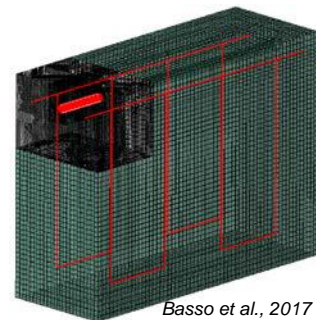
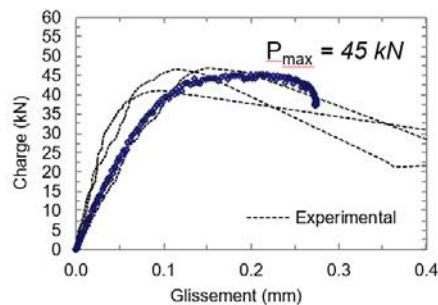


Actes de la 18^e édition des Journées Scientifiques

(RF)²B Regroupement Francophone
pour la Recherche et la
Formation sur le Béton

« Les nouveaux matériaux et les méthodes innovantes utilisés dans un
contexte de développement durable »



6 et 7 Juillet 2017

Université Laval
CRIB Québec



TABLE DES MATIÈRES

Programme des Journées pp. iv

Liste des affiches pp. viii

Articles

UTILISATION DU BÉTON RECYCLÉ DANS LA FORMULATION DES BÉTONS AUTO-COMPACTANTS pp.1-11

Md El K. Bouarroudj^{A,B}, C. Colman^{A,B}, E. Robinet^A, Z. Zhao^A, F. Michel^A, L. Courard^A, S. Remond^B, D. Bulteel^B

A : Laboratoire des Matériaux de Construction, Urban and Environmental Engineering, – Université de Liège Belgique

B : IMT Lille Douai, Univ. Lille, EA 4515 LGCgE – Laboratoire de Génie Civil et Géo Environnement, Département Génie Civil & Environnemental, F-59000 Lille, France

STRATEGIE MULTI-ECHELLE DE MODELISATION NUMERIQUE DE LA FISSURATION DES STRUCTURES EN BETON ARME DE GRANDES DIMENSIONS pp. 12-22

C. Nader^A, P. Rossi^A, J-L. Tailhan^A

A : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), Université Paris-Est

VALORISATION DE LAITIERS D'ACIÉRIE DANS DES BLOCS DE BÉTONS D'ENROCHEMENT pp. 23-33

C. Perlot^A, H. Carré^A

A : Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie électrique, ISA BTP - Université de Pau et des Pays de l'Adour, Anglet, France

PRÉ-MÉLANGES DE SABLES NATURELS AVEC DE FAIBLES PROPORTIONS DE SABLES DE BÉTONS RECYCLÉS : PROPRIÉTÉS ET DOSAGES pp. 34-42

R. Trauchessec^A, E. Ghorbel^B, A. Lecomte^A, O. Safiuallah^B, Z. Ben Aouda^A, G. Wardeh^B

A : Équipe Matériaux pour le Génie Civil, Institut Jean Lamour - Université de Lorraine, Nancy, France

B : Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil - Université de Cergy-Pontoise, France



*ÉTUDE DE L'AUTOCICATRISATION DE MORTIERS CONTENANT DES
ADDITIONS REACTIVES* pp. 43-58

S. Fattahi^A, R. Gagné^A

A : Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB), Université
de Sherbrooke, Québec, Canada

*FLUAGE DU BÉTON ET DU BÉTON PRÉCONTRAIT SOUS
CONDITIONS THERMO-HYGRO-MÉCANIQUES VARIABLES* pp. 59-69

H. Cagnon^A, V.N. Nguyen^B, T. Vidal^A, J.M. Torrenti^B, A. Sellier^A

A : Université de Toulouse; UPS, INSA; LMDC (Laboratoire Matériaux et
Durabilité des Constructions); 135, avenue de Ranguel; F-31 077
Toulouse Cedex 04, France.

B : Institut français des sciences et technologies des transports, de
l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR), 14-20 Boulevard Newton -
Champs-sur-Marne – 77447 Marne-la-Vallée Cedex 2, France.

*RÉCENTS DÉVELOPPEMENTS DANS LA RECHERCHE ET LES
SPÉCIFICATIONS SUR LES GRANULATS À BÉTON INCORPORANT
DES SULFURES DE FER* pp. 70-80

B. Fournier^A, J. Duchesne^A, A. Rodrigues^B

A : Département de géologie et de génie géologique, Université Laval,
Québec, Canada

B : GHD Consultants Ltée, Québec, Canada

*EFFET DE LA PRÉSENCE DE VIDES SUR LA QUALITÉ DE
L'ADHÉRENCE D'UNE BARRE D'ARMATURE* pp. 81-89

P. Basso Trujillo^A, M. Jolin^A, B. Massicotte^B, B. Bissonnette^A

A : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton, Université Laval,
Québec, Canada

B : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton, Polytechnique
de Montréal, Québec, Canada

*AMELIORER L'EVALUATION DES STRUCTURES ENDOMMAGEES PAR
DES REACTIONS DE GONFLEMENT INTERNE A L'AIDE DE
MODELISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES* pp. 90-98

S. Multon^A, A. Sellier^A

A : Université de Toulouse, Laboratoire Matériaux et Durabilité des
Constructions, INSA - Université Paul Sabatier, Toulouse, France

*INFLUENCE DU TYPE DE FIBRES ET DE LEUR ORIENTATION SUR LA
FISSURATION ET LA PERMÉABILITÉ DU BÉTON ARMÉ SOLlicitÉ EN
TRACTION* pp. 99-117

T. Plagué^A, C. Desmettre^A, J.-P. Charron^A

A : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), École
Polytechnique, Montréal, QC, Canada



UNIVERSITÉ
LAVAL



Centre de recherche sur les
infrastructures en béton (CRIB)

PASSERELLE PIETONNE ISABEY-DARNLEY – UTILISATION DE
DALLES PREFABRIQUEES EN BFUP

pp. 118-143

É. Cantin-Bellemare^A, J.-P. Charron^B

A : Ville de Montréal, QC, Canada

B : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), École
Polytechnique, Montréal, QC, Canada



PROGRAMME DU 6 JUILLET 2017

8h30 **Accueil des participants**

9h00 Mot de bienvenue et présentation du (RF)²B par Gilles Escadeillas

9h15 **Conférencier invité** : Jacques Marchand, SIMCO Technologies
Titre : L'ingénierie de la durabilité - Concevoir des structures qui
atteindront une durée de vie de 100 ans et plus

10h15 **Étude du comportement résiduel de structures atteintes par la RAG**
Farid Benboudjema (1), Georges Nahas (1, 2), Ejona Kishta (1)
(1) LMT (ENS Cachan, CNRS, Université Paris Saclay), France
(2) Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, France

10h45 : Pause-café – (affiches)

11h15 **Mécanismes d'hydratation des liants à base de ciments alumineux
en système dilué - confrontation mesures expérimentales et
modélisation numérique**
Nicolas Maach (1), Jean-François Georgin (1), Judith Pommay (2)
(1) LGCIE – INSA de Lyon, France
(2) Kerneos, France

11h45 **Passerelle piétonne Isabey-Darnley – Utilisation de dalles
préfabriquées en BFUP**
Étienne Cantin-Bellemare (1), Jean-Philippe Charron (2)
(1) Ville de Montréal
(2) École Polytechnique de Montréal

12h15 Repas

13h45 **Utilisation de bétons recyclés dans la formulation de bétons
autocompactants**
Mohamed El Karim Bouarroudj (1,2), Charlotte Colman (1,2), Eva
Robinet (1), Zengfeng Zhao (1), Frédéric Michel (1) Luc Courard (1),
Sébastien Remond (2), David Bulteel (2)
(1) Laboratoire des Matériaux de Construction, Urban and Environmental
Engineering, – Université de Liège, Belgique
(2) IMT Lille Douai, Université de Lille, France

14h15 **Stratégie multi-échelle de modélisation numérique de la fissuration
des structures en béton armé de grandes dimensions**
Christian Nader, Pierre Rossi, Jean-Louis Tailhan
IFSTTAR, France



- 14h45 **Valorisation de laitiers d'aciérie dans des blocs de bétons d'enrochement**
Céline Perlot, Hélène Carré
Université de Pau et des Pays de l'Adour - laboratoire SIAME, France
- 15h15 **Mélange de sable naturel avec une faible proportion de sables de bétons recyclés : dosages et propriétés**
Romain Trauchessec (1), Elhem Ghorbel (2), André Lecomte (1), Omary Safiuallah (2), Zakaria Ben-Aouda (1), George Wardeh (2)
(1) Équipe Matériaux pour le Génie Civil, Institut Jean Lamour - Université de Lorraine, Nancy, France
(2) Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil - Université de Cergy-Pontoise, France
- 15h45 **Visite des laboratoires de l'Université Laval**
- 19h00 **Restaurant Le Cosmos** (terrasse), 2813 boulevard Laurier, Québec



PROGRAMME DU 7 JUILLET 2017

8h30 Accueil des participants

9h00 **Conférencier invité** : Luc Bédard, Association béton Québec (ABQ)
Titre : L'avenir de l'industrie du béton et l'intégration du développement durable

