume de fibres ajouté a été retranchée des formulations. Dans le cas du BFUP, un ciment portland de type HS a été utilisé avec un rapport E/L de 0.22.

Tableau 2 Composition des bétons

Matériau	BHP	BFHP-0.75%	BFHP-1.5%	BFUP-2%
Ciment (kg/m^3)	500	500	500	1012
Fumée de silice (kg/m^3)	50	50	50	253
Eau (kg/m^3)	237	237	237	253
Superplastifiant (l/m^3)	9.20	9.20	45.9	29.7
Viscosant (l/m^3)	0.70	0.70	3.55	-
Sable (kg/m^3)	814	814	823	660
Pierre (kg/m^3)	678	658	593	-
Dosage en fibre (kg/m^3)	-	58.5	117	156
Rapport Eau/Liant (-)	0.43	0.43	0.43	0.22

Les propriétés mécaniques des bétons sont résumées au **Tableau 3**. La résistance en compression et le module élastique ont été mesurés selon les normes ASTM C39 et ASTM C469. La résistance en traction a quant à elle été mesurée sur des os sollicités en traction uniaxiale conformément à la méthode développée par Beurivage (2009) et basée sur la norme RILEM 162-TDF. La résistance à la traction a été mesurée à l'échéance de l'essai de perméabilité seulement.

Les barres d'armature 10M et 15M étaient de nuance 400W. Les limites élastique et ultime étaient de 450 MPa et 570 MPa respectivement pour les barres 10M, et de 425 MPa et 605 MPa respectivement pour les barres 15M.

Tableau 3 Propriétés mécaniques des bétons

	Date (jour)	BHP-10M	BFHP-0.75%-10M	BFHP-0.75%-15M	BFHP-0.75%-NA	BFHP-1.5%-10M	BFUP-2%-10M
f_c (MPa)	28	56.2	52.8	56.1	60.9	49.4	120.7
	45	62.7	56.7	59.2	64.6	54.2	137.5
f_t (MPa)	28	-	-	-	-	-	-
	45	2.80	2.80	3.10	2.90	3.60	8.10
E_c (MPa)	28	32600	31200	32300	31600	28400	37700
	45	32900	30500	33800	33400	27900	39500

3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

3.1. Validation de la procédure

Des essais de traction uniaxiale ont été effectués sur des tirants afin de caractériser leur comportement en traction ainsi que la perméabilité associée aux différents états de chargement, jusqu'à atteindre la plastification de l'armature. Quatre essais ont été effectués pour chacune des conditions d'essais regroupées au **Tableau 1**. Les résultats obtenus pour le BFHP-0.75%-10M sont présentés à la **Figure 3**, afin de déterminer la variabilité des résultats au sein d'une même condition. Les courbes Force-Déplacement de ces tirants (**Figure 3a**) montrent une rigidité initiale similaire jusqu'à l'apparition de la première fissure, vers 25 kN. La formation d'une macrofissure est généralement associée à une chute de force soudaine. Pour ce béton, en moyenne six macrofissures sont créées avant d'atteindre la charge ultime à environ 60 kN. La ligne pointillée a été ajoutée graphiquement pour présenter la reprise d'effort de la barre d'armature 10M seule sans l'effet du retrait. Ceci permet d'illustrer le raidissement en traction du béton fibré (gain de résistance par rapport à la barre d'armature seule).

À mesure que les macrofissures apparaissent, leur ouverture est mesurée par les capteurs PI positionnés sur deux faces opposées du tirant (**Figure 2**). L'évolution de l'ouverture maximale des fissures captées, w_{max} , est illustrée à la **Figure 3b**, pour chacun des essais illustrés à la **Figure 3a**. Cette ouverture est nulle jusqu'à l'atteinte de la force d'apparition de la première fissure (≈ 25 kN), puis augmente ensuite graduellement jusqu'à l'arrêt du chargement, où elle atteint des valeurs comprises entre 0.190 et 0.245 mm, avec une moyenne de 0.214 mm pour l'ensemble des quatre spécimens testés.

L'évolution du coefficient de perméabilité à l'eau, K_w , est représentée en fonction de la force à la **Figure 4a** et en fonction de l'ouverture maximale à la **Figure 4b**. À l'état non fissuré, le coefficient de perméabilité est stable et inférieur à 1×10^{-10} m/s. Il augmente ensuite avec l'apparition graduelle des fissures pour atteindre une valeur comprise entre 7.6×10^{-8} m/s à 1.1×10^{-5} m/s en fin d'essai (**Figure 4a**). La perméabilité est également illustrée selon l'évolution de w_{max} (**Figure 4b**) avec l'estimation théorique de la loi de Hagen-Poiseuille décrivant l'écoulement d'eau à travers une seule fissure pour un coefficient de rugosité ξ de 0.6. Bien que cette loi ne s'applique pas à un tirant avec plusieurs fissures, son illustration démontre que la pénétration de l'eau à travers l'ensemble des fissures suit globalement une évolution cubique par rapport à l'ouverture maximale.