10h00 **Influence des additions cimentaires à forte teneur en chaux libre sur l'autocicatrisation naturelle des mortiers**
Salma Fattahi, Richard Gagné
Université de Sherbrooke

10h30 Pause-café (affiches)

11h00 **Fluage du béton et du béton précontraint sous conditions thermo-hygro-mécaniques variables**
Hugo Cagnon (1), V.N. Nguyen (2), T. Vidal (2), J.M. Torrenti (2), A. Sellier (1)
(1) LMDC, France
(2) IFSTTAR, France

11h30 **Récents développements dans la recherche et les spécifications sur les granulats à béton incorporant des sulfures de fer**
Benoit Fournier, Josée Duchesne et Andreia Rodrigues
CRIB, Université Laval

12h00 Repas

13h30 **Analyse du cycle de vie pour les infrastructures en génie civil : passé, présent et futur**
Ben Amor, Jean-Martin Lessard
CRIB, Université de Sherbrooke

14h00 **Calcul de la longueur de développement en présence de défauts**
Pasquale Basso (1), Marc Jolin (1), Bruno Massicotte (2)
(1) CRIB, Université Laval
(2) CRIB, École Polytechnique de Montréal

14h30 **Améliorer l'évaluation des structures endommagées par des réactions de gonflement interne à l'aide de modélisations physico-chimiques.**
Stéphane Multon, Alain Sellier
LMDC, France



15h00 **Influence de l'orientation et du type de fibres sur la fissuration et la perméabilité à l'eau du béton armé**

Thibault Plagué, Clélia Desmettre, Jean-Philippe Charron
École Polytechnique de Montréal

15h30 Clôture des Journées scientifiques

15h45 Réunion du Conseil d'orientation (interne)
Salle 3347, pavillon Alphonse-Desjardins



AFFICHES POUR LES JOURNÉES SCIENTIFIQUES DU (RF)2B

BÉDARD, Frédéric. *Renforcement à l'effort tranchant des dalles épaisses en béton en conditions de service*. Université Laval

COLMAN, Charlotte. *Residues de plâtre dans les fines de recyclage*. Université de Liège

ESSALIK, Samy-Joseph. *Nouvel essai annulaire adapté aux bétons à retrait compensé*. Université Laval

FAUCON, Samuel. *Réactions de gonflement interne (RAS et DEF) soumis à des chocs thermiques*. Université de Sherbrooke

FRECH-BARONET, Jessy. *Influence de l'humidité relative sur le comportement du fluage et de la relaxation de la pâte de ciment à l'échelle de la microstructure*. Université Laval

GAGNON, Antoine. *Conception et évaluation de la performance du béton projeté renforcé de fibres : concepts et défis*. Université Laval

HILT, Mélodie. *Production de béton en usine et développement durable : utilisation de technologie de contrôle continu*. Université Laval

MENU, Bruce-Ghandi. *Comportement différé des bétons au jeune âge*. Université Laval

MBINA, Mihindou. *Évaluation non-destructive de la qualité de l'adhérence entre deux bétons par la méthode de la réponse impulsionnelle (RI)*. Université de Sherbrooke

VU, Viet Anh. *Mur radiant : panneaux composite hybride bois et matériel inorganique*. Université Laval

MASOUD, Hosseinpoor. *Simulation numérique de l'écoulement du béton autoplaçant (BAP)*. Université de Sherbrooke

AHMED, Mostafa. *Nouvelle méthode pour quantifier la structuration des suspensions cimentaires*. Université de Sherbrooke

DIMA, Youness. *Caractérisation améliorée de l'écoulement des liants, ajouts cimentaires et liants alternatifs*. Université de Sherbrooke

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

Université Laval, Québec, Canada
6 et 7 Juillet 2017

INFLUENCE DU TYPE DE FIBRES ET DE LEUR ORIENTATION SUR LA FISSURATION ET LA PERMÉABILITÉ DU BÉTON ARMÉ SOLLICITÉ EN TRACTION

T. Plagué^A, C. Desmettre^A, J.-P. Charron^A

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

RÉSUMÉ : Au cours de leur durée de vie, les structures en béton armé subissent diverses sollicitations (internes ou externes) pouvant induire de la fissuration. Ces fissures créent un chemin préférentiel au sein du béton et en augmentent la perméabilité à l'eau, aux gaz et aux ions agressifs, favorisant ainsi la détérioration de la structure. La conception de structures durables requiert donc une bonne compréhension de la perméabilité de la structure. Un dispositif de perméabilité innovant a permis de mesurer l'impact de l'orientation des fibres et de 2 types de fibres sur la perméabilité à l'eau de tirants en béton fibré à hautes performances (BFHP), sollicités simultanément en traction uniaxiale. Des techniques spécifiques de mise en place du BFHP ont permis d'obtenir trois orientations différentes de fibres d'acier (favorable, intermédiaire et défavorable) représentatives de celles qui pourraient être retrouvées dans des éléments structuraux en béton renforcé de fibres (BRF). Des angles moyens d'orientation des fibres de 39, 42 et 54° par rapport à la direction de sollicitation des tirants ont été obtenus respectivement pour les orientations favorable, intermédiaire et défavorable. Le passage d'une orientation favorable à défavorable (39 à 54°) a réduit la résistance en traction (f_t) des spécimens de caractérisation de 33 % et a augmenté la perméabilité (K_w) des tirants de 1990 % pour un même niveau de force et de 600 % pour un même niveau de contrainte moyenne dans la barre d'armature. L'impact de l'orientation des fibres est clairement plus important sur la perméabilité à l'eau des BFHP que sur leur comportement mécanique. Pour une même orientation favorable, le remplacement des fibres d'acier par des fibres synthétiques dans le BFHP a résulté en un moins bon contrôle de la fissuration à l'échelle du matériau et de la structure et une réduction moindre de la perméabilité.

1. INTRODUCTION

La durabilité des structures en béton armé est influencée par le transport de l'eau et des agents agressifs au sein du béton, par perméabilité, diffusion ou encore absorption capillaire. Au cours de leur vie, ces structures fissurent suite à diverses sollicitations d'origines interne (hydratation, retrait, fluage) ou externe (chargement mécanique et environnemental). Ces fissures offrent un chemin préférentiel de pénétration des agents extérieurs, favorisant ainsi la dégradation de la structure par cycles de gel-dégel, attaques aux sulfates, réactions alcalis-granulats ou encore par corrosion des armatures (Claisse, 2008; Mehta, 1991; Neville, 1995). Ces détériorations réduisent la durée de vie des ouvrages et augmentent les coûts directs de réhabilitation ainsi que les coûts indirects associés aux impacts socio-économiques et environnementaux qui en découlent. Dans ce contexte, la durabilité des structures est maintenant plus que jamais une priorité pour les propriétaires d'ouvrages.

Parmi les propriétés de transport, la perméabilité, définie comme la capacité d'un matériau poreux à être traversé par un fluide sous un gradient de pression, est la plus impactée par la présence de fissures et peut être utilisée comme indicateur de durabilité. Afin de dimensionner des structures durables, il est donc nécessaire d'identifier et d'évaluer les paramètres qui influencent la perméabilité du béton fissuré. Des études portant sur des spécimens déchargés présentant une seule fissure ont montré que la perméabilité du béton fissuré est principalement contrôlée par l'ouverture de fissure (Aldea et al., 2000; Hoseini et al., 2009; Picandet et al., 2009; Rapoport et al., 2002; Wang et al., 1997). De manière à être plus représentatif de la réalité des structures qui sont chargées et multi-fissurées, des chercheurs se sont intéressés à la perméabilité de spécimens de béton sous chargement en traction (Lawler et al., 2005). La perméabilité a également été mesurée plus récemment sur des tirants en béton armé sollicités en traction uniaxiale de manière à reproduire le comportement global retrouvé dans les zones tendues de structures en béton armé (Desmettre et Charron, 2012; Hubert et al., 2015).

Ces derniers essais ont entre autre permis de montrer que la perméabilité des bétons renforcés de fibres (BRF) est réduite par rapport au béton conventionnel dû à la capacité des fibres à coudre les fissures (fissures plus fines). Ceci a été observé avec l'utilisation de fibres d'acier (Hubert et al., 2015; Lawler et al., 2002; Rapoport et al., 2002), synthétiques ou des combinaisons des deux (Lawler et al., 2002). Ainsi, tout paramètre qui influence l'interaction des fibres avec la matrice du béton, et donc leur capacité à contrôler la fissuration, pourrait avoir un impact sur la perméabilité. Ces paramètres doivent être étudiés pour bien comprendre le gain de durabilité que peuvent apporter les structures en BRF. Il a été observé que l'augmentation du dosage en fibres d'acier (Hubert et al., 2015; Rapoport et al., 2002) diminue la perméabilité à l'eau. L'impact de l'orientation des fibres sur la perméabilité du béton fissuré n'a néanmoins jamais été étudié malgré l'influence significative de ce paramètre sur l'efficacité des fibres à coudre les fissures (Delsol et Charron, 2013; Ferrara et al., 2011; Oesterlee, 2010) et la variation de ce paramètre d'une structure en BRF à une autre selon la configuration des coffrages, la présence des barres d'armature et la fluidité du béton. Étudier l'impact de l'orientation des fibres sur la durabilité des BRF est donc essentielle.

L'objectif général de ce projet est donc d'étudier l'influence de l'orientation des fibres et du type de fibres sur la perméabilité à l'eau des structures en BRF. Un dispositif de perméabilité développé à l'École Polytechnique de Montréal (Desmettre et Charron, 2011; Hubert et al., 2015) a été utilisé pour mesurer la perméabilité à l'eau ainsi que les ouvertures des fissures, simultanément à la sollicitation en traction de tirants en béton armé.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. Programme expérimental

Les tirants ont été soumis à des mesures de perméabilité à l'eau simultanément à l'application d'un chargement quasi-statique en traction uniaxiale à l'âge de 50 jours. Les ouvertures des fissures formées au cours du chargement ont également été enregistrées en temps réel. Les tirants étaient composés de béton fibré à hautes performances (BFHP) autoplaçant de rapport eau sur liant (E/L) de 0,43 et contenant 0,75 % en volume de macrofibres. Deux types de macrofibres ont été testés : des fibres d'acier à crochets (BFHP-A) et des fibres synthétiques (BFHP-S). Les compositions des BFHP-A et BFHP-S sont présentées au **Tableau 1** et les propriétés mécaniques et géométriques des fibres sont résumées au **Tableau 2**.

Trois orientations différentes, représentatives d'éléments structuraux en BRF, ont été testées pour les fibres d'acier : favorable (BFHP-A-F), intermédiaire (BFHP-A-I) et défavorable (BFHP-A-D). La condition favorable correspond à la situation où les fibres sont alignées au mieux avec la direction du chargement en traction (selon l'axe longitudinal du tirant). La condition défavorable représente quant à elle la situation où l'axe des fibres s'éloigne le plus de cette direction. L'orientation intermédiaire se situe entre ces deux situations extrêmes. Des essais réalisés préliminairement à ce projet ont montré que l'orientation intermédiaire (BFHP-A-I) obtenue dans ce projet est similaire à celle qui serait obtenue avec le même béton de maniabilité courante qui aurait été vibré. Les tirants avec fibres synthétiques ont seulement été testés avec une orientation favorable (BFHP-S-F) dû à la grande flexibilité de ces fibres qui ne permet ni de contrôler facilement l'orientation des fibres ni de la détecter ensuite par des techniques d'analyses d'images.

Tableau 1 Composition des bétons (0.75 % vol. de fibres)

Matériau	BFHP-A	BFHP-S
Ciment (kg/m ³)	500	500
Fumée de silice (kg/m ³)	50	50
Eau (kg/m ³)	237	237
Superplastifiant (l/m ³)	11,3	14,1
Agent de viscosité (l/m ³)	0,9	0,9
Sable (kg/m ³)	814	812
Pierre (kg/m ³)	678	657
Dosage fibres d'acier (kg/m ³)	58,5	-
Dosage fibres synthétiques (kg/m ³)	-	6,83
Rapport Eau/Liant (-)	0,43	0,43

Tableau 2 Propriétés des fibres

Type de fibres	Longueur (l)	Diamètre (d)	Facteur de forme (l/d)	Module d'Young	Résistance à la traction
Fibres acier (A)	35 mm	0,55 mm	65	210 GPa	1345 MPa
Fibres synthétiques (S)	38 mm	-	55	9,5 GPa	600-650 MPa

Quatre tirants par conditions (BFHP-A-F, BFHP-A-I, BFHP-A-D, BFHP-S-F) ont été soumis à des essais de perméabilité sous chargement. Suite à ces essais, trois tranches ont été sciées perpendiculairement à l'axe de sollicitation (donc parallèlement aux fissures) dans un tirant de BFHP-A de chaque orientation, de manière à mesurer l'orientation des fibres. Ces tranches ont été prises adjacentes aux trois fissures principales.

La maniabilité et les propriétés mécaniques des BFHP testés, mesurées pour chaque condition d'essai, sont résumées au **Tableau 3** et à la **Figure 1**. La maniabilité a été mesurée par l'essai d'écoulement selon l'ASTM C1611 (2014). La résistance à la compression (f_c) et le module d'élasticité (E_c) ont été déterminés à 28 et 50 jours (âge de l'essai de perméabilité) selon l'ASTM C39 (2015). La résistance à la traction (f_t) a été déterminée à 50 jours sur des cylindres entaillés (**Figure 2a**) selon le RILEM-TC-162 (2003). Ces cylindres ont été obtenus à partir de carottes de 95 mm de diamètre extraites de blocs de béton plus larges coulés avec les mêmes techniques de mise en place que celles utilisées pour la production des tirants (**section 2.2.1**). La **Figure 2** regroupe des plans typiques de fissuration obtenus pour les conditions BFHP-A-F, BFHP-A-I et BFHP-A-D.

Les tirants contiennent une barre d'armature centrale de grade 400W le long de leur axe longitudinal. Les propriétés des armatures (module d'Young de 210 GPa et contraintes élastique et ultime de 470 et 580 MPa respectivement) ont été mesurées selon l'ASTM A615 (2016).

Tableau 3 Maniabilité et propriétés mécaniques des bétons

	Date (j)	BFHP-A-F	BFHP-A-I	BFHP-A-D	BFHP-S-F
f_c (MPa)	28	59,8	59,9	59,5	59,9
	50	67,4	64,4	64,3	61,2
f_t (MPa)	28	-	-	-	-
	50	4,41	4,10	2,96	3,30
E_c (MPa)	28	32 400	34 000	34 300	33 300
	50	32 600	37 600	35 600	35 000
Étalement (mm)	-	490	540	610	620

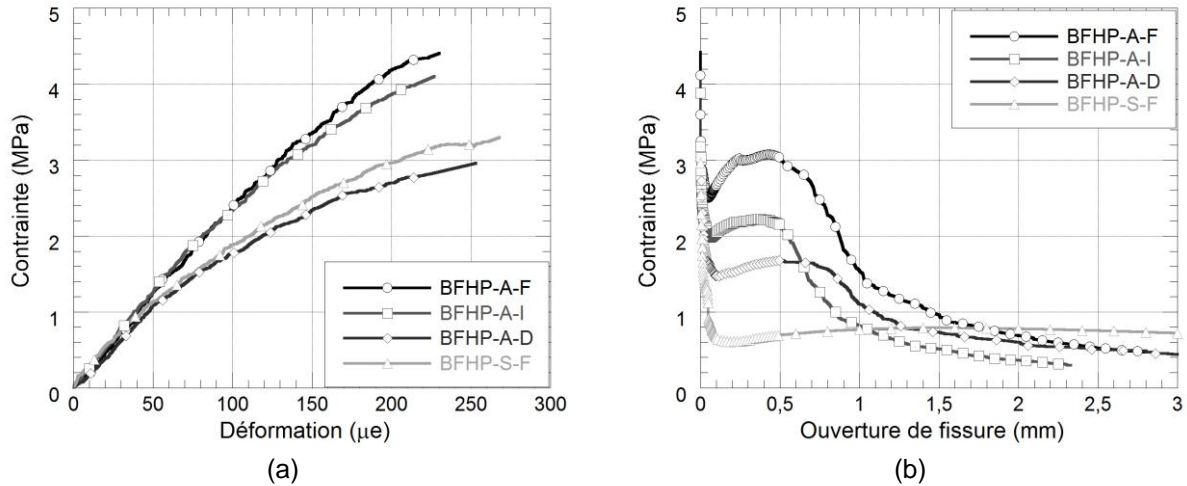


Figure 1 Comportement en traction des bétons à l'étude
 a) Pré-pic (contrainte-déformation), b) post-pic (contrainte-ouverture de fissure)