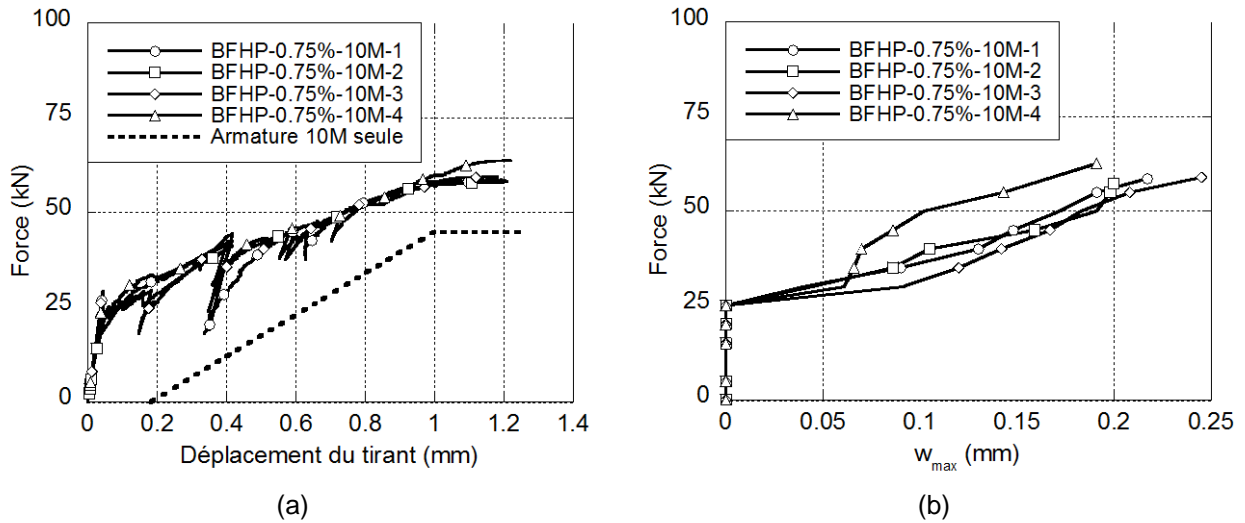


Figure 3 Comportement mécanique pour une condition d'essais (BFHP50-0.75%-10M)
 a) Force en fonction du déplacement, b) Force en fonction de l'ouverture maximale des fissures.

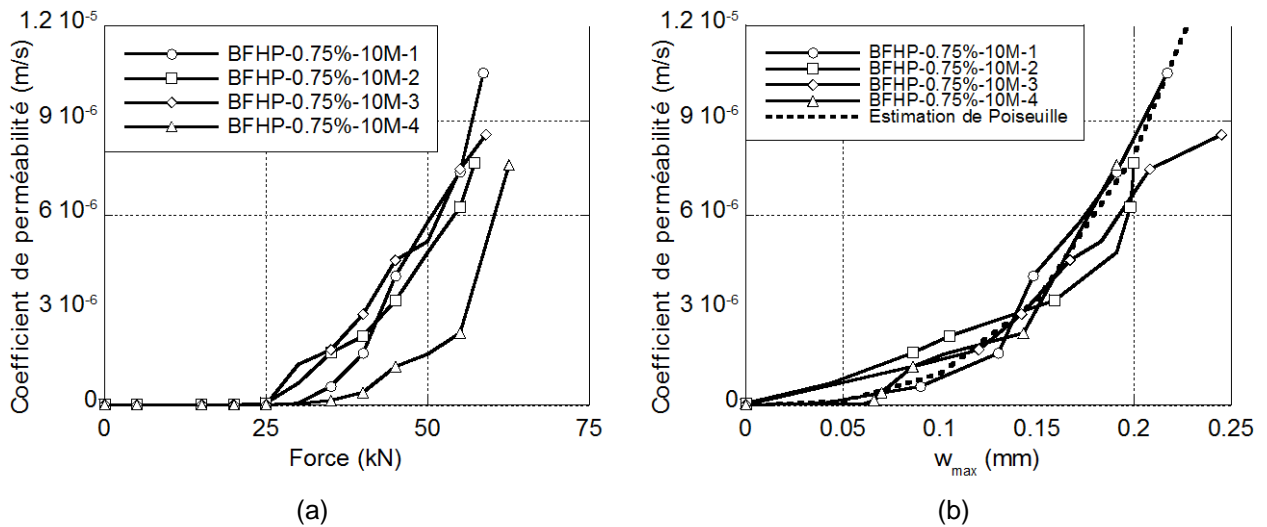


Figure 4 Perméabilité pour une condition d'essais (BFHP50-0.75%-10M)
 a) Perméabilité en fonction de la force, b) Perméabilité en fonction de l'ouverture maximale.

3.2. Influence du dosage en fibres

L'influence du dosage en fibres des bétons (0 %, 0.75 %, 1.5 % et 2 %) sur leur comportement mécanique ainsi que sur la perméabilité à l'eau des tirants comprenant une armature 10M est illustrée aux **Figure 5** et **Figure 6**, qui présentent les courbes moyennes obtenues des quatre essais effectués pour chaque condition. Tel que mentionné à la **section 2.4**, les matrices de bétons ainsi que le rapport E/L sont presque identiques pour l'ensemble des bétons comprenant 0 à 1.5 % de macrofibres. Le BFUP comprenant 2 % de fibres diffère par le type de fibres (microfibres) ainsi que par sa matrice et son rapport E/L plus faible.