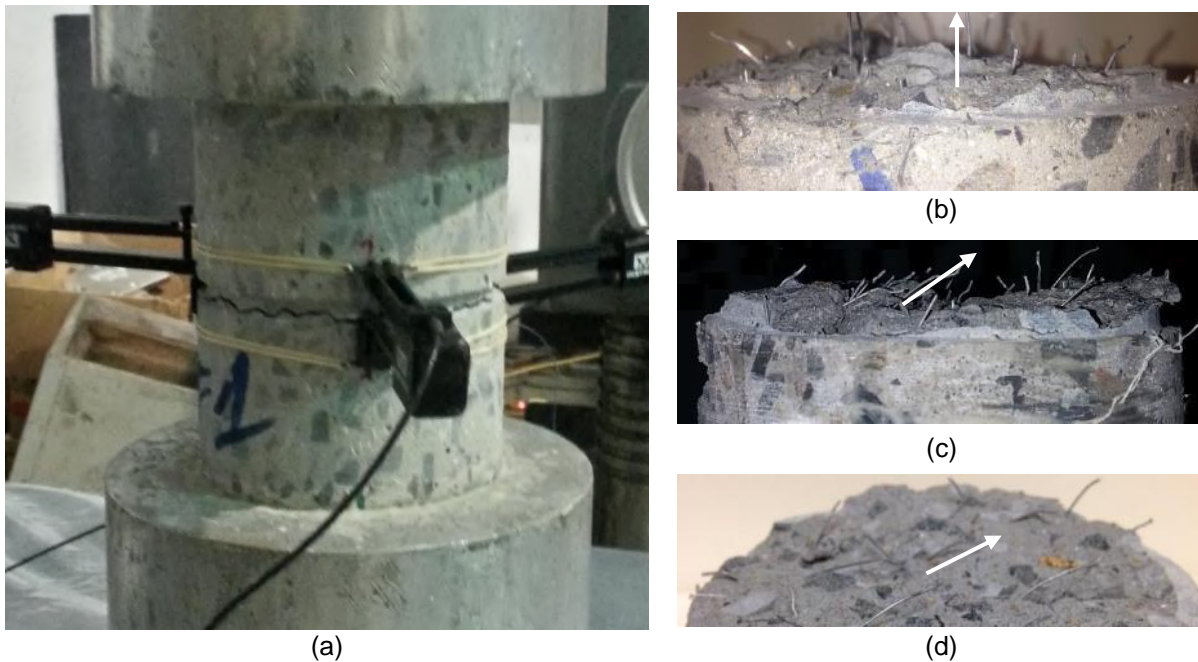


Figure 2 Photos de l'essai de traction
 a) spécimen instrumenté et orientations des fibres de plans de fissuration typiques : b) pour BFHP-A-F, c) pour BFHP-A-I et d) pour BFHP-A-D

2.2. Procédures expérimentales

2.2.1 Préparation des spécimens

Les tirants représentent une barre d'armature et son enrobage de béton retrouvés dans la zone tendue de poutres, dalles ou murs épais sollicités en flexion. Pour ces éléments structuraux soumis à un chargement en flexion, le gradient de contrainte est faible et la contrainte de traction est donc quasiment uniforme dans l'épaisseur de recouvrement. Appliquer un chargement en traction uniaxiale est donc représentatif de l'état de contrainte dans ces éléments structuraux. Les tirants ont une longueur de 610 mm, une section transversale de 90 x 90 mm² et contiennent une barre d'armature longitudinale 10M (diamètre 11,3 mm) au centre. Ces

caractéristiques des tirants ont été choisies lors de projets précédents (Desmettre et Charron, 2011) de manière à obtenir une épaisseur de recouvrement et un patron de fissuration représentatifs des structures de béton armé.

Les trois orientations différentes des fibres d'acier (BFHP-A-F, BFHP-A-I et BFHP-A-D) ont été obtenues en utilisant des techniques différentes de mise en place et en se basant sur le fait que les deux paramètres qui influencent principalement l'orientation des fibres sont la technique de mise en place (outil utilisé et son mouvement) et la direction d'écoulement (Rossi, 1998). Comme le BFHP était autoplaçant, la direction des fibres a suivi la direction d'écoulement du béton dans les coffrages (Martinie et Roussel, 2011).

Chaque tirant des conditions avec une orientation favorable (BFHP-A-F et BFHP-S-F) a été coulé dans des coffrages séparés avec une pelle à main dont le mouvement faisait des allers retours selon l'axe longitudinal du tirant (**Figure 3a**). De manière à minimiser les effets de bords créés par le coffrage pour les tirants d'orientations intermédiaire (BFHP-A-I) et défavorable (BFHP-A-D), les 4 tirants d'une même condition ont été coulés dans un seul coffrage de 90 x 610 x 680 mm³. Le BFHP-A-I a été placé avec un tube se déplaçant à 45° par rapport aux parois des coffrages de manière à obtenir une direction d'écoulement adéquate (**Figure 3b**). Le BFHP-A-D a été initialement placé dans un réservoir vertical placé à l'extrémité du coffrage puis relâché ensuite en une seule fois dans celui-ci (**Figure 3c**) de manière à s'écouler de lui-même à un angle de 90° par rapport à l'axe longitudinal des tirants. Les 4 tirants étaient sciés plus tard dans ces blocs de BFHP-A-I et BFHP-A-D.

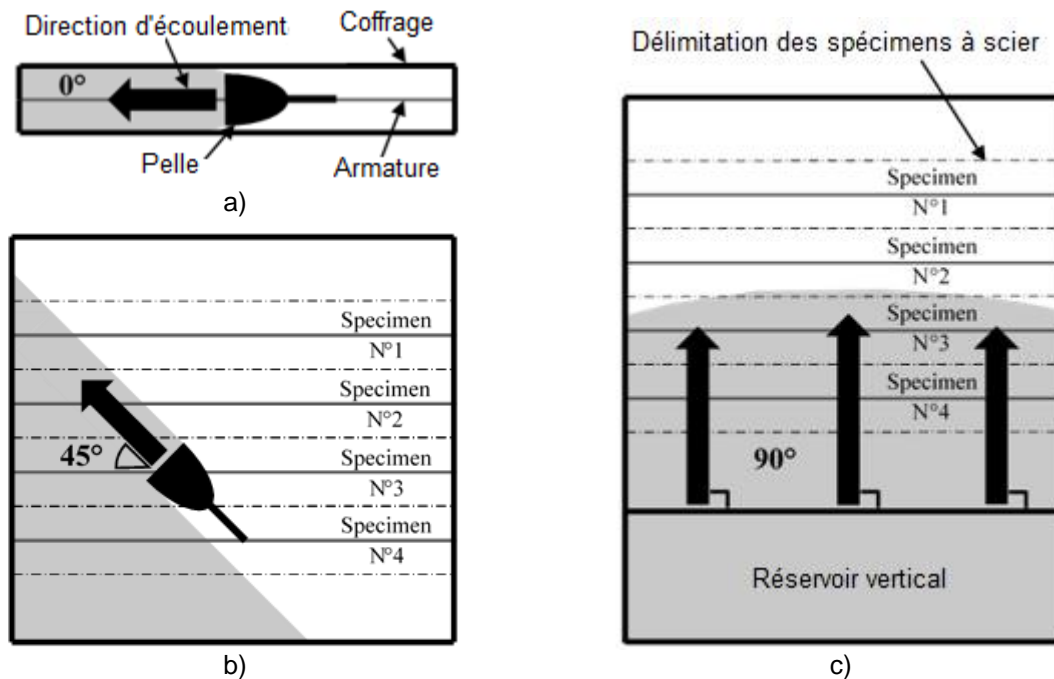


Figure 3 Méthodes de mise en place et direction d'écoulement dans les coffrages
 a) BFHP-A-F et BFHP-S-F, b) BFHP-A-I, c) BFHP-A-D

2.2.2 Mesure de la perméabilité et des ouvertures de fissures

Les tirants ont été sollicités en traction uniaxiale quasi-statique avec des mesures simultanées de perméabilité et des ouvertures des fissures créées (**Figure 4**). Le chargement en traction uniaxiale était appliqué par une presse hydraulique de capacité 2,5 MN à une vitesse de chargement constante de 0.05 mm/min jusqu'à atteindre la plastification de la barre d'armature.

Avant d'installer le tirant dans la presse, 13 capteurs de déplacement PI (plages de mesures de 50 et 100 mm) étaient collés sur deux faces longitudinales opposées du tirant de manière à mesurer les ouvertures de fissures au cours du chargement. Ces deux faces, ainsi que celles d'extrémité du tirant, étaient ensuite scellées par une membrane élastomère étanche (**Figure 5**) dont l'impact sur le

comportement mécanique est très négligeable dû à sa très faible rigidité. Deux réservoirs en aluminium étaient ensuite fixés sur les deux faces non-scellées du tirant par un système de serrage prévenant toute fuite entre ces réservoirs et le tirant (**Figure 5**). Deux tiges filetées à haute résistance étaient vissées à des coupleurs en acier noyés dans le béton et connectés aux extrémités de la barre d'armature, de manière à assurer la plastification de la barre d'armature dans le tirant. Les extrémités opposées des tiges filetées étaient ensuite fixées dans les mâchoires de la presse.