Les courbes typiques de comportement mécanique des différents bétons étudiés (**Figure 5a**) montrent une rigidité similaire dans la phase élastique jusqu'à l'atteinte d'une force critique créant la première fissuration. Cette force est similaire (≈ 25 à 30 kN) pour les tirants BHP et BFHP puisqu'ils possèdent la même matrice cimentaire, elle est supérieure pour les tirants en BFUP. Il s'ensuit une phase de

raidissement en traction dont l'importance est accrue avec l'augmentation du dosage en fibres car celles-ci transfèrent des efforts à travers les fissures. Trois, quatre et onze macrofissures apparaissent dans les tirants, respectivement pour des dosages en fibres de 0, 0.75 et 1.5 %. Les tirants en BFUP contenant 2 % de microfibres multifissent énormément (ceci est relié à la capacité d'écroûssage du matériau) de telle sorte qu'il devient difficile d'identifier avec certitude le nombre de fissures à l'aide des capteurs PI. Néanmoins, une analyse visuelle des tirants en fin d'essai a permis d'identifier plus de cinquante fissures pour les quatre spécimens de cette condition. La **Figure 5b** présente la force en fonction de l'ouverture maximale des fissures et illustre le fait qu'à un même niveau de force, l'augmentation du dosage en fibres diminue significativement l'ouverture maximale des fissures.

L'effet du dosage en fibres sur la perméabilité des tirants sous chargement est illustré à la **Figure 6**. La **Figure 6a** regroupe, pour les différents bétons testés, les courbes moyennes d'évolution du coefficient de perméabilité en fonction de la charge appliquée ainsi que l'intervalle de confiance de 90 % déterminé avec la loi de Student (Alalouf et al., 1990) à partir des données des quatre essais effectués. Dans tous les cas, le coefficient de perméabilité est initialement stable et inférieur à 1×10^{-10} m/s jusqu'à l'atteinte de la résistance en traction des bétons. Il s'ensuit une augmentation graduelle du coefficient de perméabilité dans la phase de raidissement en traction. Pour un même niveau de chargement, la perméabilité du béton fissuré est réduite avec l'augmentation du volume de fibres. Ce résultat est statistiquement vérifié par la formation de quatre fuseaux bien distincts formés par les intervalles de confiance de 90 %. En moyenne, les coefficients de perméabilité en fin d'essai sont de 1.3×10^{-5} , 8.6×10^{-6} , 1.3×10^{-6} et 7.6×10^{-8} m/s, respectivement pour des dosages en fibres de 0, 0.75, 1.5 et 2 % (**Figure 6a**). La **Figure 6b** montre l'évolution du coefficient de perméabilité en fonction de w_{max} . L'arrêt des courbes est intimement lié au comportement mécanique caractérisé à la **Figure 5b**. À nouveau, la tendance générale des courbes de perméabilité suit une évolution cubique par rapport à l'ouverture maximale, tel qu'estimé théoriquement par la loi de Hagen-Poiseuille avec le même coefficient de rugosité de 0.6 utilisé précédemment. Visuellement et logiquement, le coefficient de rugosité ξ devrait être réduit pour mieux représenter les résultats des tirants avec un dosage supérieur en fibres (1.5 et 2 %).

Le nombre moyen de fissures identifiées, en condition de service et à l'ultime, est résumé par condition d'essai au **Tableau 4**. La force de service est définie comme la force médiane entre la force de première fissuration et celle correspondant à la plastification de l'armature. Ces résultats permettent d'apprécier le fait qu'une augmentation du dosage en fibres apporte un gain de capacité portante non négligeable (F_{serv} et F_{ult} plus élevées) tout en diminuant les ouvertures de fissures qui sont plus nombreuses. L'écroûssage du BFUP est aussi mis de l'avant avec le développement d'une multitude de microfissures d'ouverture très faible en service, malgré une force comparable ou supérieure à celle des tirants en BHP et BFHP à l'ultime.

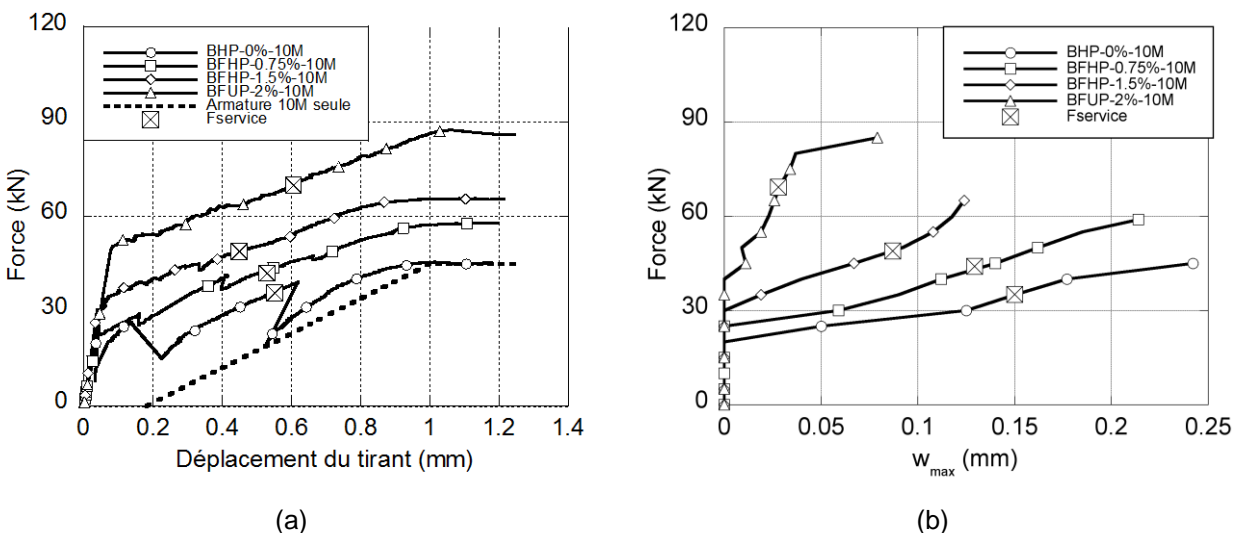


Figure 5 Comportement mécanique en fonction du dosage en fibres

a) Force en fonction du déplacement, b) Force en fonction de l'ouverture maximale des fissures.