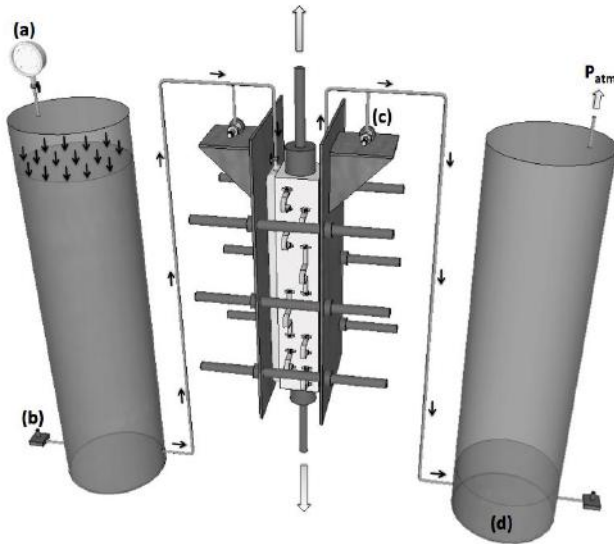


Figure 4 Dispositif de perméabilité

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

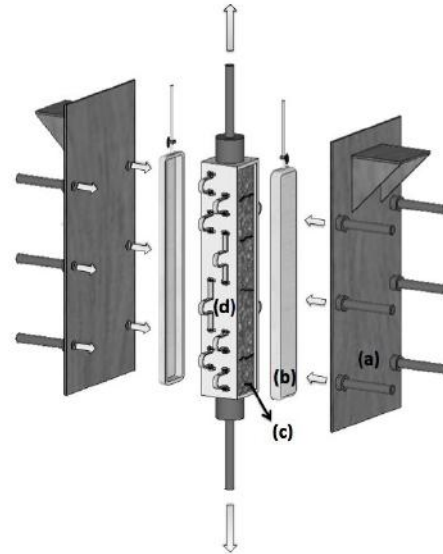


Figure 5 Cellule de perméabilité

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

Une fois le tirant installé dans la presse, une pression était appliquée sur l'eau du réservoir d'entrée alors que celui de sortie restait à pression atmosphérique (**Figure 4**). Cette différence de pression initie un gradient de pression qui induit un écoulement d'eau dans le circuit hydraulique saturé en eau qui va du réservoir d'entrée vers celui de sortie en traversant le tirant. Le gradient de pression appliqué au tirant (50 kPa, équivalent à 5 m d'eau) était mesuré par les capteurs de pression disposés sur le système de serrage et induisait un écoulement d'eau unidirectionnel à travers les deux faces non-scellées du tirant. Des capteurs de hauteur différentielle installés à la base des cylindres d'entrée et de sortie enregistraient les changements de volume dans ces réservoirs de manière à en déterminer les débits d'eau en amont et en aval du tirant et donc le débit d'eau qui traverse le tirant. La **Figure 4** illustre une paire de réservoirs pour des fins de simplicité. Néanmoins le dispositif de perméabilité comprend 3 paires de réservoirs de différents diamètres de manière à avoir une bonne précision de mesure ainsi qu'un apport suffisant en eau tout au long de l'essai.

Le coefficient de perméabilité à l'eau K_w (m/s) a été calculé avec la loi de Darcy (**Équation 1**) qui implique un écoulement unidirectionnel, laminaire et continu d'un fluide incompressible à travers un milieu poreux et homogène. Dans l'**Équation 1**, K_w (m/s) est le coefficient de perméabilité à l'eau, Q (m³/s) le débit d'eau, L (m) la longueur d'écoulement, A (m²) l'aire de béton exposée à la pénétration d'eau et Δh (m) la hauteur d'eau différentielle qui s'applique sur le tirant. Plusieurs raisons justifient l'utilisation de la loi de Darcy. Le béton a une structure hétérogène. Néanmoins, la matrice de béton peut être considérée homogène à une échelle macroscopique. Lorsque le béton est fissuré, le débit d'eau est contrôlé par les fissures et le débit d'eau entre les fissures devient négligeable par rapport au débit d'eau global. Dans ce cas, en considérant l'échelle structurale, le béton fissuré approche d'un état homogène à mesure que le nombre de fissures augmente et qu'elles deviennent uniformément réparties dans l'élément de béton. L'essai de perméabilité utilisé dans cette étude est mené sur des tirants multi-fissurés. De plus les autres hypothèses de validité de la loi de Darcy sont vérifiées. Finalement cette loi est communément utilisée dans la littérature pour décrire

la perméabilité du béton non fissuré et fissuré (Picandet et al., 2009; Song et Kwon, 2007; Wang et al., 1997) étant donné qu'il n'existe pas d'autres indicateurs de perméabilité.

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

Le dispositif de perméabilité utilisé, avec une précision de mesure de 10^{-13} m/s du coefficient de perméabilité (Desmettre et Charron, 2011), permet d'évaluer la perméabilité du béton non fissuré ou fissuré. La mesure de la perméabilité du béton non fissuré requiert une saturation complète du spécimen et une longue période d'essai. Comme ce projet cible la perméabilité du béton fissuré, les mesures de perméabilité ont été réalisées sur une plus courte période de temps. Une très bonne saturation des tirants a été assurée en les plongeant dans de l'eau saturée en chaux du décoffrage à la réalisation de l'essai à 50 jours. Les débits d'eau mesurés en entrée et en sortie des tirants étaient égaux durant toute la durée de l'essai confirmant ainsi l'état permanent de l'écoulement d'eau durant l'essai complet. Les essais ont été menés à une température de 20°C.

L'évolution des ouvertures de fissures (w) formées dans le tirant au cours du chargement était enregistrée en continu par les capteurs de déplacement PI, simultanément aux mesures de perméabilité. Dès qu'une macro-fissure se créait dans le tirant, son ouverture w était obtenue en déduisant le déplacement élastique du déplacement total mesuré par le capteur PI correspondant. Dans la plupart des essais, une seule fissure se formait par capteur permettant ainsi d'avoir les informations de chaque fissure créée et d'en déduire les ouvertures individuelles, moyennes et maximales dans le tirant.

Avec la simultanéité du chargement, des mesures de perméabilité et des ouvertures de fissures, le dispositif de perméabilité a permis de faire des corrélations directes entre la force appliquée, le déplacement, la perméabilité, les ouvertures de fissures et la contrainte moyenne dans la barre d'armature. Cette contrainte moyenne a été calculée à partir du déplacement longitudinal du tirant en prenant l'hypothèse d'une adhérence parfaite entre le béton et la barre d'armature.

2.2.3 Caractérisation de l'orientation des fibres

L'orientation des fibres a été analysée par un programme d'analyse d'image développé à l'École Polytechnique de Montréal (Delsol et Charron, 2013), qui utilise une méthode similaire à celle développée par Wuest (Wuest et al., 2009) et Mlekusch (Mlekusch, 1999). En premier lieu, les trois tranches extraites d'un tirant de chaque condition de BFHP-A étaient polies afin d'obtenir une surface d'analyse droite et plane. Ces surfaces étaient ensuite peintes, pour faire ressortir les fibres d'acier dans le béton, puis scannées avec une résolution de 2400 dpi. Les étapes du processus d'analyse d'image qui suit (binarisation et détection des contours des fibres) sont illustrées à la **figure 6**.

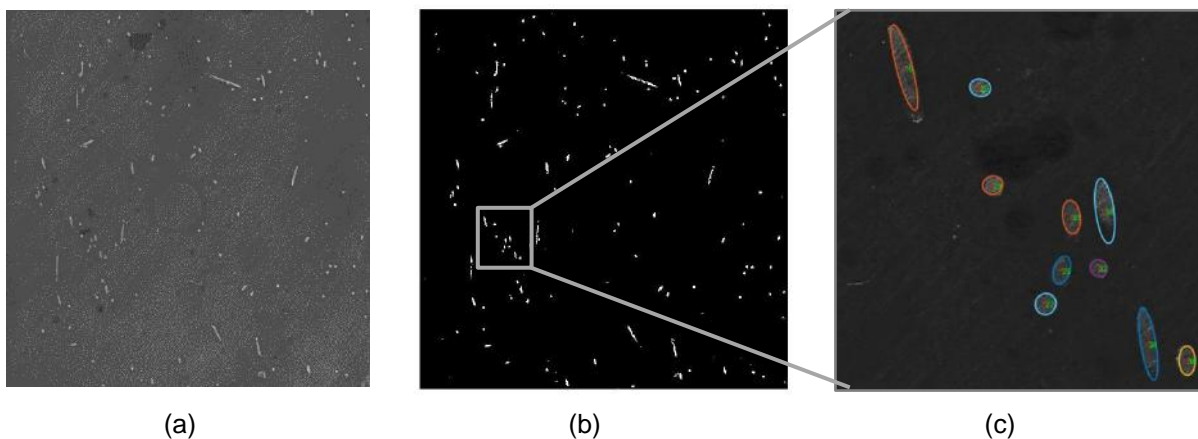


Figure 6 Étapes du processus d'analyse d'image
a) scan, b) binarisation, c) détection des contours des fibres

Comme les fibres d'acier utilisées sont cylindriques, elles ont une section elliptique sur la surface de la tranche sciée. Les caractéristiques géométriques de cette section (centroïde, dimensions) dépendent de l'orientation de la fibre. Le programme d'analyse permet de détecter ces caractéristiques géométriques pour chacune des fibres en appliquant un filtrage morphologique et un seuillage global de manière à identifier adéquatement le contour des fibres et les défauts puis il utilise ensuite la transformée de Hough (Delsol et Charron, 2013). Cette technique permet de calculer l'angle d'orientation (θ) entre chaque fibre et l'axe longitudinal du tirant. Il est important de noter que l'effet des crochets des fibres d'acier utilisées n'a pas été considéré dans l'analyse. Cependant, les crochets représentent une faible proportion (14 %) de la longueur de la fibre et leur influence globale devrait être mineure sur l'orientation moyenne des fibres mesurée.

3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

3.1. Orientation des fibres d'acier

Le programme d'analyse d'image a permis de détecter, sur les sections analysées, le nombre total de fibres ainsi que la section et l'angle d'orientation de chaque fibre. Il a donc été possible d'en déduire l'aire totale des fibres en pourcentage de l'aire totale de béton étudiée. Ces analyses ont confirmé que cette valeur correspondait bien au 0,75 % de fibres introduit dans le BFHP étudié. En effet, l'aire moyenne de fibres obtenue sur des coupes transversales effectuées aléatoirement dans le tirant était de 0,75 % avec des valeurs variant entre 0,65 et 0,81 %. Lorsque ces coupes étaient effectuées proche des macrofissures principales des tirants, l'aire moyenne de fibres par section était de 0,68 % avec des valeurs variant entre 0,54 et 0,81 %. Ce plus faible pourcentage de fibres observé proche des fissures vient du fait que les fissures se créent et se développent dans les zones les plus faibles du tirant où la densité de fibres est plus faible ou l'orientation des fibres moins favorable.

Les analyses d'orientation des fibres ont été réalisées le plus proche possible des fissures formées dans les tirants de manière à représenter l'orientation qui a contrôlé la fissuration. Le nombre moyen de fibres par unité de surface (**Tableau 4**), calculé sur trois tranches extraites d'un tirant de chaque condition BFHP-A, diminuait à mesure que l'orientation des fibres devenait plus défavorable avec des valeurs de 2,3, 1,9 et 1,4 fibres/cm² pour les BFHP-A-F, BFHP-A-I et BFHP-A-D respectivement. À noter qu'un nombre de fibres plus faible par unité de surface ne signifie pas nécessairement avoir un dosage en fibre inférieur sur la surface analysée puisque, si les fibres sont individuellement plus inclinées, leur section avec la surface de béton est plus importante.

Tableau 4 Résultats d'orientation des fibres proche des fissures dans les tirants en BFHP-A

Bétons testés	Densité fibres (fibres/cm ²)	Aire de fibres (surface analysée)	Angle moyen d'orientation (θ)	Coeff. moyen d'orientation ($\alpha=\cos\theta$)	Écart-type
BFHP-A-F	2,3	0,66%	38,8°	0,779	13,5°
BFHP-A-I	1,9	0,70%	42,3°	0,739	14,7°
BFHP-A-D	1,4	0,68%	54,2°	0,585	16,5°

La **Figure 7a** illustre la distribution des fibres (en pourcentage de leur nombre total par section analysée) en fonction de l'angle d'orientation, pour les trois tranches sciées dans un tirant de BFHP-A-I. Ces trois courbes et les angles moyens associés sont assez similaires et illustrent la bonne homogénéité de l'orientation des fibres dans toute la longueur du tirant. Des résultats semblables ont été obtenus pour les deux autres conditions BFHP-A. La **Figure 7b** compare la distribution et l'angle d'orientation moyens obtenus pour chacune des trois conditions de BFHP-A. Les angles d'orientation moyens, les coefficients d'orientation associés ainsi que les écart-type associés sont résumés au **Tableau 4**.

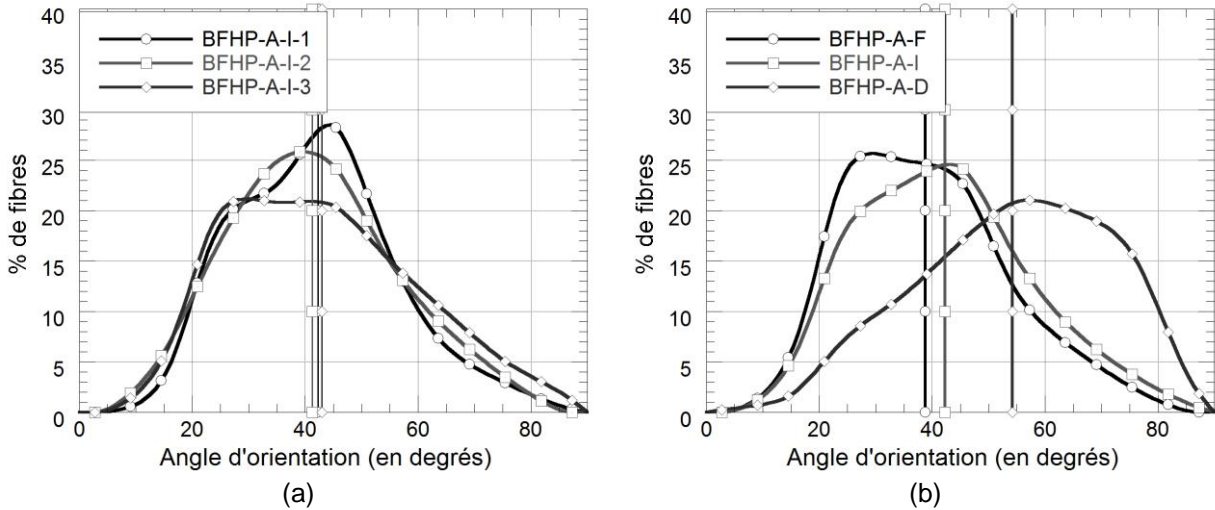


Figure 7 Courbes de distribution des angles d'orientation des fibres d'acier
a) au sein d'une même condition (BFHP-A-I), b) pour toutes les conditions (courbes moyennes)

Malgré les techniques de mise en place spécifiques utilisées, les angles moyens d'orientation des fibres ont été de 38,8, 42,3 et 54,2° pour les BFHP-A-F, BFHP-A-I et BFHP-A-D respectivement. Ceci représente des écarts de 3,5° entre le BFHP-A-F et BFHP-A-I et de 15,4° entre le BFHP-A-F et BFHP-A-D. L'écart-type diminuait à mesure que l'orientation des fibres était moins favorable.

3.2. Comportement mécanique des tirants

Le comportement mécanique des tirants sollicités en traction uniaxiale est présenté par les courbes force-déplacement de l'ensemble des tirants en BFHP-A-I à la **Figure 8a** et par les courbes moyennes des 4 conditions d'essai à la **Figure 9a**.

Le développement de la fissuration est illustré par les courbes force-ouverture de fissure maximale (w_{max}) à la **Figure 8b** pour l'ensemble des tirants en BFHP-A-I et à la **Figure 9b** pour les courbes moyennes des 4 conditions d'essai. Les valeurs de w_{max} et de l'ouverture de fissure moyenne des fissures secondaires (w_{moy}), les ratios w_{moy}/w_{max} et le nombre de fissures des différentes conditions d'essais à différents niveaux de chargement sont résumés au **Tableau 5**. w_{moy} est égale à la somme de toutes les fissures secondaires (donc sans considérer la fissure maximale) divisée par le nombre total de ces fissures. Le ratio w_{moy}/w_{max} indique quant à lui l'importance de l'ouverture moyenne des fissures secondaires par rapport à l'ouverture maximale.

Les résultats obtenus sur l'ensemble des spécimens de BFHP-A-I montrent une très bonne reproductibilité des courbes force-déplacement et une variabilité légèrement plus importante dans les courbes force- w_{max} (**Figure 8**). Globalement, ceci confirme la bonne reproductibilité du comportement mécanique au sein d'une même condition d'essai. Des reproductibilités similaires ont été obtenues pour les autres conditions d'essai.

Les courbes force-déplacement des différentes conditions testées (**Figure 9a**) montrent un comportement typique du béton armé en traction. Une rigidité similaire est observée entre les différentes conditions durant la phase de comportement élastique (Phase I) jusqu'à l'apparition de la première microfissure. Pour les BFHP-A, la première fissure se forme pour une force qui diminue légèrement à mesure que l'orientation des fibres se dégrade ($F_{BFHP-A-F} = 33,6$ kN, $F_{BFHP-A-I} = 32,9$ kN, $F_{BFHP-A-D} = 27,7$ kN). L'utilisation des fibres synthétiques avec une orientation favorable (BFHP-S-F) a amené une force de première fissuration intermédiaire ($F_{BFHP-S-F} = 33,2$ kN).