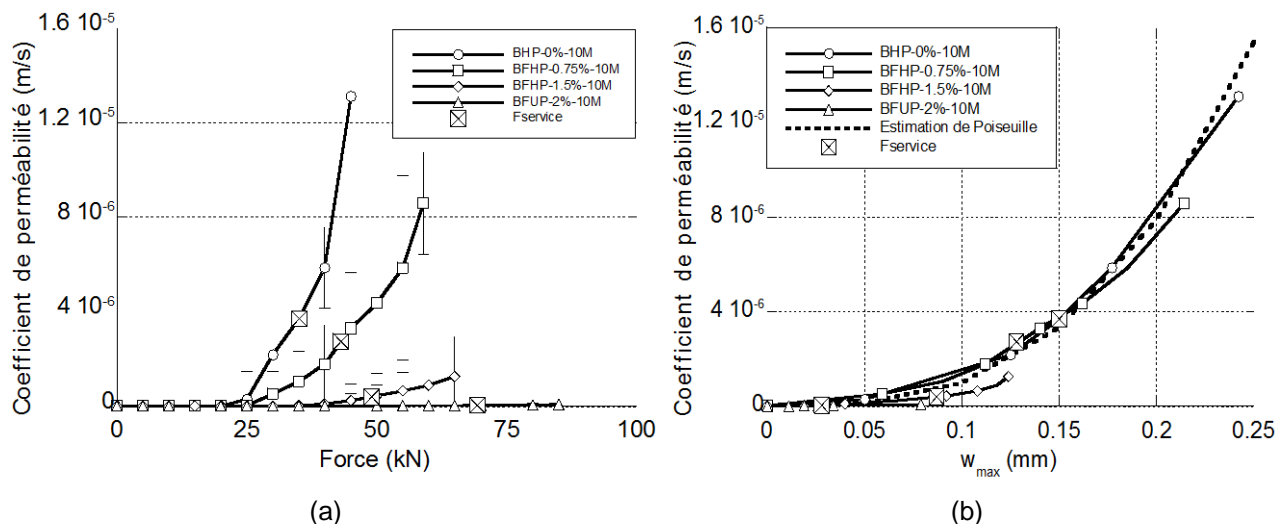


Figure 6 Perméabilité moyenne en fonction du dosage en fibres

a) Perméabilité en fonction de la force, b) Perméabilité en fonction de l'ouverture maximale des fissures.

Tableau 4 Résumé des résultats pour les conditions d'essais avec armatures

Type de tirants	Service				Ultime			
	F_{serv}^* (kN)	Nbr moyen de fissures	w_{max} (mm)	K_w (m/s)	F_{ult} (kN)	Nbr moyen de fissures	w_{max} (mm)	K_w (m/s)
BHP-0%-10M	35.1	2	0.157	5.5×10^{-6}	45.5	3	0.243	1.5×10^{-5}
BFHP-0.75%-10M	43.1	3	0.139	1.5×10^{-6}	58.7	6	0.211	8.6×10^{-6}
BFHP-1.5%-10M	49.0	7	0.083	3.3×10^{-7}	66.6	11	0.134	1.4×10^{-6}
BFUP-2%-10M	69.3	21	0.030	1.9×10^{-8}	87.6	> 50	< 0.087	9.2×10^{-8}
BFHP-0.75%-15M	67.0	9	0.122	9.8×10^{-7}	99.5	10	0.188	3.0×10^{-6}

* ($F_{service} = (F_{fissuration} + F_{ultime})/2$)

3.3. Influence du pourcentage d'armature

Cette section s'intéresse à l'effet du pourcentage d'armature sur la perméabilité à l'eau des tirants. Les résultats obtenus sur les tirants constitués de BFHP-0.75 %, avec des taux de renforcement de 0 %, 1.23 % (10M) et 2.47 % (15M), sont présentés. D'emblée, les comportements mécaniques des bétons armés et non armés diffèrent (**Figure 7**). Les bétons renforcés décrivent le comportement typique du béton armé décrit à la **section 3.2** où cinq et neuf fissures sont respectivement identifiées pour les tirants comprenant 1.23 et 2.47 % de renforcement. En ce qui concerne le béton non armé, aucune armature n'est disponible pour reprendre l'effort axial de traction et seules les fibres contribuent à une reprise partielle de cet effort. Trois fissures sont apparues dans les tirants non renforcés (**Figure 7a**). Les deux premières fissures sont apparues dans la zone d'ancrage non instrumentée pour la mesure de l'ouverture de fissure et de la perméabilité, la troisième fissure s'est développée dans la zone instrumentée tel que prévu. Cette situation n'a eu aucun impact sur la corrélation entre la force, l'ouverture de la troisième fissure et la perméabilité mesurées dans la zone instrumentée, elle est cependant à l'origine du changement de rigidité dans la courbe force-déplacement (**Figure 7a**, déplacement entre 0.1 et 0.3 mm). Ainsi, après la localisation de la troisième macrofissure dans la zone instrumentée ($F \approx 32$ kN), l'ouverture a progressé jusqu'à l'arrêt de l'essai. Ceci correspond à la phase adoucissante typique des bétons renforcés de fibres. Logiquement, à une ouverture de fissure équivalente de 0.2 mm, la résistance des tirants en BFHP renforcés d'une armature 10M et 15M représente respectivement le double et le quadruple de la résistance des tirants non renforcés (**Figure 7b**).

L'évolution du coefficient de perméabilité selon le type de renforcement est illustrée à la **Figure 8**. Dans tous les cas, les coefficients de perméabilité sont initialement inférieurs à 1×10^{-10} m/s jusqu'à l'atteinte de la première fissure pour ensuite augmenter en lien avec la formation de leur patron de fissuration respectif (**Figure 8a**). La pénétration d'eau est plus faible avec l'augmentation du diamètre barre, quel que soit le niveau de chargement considéré. Pour la condition non armée, le coefficient de perméabilité augmente drastiquement à mesure que la macrofissure s'ouvre. La **Figure 8b** montre l'évolution de la perméabilité en fonction de l'ouverture maximale. Il apparaît que pour une même ouverture maximale de fissure, le cas non armé est moins perméable. Bien que ce résultat puisse paraître surprenant à première vue, il est tout-à-fait logique puisque de nombreuses fissures sont apparues dans les tirants armés comparativement à une seule fissure dans la zone instrumentée des tirants non renforcés (**Tableau 4**).

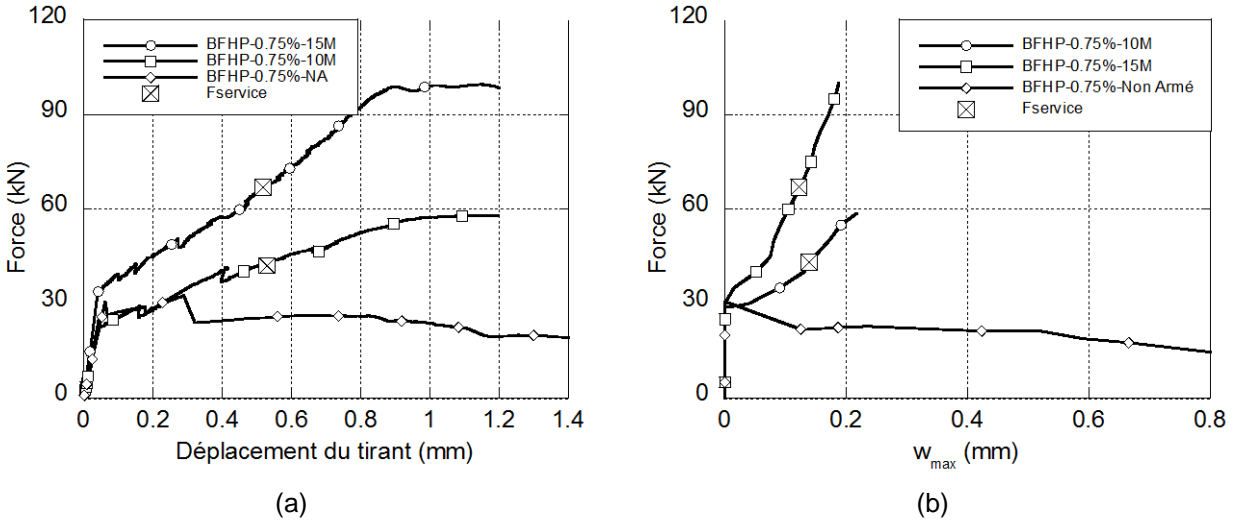


Figure 7 Comportement mécanique en fonction du pourcentage d'armature

a) Force en fonction du déplacement, b) Force en fonction de l'ouverture maximale des fissures.

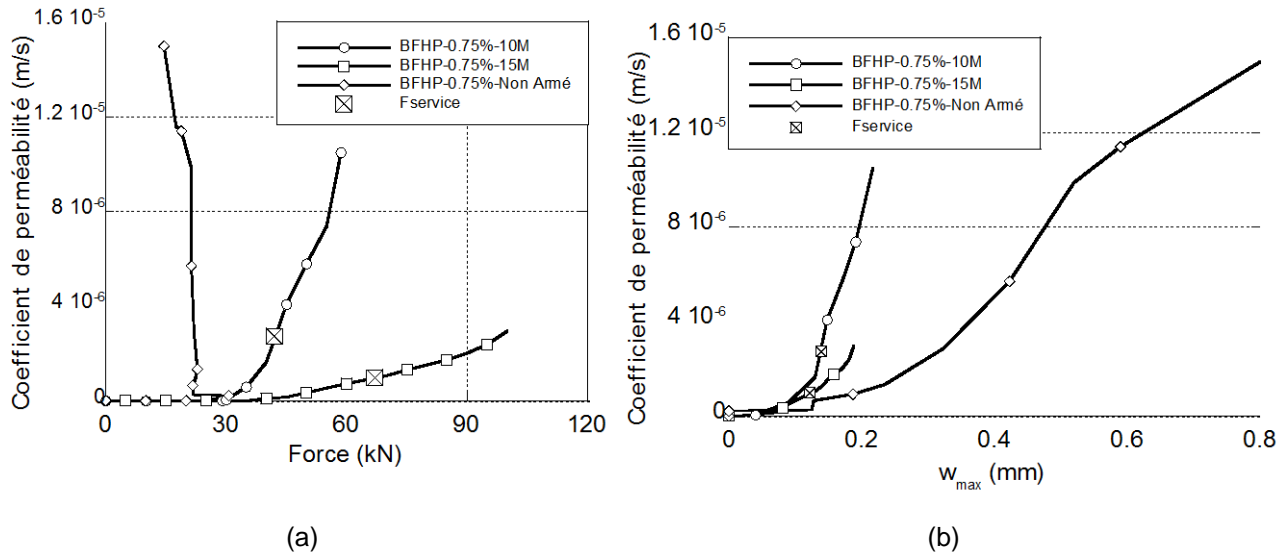


Figure 8 Perméabilité moyenne en fonction du pourcentage d'armature

a) Perméabilité en fonction de la force, b) Perméabilité en fonction de l'ouverture maximale des fissures.