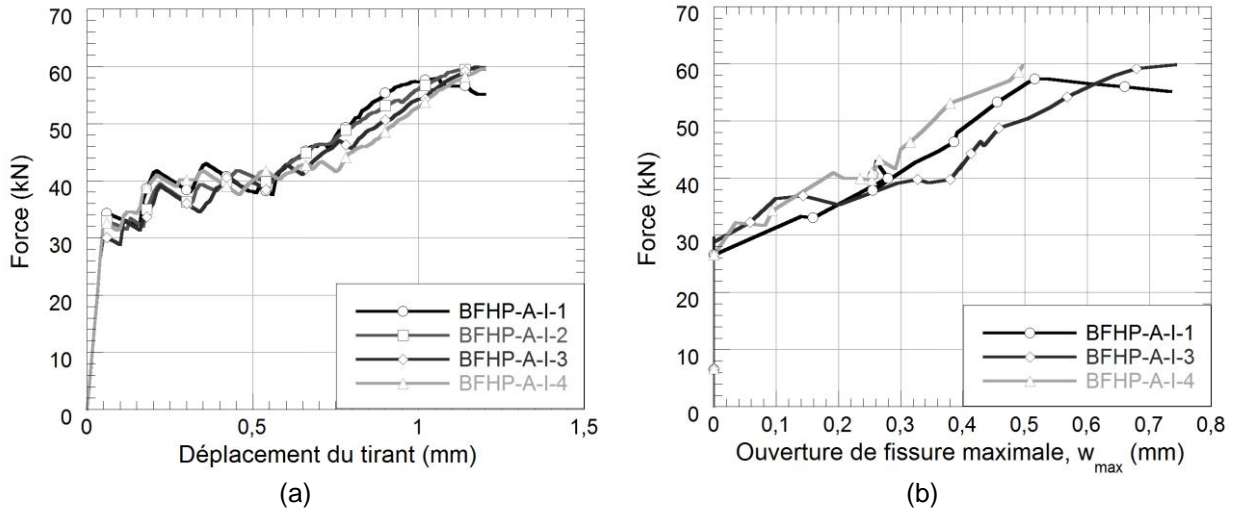


Figure 8 Comportement mécanique au sein d'une même condition d'essai (BFHP-A-I)

a) courbes force-déplacement, b) courbes force versus ouverture de fissure maximale

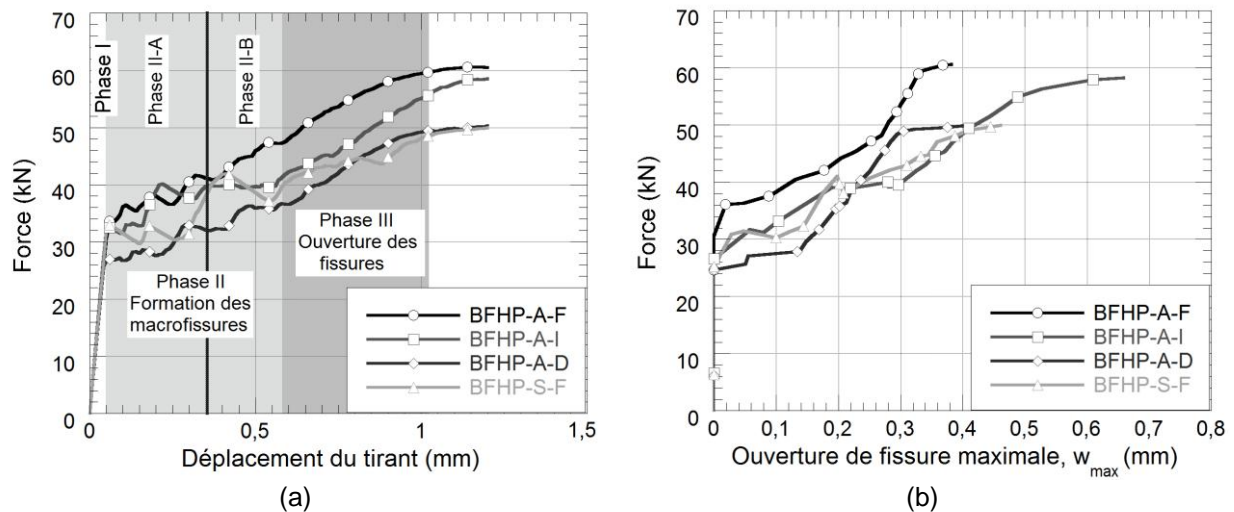


Figure 9 Comportement mécanique moyen des différentes conditions

a) courbes force-déplacement, b) courbes force versus ouverture de fissure maximale

Une fois la première macrofissure formée, d'autres macrofissures se créent dans le tirant jusqu'à un déplacement d'environ 0,6-0,7 mm (Phase II, **Figure 9a**). Durant cette phase, des chutes de force, plus marquées pour le BFHP-S que pour les BFHP-A, ont lieu à la création des nouvelles macrofissures. Au cours de la Phase II-A, les tirants en BFHP-A-D ont présenté la plus faible capacité suivis des tirants en BFHP-S-F puis de ceux en BFHP-A-I et BFHP-A-F qui ont présenté un comportement similaire. Au cours de la Phase II-B, les tirants en BFHP-A-F et BFHP-A-I se sont différenciés avec une plus grande capacité pour ceux en BFHP-A-F.

Lorsque toutes les macrofissures étaient formées (Phase III, **Figure 9a**), elles ont continué de s'ouvrir jusqu'à atteindre la plastification de la barre d'armature. Durant cette phase, la rigidité des trois BFHP-A a été assez similaire alors qu'elle était légèrement plus faible pour le BFHP-S-F et les courbes force-déplacement des tirants en BFHP-A-D et BFHP-S-F se sont rejointes. Des forces ultimes (F_{ult}) de 50, 50,3, 58,5 et 60,5 kN ont été mesurées pour les BFHP-S-F, BFHP-A-D, BFHP-A-I et BFHP-A-F respectivement.

Les valeurs minimales et maximales des forces obtenues pour les conditions BFHP-A sont illustrées à la **Figure 10a** et forment des zones distinctes entre ces conditions. Ceci confirme que la différence de

comportement mécanique dû à la différence d'orientation des fibres est significative malgré la variabilité inhérente au béton. Les conditions BFHP-S-F et BFHP-A-D ont montré des capacités et variabilités assez similaires (**Figure 10b**). En conséquence, la différence de comportement mécanique entre les tirants avec fibres d'acier ou synthétiques mis en place de manière identique (conditions BFHP-S-F et BFHP-A-F) est significative, les fibres synthétiques fournissant une plus faible contribution mécanique.

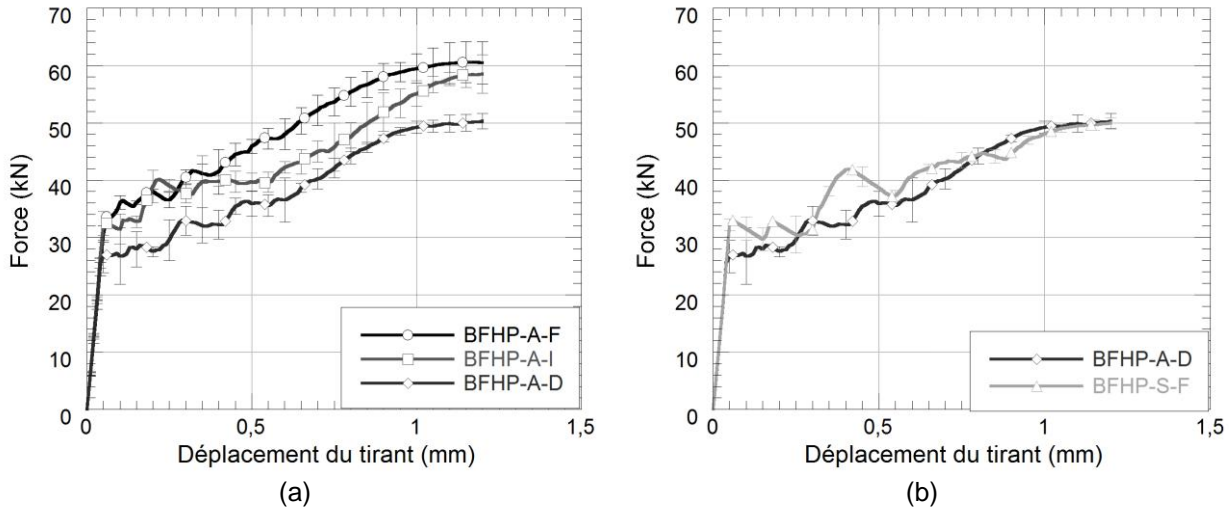


Figure 10 Courbes moyennes force-déplacement des tirants avec l'intervalle min-max
a) pour les conditions BFHP-A, b) pour les conditions BFHP-A-D et BFHP-S-F

L'évolution du patron de fissuration tout au long du chargement en traction est divisé selon les mêmes phases que celles représentées à la **Figure 9a** (Phases II-A, II-B et III) au **Tableau 5**. La séparation entre ces phases est illustrée par des différents niveaux de gris (clair à plus foncé pour les Phases II-A, II-B et III respectivement).

Tableau 5 Ouvertures de fissures (w) maximales, moyennes et nombre de fissures pour différents niveaux de force (moyennes sur 4 tirants)

Force (kN)	w_{max} (mm) (fissure principale)				w_{moy} , fissures secondaires (mm)				$(w_{moy}/w_{max}) \times 100$ (%)				Nombre moyen de fissures (-)			
	A-F	A-I	A-D	S-F	A-F	A-I	A-D	S-F	ST-F	ST-A	ST-U	SY-F	ST-F	ST-A	ST-U	SY-F
28	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	0	0	0,5	0
30	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	-	-	65	-	0	0	2,0	0
35	0,00	0,13	0,18	0,16	0,00	0,03	0,13	0,14	-	25	71	86	0,7	2,3	3,0	2,0
39	0,12	0,17	0,22	0,18	0,04	0,04	0,16	0,14	37	21	71	79	3,0	3,0	4,3	2,3
40	0,13	0,26	0,23	0,19	0,03	0,07	0,16	0,15	23	27	69	82	3,3	3,7	4,8	2,3
45	0,21	0,36	0,27	0,33	0,09	0,10	0,19	0,17	41	26	71	52	4,3	6,7	4,8	4,0
50	0,28	0,42	-	-	0,12	0,10	-	-	43	25	-	-	5,3	7,3	-	-
55	0,30	0,49	-	-	0,14	0,11	-	-	46	22	-	-	5,3	8,0	-	-
60	0,34	-	-	-	0,15	-	-	-	46	-	-	-	5,5	-	-	-
	Phase II-A		Phase II-B		Phase III											

Au cours de la Phase II-A, pour un même niveau de force, les valeurs de w_{max} , w_{moy} et le nombre moyen de fissures diminuent quand l'orientation des fibres devient plus favorable (**Figure 9b** et **Tableau 5**), ce qui est cohérent avec l'augmentation de capacité mécanique noté à la **Figure 9a**. L'utilisation de fibres synthétiques avec une orientation favorable (BFHP-S-F) induit, elle, une valeur de w_{max} et un nombre moyen de fissures assez similaires à la condition BFHP-A-I. Cependant w_{moy} est proche de la valeur de la condition BFHP-A-D.