4. DISCUSSION

4.1. Validation

Les courbes présentées aux **Figure 3** et **Figure 4** rendent compte d'une très bonne reproductibilité des essais de perméabilité, tenant compte de la variabilité inhérente à l'hétérogénéité du matériau et, donc au patron de fissuration qui se forme au cours du chargement. Ce dernier diffère d'un spécimen à l'autre ainsi que le nombre de fissures relevées par tirant (5 à 8 fissures pour les tirants en BFHP-0.75%-10M). L'ouverture de fissure maximale est influencée par le nombre de fissures obtenues : plus de fissures résulte généralement en une ouverture maximale plus faible. Par exemple, l'essai N°4 (BFHP-0.75%-10M-4) a présenté le plus de fissures (8 fissures) et a développé l'ouverture maximale la plus faible, égale à 0.190 mm (**Figure 3b**). Cette variabilité des patrons de fissuration explique les écarts observés dans les ouvertures maximales (**Figure 3b**) ainsi que dans la perméabilité mesurée (**Figure 4b**). La comparaison de l'évolution de la perméabilité selon w_{max} avec celle d'une fissure idéalisée par la loi de Hagen-Poiseuille qui considère l'écoulement d'eau au travers d'une seule fissure, réduit par un facteur de rugosité ξ de 0.6 pour tenir compte de la rugosité de surface et de la variation de l'ouverture, montre que, même si un béton multifissuré, la pénétration de l'eau suit tout de même une tendance cubique avec l'ouverture maximale (**Figure 4b**). La multifissuration explique la disparité entre les courbes expérimentales et l'estimation de Hagen-Poiseuille. En dépit des variations inhérentes au matériau, le comportement global des quatre spécimens est donc très similaire et il y a cohérence entre les résultats mécanique et de perméabilité. Ceci confirme la validité des essais réalisés.

4.2. Influence du dosage en fibre

L'effet de couture des fissures par les fibres métalliques dans le béton assurant un meilleur contrôle de la fissuration observé par plusieurs études (Lawler et al., 2002; Charron et al., 2008; Hoseini et al., 2009) est d'abord confirmé. Plus le dosage en fibres est important, plus cet effet est marqué. Ainsi, en augmentant le dosage en fibres dans les tirants de 0 à 0.75 %, l'ouverture maximale mesurée en service (à $F_{service}$) est réduite de 12 % (**Figure 5b** et **Tableau 4**). L'incrément du dosage de 0.75 à 1.5 % diminue l'ouverture maximale en service de 40 % (réduction de 47 % par rapport à un dosage de 0 %). Enfin, le dernier incrément de dosage en fibres de 1.5 à 2 % et la réduction significative du rapport E/L ont pour effet combiné de réduire l'ouverture de fissure en service de 64 % (diminution de 81 % par rapport à un dosage de 0 %). Le comportement écrouissant du BFUP est responsable de cette dernière réduction marquée des ouvertures de fissures puisqu'il fait apparaître des microfissures dans le matériau plutôt que des macrofissures dans les BHP et BFHP. Il importe aussi de souligner que les réductions d'ouverture mentionnées considèrent des niveaux de chargement de service qui sont d'autant plus élevés que le dosage en fibres est élevé ($F_{service} = (F_{fissuration} + F_{ultime})/2$). Ainsi, à un chargement équivalent, les réductions apportées par l'ajout des fibres seraient supérieures. De plus, l'augmentation du dosage en fibres permet également une meilleure absorption de l'énergie élastique relâchée lors de la création d'une macrofissure. Ceci se manifeste à la **Figure 5a** où les chutes de charges associées à la formation de macrofissures sont réduites pour les dosages élevés en fibres.

De part leur action sur le développement de la fissuration (ouvertures de fissures plus fines), l'inclusion de fibres dans le béton a un impact direct sur la perméabilité du béton fissuré. L'intervalle de confiance à 90 % (**Figure 6a**) est un bon indice de la variabilité du coefficient de perméabilité pour les différentes conditions d'essai. Ces intervalles définissent quatre fuseaux distincts qui font valoir le réel potentiel des fibres sur la perméabilité. Ainsi, en augmentant le dosage en fibres dans les tirants de 0 à 0.75 %, la perméabilité en service (à $F_{service}$) est réduite de 73 % (**Figure 6b** et **Tableau 4**). L'incrément du dosage de 0.75 à 1.5 % diminue la perméabilité en service de 78 % (réduction de 94 % par rapport à un dosage de 0 %). Enfin, le dernier incrément de dosage en fibres de 1.5 à 2 % et la réduction significative du rapport E/L ont pour effet combiné de réduire la perméabilité en service de 94 % (diminution de 99.7 % par rapport à un dosage de 0 %). Les microfissures présentes dans le BFUP en service étant nettement inférieures aux macrofissures dans les BHP et BFHP (**Tableau 4**), la pénétration d'eau est significativement réduite. Il importe à nouveau de souligner que les réductions de perméabilité mentionnées considèrent des niveaux de chargement de service qui sont d'autant plus élevés que le dosage en fibres est élevé, les réductions à chargement équivalent seraient donc supérieures.

4.3. Influence du pourcentage d'armature

Une hausse du pourcentage d'armature a un effet similaire à l'incorporation de fibres dans le béton, c'est-à-dire qu'elle renforce le béton à l'état fissuré. L'armature pontes les fissures comme les fibres, cependant le pontage est localisé avec l'armature plutôt que diffus avec les fibres beaucoup plus petites et nombreuses.

Une hausse du pourcentage d'armature augmente l'aire d'acier et donc la capacité ultime des tirants en BFHP (**Figure 7a**). De plus, elle augmente la surface de contact acier-béton et améliore ainsi l'adhérence entre les deux matériaux. Le transfert de l'effort de traction entre les deux matériaux se produit plus rapidement, diminuant l'espacement moyen des fissures, et favorisant l'augmentation du nombre de fissures en réduisant leurs ouvertures. Ces observations sont retrouvées dans la **Figure 7b** et le **Tableau 4**. Une fissure a été captée dans le tirant non armé, cinq avec la barre 10M ($\rho = 1.23\%$) et neuf avec la barre 15M ($\rho = 2.47\%$). Dans les tirants armés, l'ouverture maximale mesurée en service (à $F_{service}$) est de 0.139 mm et 0.122 mm respectivement pour les renforcements avec 10M et 15M. Ainsi, l'augmentation du pourcentage d'armature améliore le contrôle de la fissuration. D'autres études confirment que l'augmentation du ratio de l'aire d'acier sur l'aire du béton augmente le nombre de fissures (Fields et al. 2004; Massicotte 2006).

Les patrons de fissuration de chacun des tirants influencent directement leur perméabilité à l'eau. Une contribution plus faible sur la perméabilité est attendue pour un nombre de fissures plus élevé et des fissures plus fines. Dans ce contexte, l'augmentation de l'ouverture de l'unique fissure captée dans le BFHP non armé augmente la perméabilité rapidement (**Figure 8**). L'augmentation de la perméabilité est plus rapide dans les tirants armés pour une même ouverture maximale étant donné leur nombre de fissure supérieur (**Tableau 4**). Cependant, la perméabilité mesurée en service (à $F_{service}$) est réduite de 35 % lorsque le pourcentage d'armature est augmenté de 1.23 à 2.47 %, et ce même si le chargement de service est supérieur.

4.4. Comparaison des types de renforcement

L'apport des types de renforcement a été étudié dans ce projet de recherche, soit un renforcement en fibres et un renforcement en armature. Il est intéressant de comparer l'apport de chaque type de renforcement en évaluant un renforcement total apporté par les fibres et les armatures en pourcentage volumique. Le volume d'acier total (%-Vol. total) par rapport au volume du tirant est considéré dans cette analyse, sans regard à l'orientation des fibres qui peut modifier grandement leur contribution mécanique et leur impact sur la perméabilité. Le **Tableau 5** compare trois conditions, en utilisant comme référence le tirant BFHP-0.75%-10M avec un renforcement total de 1.98%-Vol.-Total.

Une hausse du renforcement à 2.72%-Vol.-Total par un ajout supplémentaire de fibres (BFHP-1.5%-10M) augmente légèrement la résistance en service et ultime (environ 12 %, **Tableau 4**). L'ouverture de fissure maximale en service est quant à elle réduite de 40 % et la perméabilité de 78 %. Une hausse du renforcement à 3.22%-Vol.-Total par un ajout supplémentaire d'armature (BFHP-0.75%-15M) augmente significativement la résistance en service et ultime (plus de 30 %, **Tableau 4**). L'ouverture de fissure maximale en service est quant à elle réduite de 12 % et la perméabilité de 35 %.

Cette comparaison confirme que l'armature conventionnelle continue travaille localement en améliorant significativement la capacité portante des tirants (comportement à l'ultime) tout en contribuant légèrement à réduire les ouvertures des fissures et la perméabilité (comportement en service). Les fibres discontinues travaillant de manière diffuse dans tout le volume des tirants améliorent légèrement la capacité portante (comportement à l'ultime), mais contribuent significativement à la réduction des fissures et de la perméabilité (comportement en service). Le type de renforcement à utiliser dépend donc de l'objectif visé par le renforcement, l'amélioration du comportement en service ou à l'ultime.

Tableau 5 Résumé des résultats pour l'étude sur le pourcentage d'armature

Type de tirant	Renforcement fibres (%-Vol.)	Renforcement As (%-Vol.)	Renforcement total As + fibres (%-Vol.-Total)
BFHP-0.75%-10M	0.75 %	1.23 %	1.98 %
BFHP-1.5%-10M	1.5 %	1.23 %	2.72 %
BFHP-0.75%-15M	0.75 %	2.47 %	3.22 %

5. CONCLUSION

Ce projet de recherche a comme objectif global le développement de critères de conception en condition de service du béton armé basés sur la perméabilité à l'eau. La présente étude dévoile les résultats expérimentaux portant sur l'influence du dosage en fibres et du pourcentage d'armature sur la perméabilité à l'eau du béton armé fissuré qui serviront à la sélection de ces critères. L'analyse expérimentale a mené à ces conclusions :

- La procédure expérimentale a été validée par le comportement adéquat des spécimens et la bonne corrélation entre les résultats mécanique et de perméabilité.
- Les ouvertures maximales sont réduites de 12 % et 47 % par rapport au BHP conventionnel pour les BFHP contenant des dosages en fibres de 0.75 % et 1.5 %, en condition de service.
- Grâce à son comportement écrouissant et son faible rapport E/L, le BFUP contenant un dosage en fibre de 2 % réduit l'ouverture maximale de 81 % par rapport à celle du béton conventionnel en condition de service.
- La perméabilité des bétons à l'état fissuré est d'autant plus faible que le dosage en fibres est élevé (réduction de 73 % et 94 % par rapport au béton sans fibre conventionnel pour les BFHP contenant 0.75 % et 1.5 % de fibres), en condition de service.
- Grâce à son comportement écrouissant et son faible rapport E/L, le BFUP contenant un dosage en fibre de 2 % réduit la perméabilité de 99.7 % celle du béton conventionnel (BHP-0%), en condition de service.
- L'augmentation du pourcentage d'armature (1.23 % à 2.47 %) augmente le nombre de fissures (cinq contre neuf) et rend les ouvertures de fissures plus fines, réduisant ainsi le coefficient de perméabilité de 35 % en condition de service.

6. REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été financé par le Fond Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT) et par le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG). Les auteurs remercient Holcim, Bekaert, Euclid et Sika de leurs dons en matériaux pour la réalisation du projet de recherche.

7. RÉFÉRENCES

- ACI.Committee.318 (2003) *Building code requirements for structural concrete (aci 318-02) and commentary (aci 318r-02)*, American Concrete Institute, Detroit, USA.
- Akhavan, A., Shafaatian, S.M.H. et Rajabipour, F. (2012) Quantifying the effects of crack width, tortuosity, and roughness on water permeability of cracked mortars, *Cement and Concrete Research* 42 (2): 313-320.
- Alalouf, S., Labelle, D. et Ménard, J. (1990) *Introduction à la statistique appliquée*, Addison-Wesley Longman, Longueuil, Québec, Canada.
- ASTM C39/C39M (2012) *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C469/C469M (2010) *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

- Beaurivage, F. (2009) *Étude de l'influence des paramètres structuraux sur les lois de comportement des bétons fibrés pour la conception de structures*, Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada.
- Breysse, D. et Gérard, B. (1997) *Transport of fluids in cracked media, Reinhardt HW (ed) Rilem report 16 - penetration and permeability of concrete : Barriers to organic and contaminating liquids*, vol 16. E & FN Spon, Stuttgart, Germany.
- Charron, J.P., Denarié, E. et Brühwiler, E. (2008) Transport properties of water and glycol in an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under high tensile deformation, *Cement and Concrete Research* 38 (5): 689-698.
- Charron, J.P., Denarié, E. et Brühwiler, E. (2007) Permeability of ultra high performance fiber reinforced concretes (uhpfrc) under high stresses, *Materials and Structures* 40 (3): 269-277.
- CSA (2009) *Concrete materials and methods of concrete construction CAN-CSA A23.1-09 (canadian standards association)*, Mississauga, Ontario, Canada.
- Desmettre, C. et Charron, J.P. (2011) Novel water permeability device for reinforced concrete under load, *Materials and Structures* 44 (9): 1713-1723.
- Fields, K. et Bischoff, P.H. (2004) Tension stiffening and cracking of high-strength reinforced concrete tension members, *ACI Structural Journal* 101 (4): 447-456.
- Hoseini, M., Bindiganavile, V. et Banthia N (2009) The effect of mechanical stress on permeability of concrete: A review, *Cement and Concrete Composites* 31 (4): 213-220.
- Kollek, J.J. (1989) The determination of the permeability of concrete to oxygen by the cembureau method—a recommendation, *Materials and Structures* 22 (3): 225-230.
- Lawler, J.S., Zampini, D. et Shah, S.P. (2002) Permeability of cracked hybrid fiber-reinforced mortar under load, *ACI Material Journal* 99: 379-385.
- Ludirdja, D., Berger, R.L. et Young, J.F. (1989) Simple method for measuring water permeability of concrete, *ACI Materials Journal* 86 (5): 433-439.
- Massicotte, B. (2006) *Calcul des structures en béton armé*, Notes de cours, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada.
- Naaman, A.E. (2008) *High performance fiber reinforced cement composites, High-performance construction materials: Science and applications*, Caijun Shi Y-LM, vol 1., Buffalo, NY, USA.
- Neville, A.M. (1996) *Properties of concrete*, 4^e éd., John Wiley & Sons, New York, NY, USA.
- Nokken, M.R. et Hooton, R.D. (2008) Using pore parameters to estimate permeability or conductivity of concrete, *Materials and Structures* 41 (1): 1-16.
- Powers, T.C., Copeland, L.E., Hayes, J.C. et Mann, H.M. (1954) Permeability of portland cement paste, *Journal of the American Concrete Institute* 26 (3): 285–298.
- Rapoport, J., Aldea, C., Shah, S., Ankenman, B. et Karr, A. (2002) Permeability of cracked steel fiber-reinforced concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering* 14 (4): 355-358.
- RILEM TC 162-TDF (2003) Final recommendation of RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete sigma-epsilon-design method, *Materials and Structures* 36 (262): 560-567.
- Wang, K., Jansen, D.C., Shah, S.P. et Karr, A.F. (1997) Permeability study of cracked concrete, *Cement and Concrete Research* 27 (3): 381-393.
- Yi, S.T., Hyun, T.Y. et Kim, J.K. (2011) The effects of hydraulic pressure and crack width on water permeability of penetration crack-induced concrete, *Construction and Building Materials* 25 (5): 2576-2583.