Au cours de la Phase II-B, les valeurs de w_{max} et w_{moy} dans les tirants en BFHP-A-F restent plus faibles que pour les autres conditions pour un même niveau de force et expliquent leur comportement mécanique supérieur (**Figure 9b** et **Tableau 5**). Pour le BFHP-A-I, w_{max} augmente significativement et devient plus importante que pour les tirants en BFHP-A-D (**Figure 9b**). Cependant, les ratios w_{moy}/w_{max} du BFHP-A-I ($\approx 25\%$) sont clairement

plus faibles que pour le BFHP-A-D ($\approx 80\%$) (**Tableau 5**), ce qui signifie que l'impact mécanique des fissures secondaires, et non seulement celui de w_{max} , doit être considéré.

Au cours de la Phase III, les macrofissures principales sont formées et les pentes des courbes force- w_{max} sont assez similaires pour les 3 conditions BFHP-A avant que la force ne se stabilise (plastification de la barre d'armature) alors que cette rigidité est légèrement plus faible pour la condition BFHP-S.

3.3. Perméabilité des tirants

L'évolution du coefficient de perméabilité à l'eau (K_w) est tracée en fonction de la contrainte moyenne dans la barre d'armature (σ_s) (**Figure 11** et **Figure 12**). σ_s correspond à la contrainte moyenne mesurée sur la longueur totale de la barre d'armature et inclut l'effet global du raidissement en traction. La **Figure 11a** montre la variabilité obtenue entre les 4 tirants d'une même condition (ici BFHP-A-I) alors que la **Figure 11b** montre les courbes moyennes obtenues pour chaque condition. La **Figure 11b** est ensuite divisée en deux figures à la **Figure 12** afin d'illustrer la variabilité des résultats. La **Figure 12a** présente les valeurs minimales, moyennes et maximales de K_w pour les tirants de BFHP-A et la **Figure 12b** pour les ceux en BFHP-S-F et BFHP-A-D.

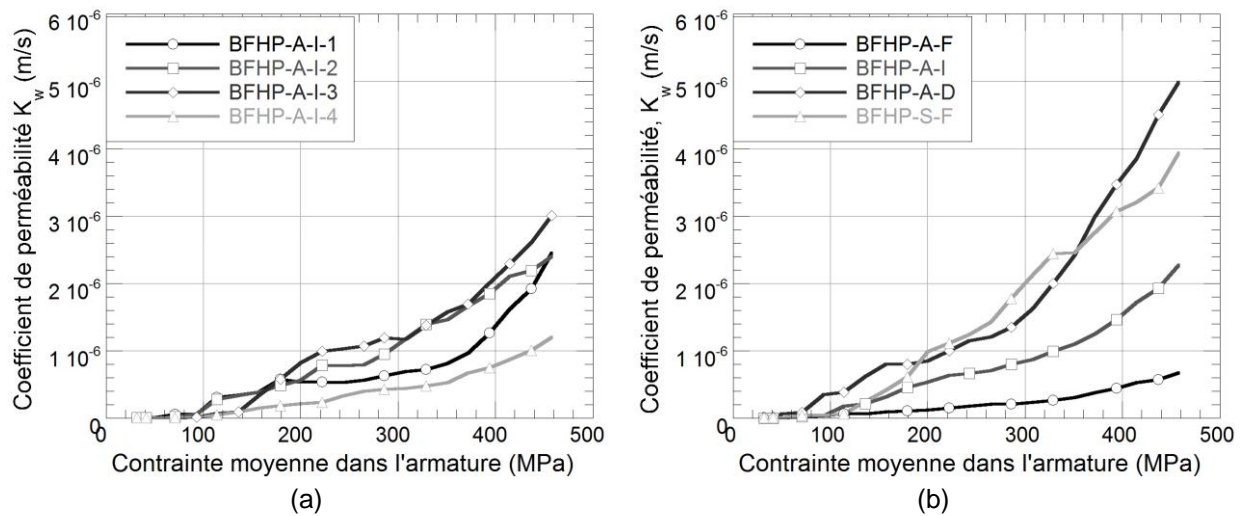


Figure 11 Courbes perméabilité en fonction de la contrainte moyenne dans l'armature (σ_s) des tirants a) au sein d'une même condition (BFHP-A-I), b) pour toutes les conditions (courbes moyennes)

Dans cette étude la perméabilité de la matrice de BFHP est d'environ 5×10^{-9} m/s et augmente dès la formation de la première macrofissure pour toutes les conditions testées pour rapidement atteindre 1×10^{-7} m/s et continue ensuite d'augmenter. Étant donné que ce projet s'intéresse à l'impact de l'orientation des fibres sur la perméabilité, les résultats de perméabilité sont illustrés en échelle linéaire de manière à mettre l'emphase sur les phases de développement et de propagation des fissures qui ont principalement lieu entre 10^{-7} et 10^{-5} m/s.

Pour un même niveau de σ_s , K_w augmente lorsque l'orientation des fibres se dégrade (**Figure 11b**). Cet effet reste significatif considérant les valeurs minimales et maximales tracées à la **Figure 12a**, même si une plus grande variabilité de K_w est observée avec l'augmentation de l'angle d'orientation. Les comparaisons de perméabilité qui suivent ont été réalisées pour des niveaux de contrainte représentatifs de structures en service (σ_s entre 100 et 300 MPa). Dans cette plage de σ_s , à niveaux de σ_s équivalents, K_w moyen est approximativement 2,1 fois plus important pour le BFHP-A-D que pour BFHP-A-I et 3,5 fois plus important pour le BFHP-A-I que pour le BFHP-A-F. Ceci résulte en une augmentation totale moyenne de K_w de 7 fois entre le BFHP-A-F et BFHP-A-D. L'utilisation de fibres synthétiques avec une orientation favorable (BFHP-S-F) a quant à elle donné lieu à une perméabilité proche de celle obtenue avec l'utilisation de fibres d'acier avec une orientation défavorable (BFHP-A-D).

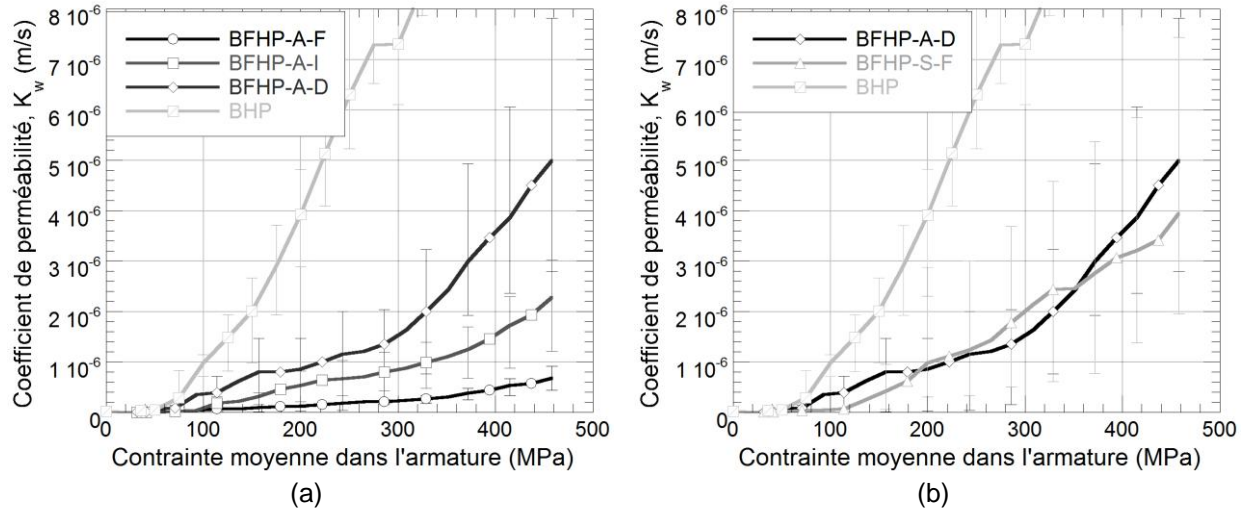


Figure 12 Courbes moyenne de perméabilité en fonction de σ_s avec l'intervalle min-max
 a) pour les conditions BFHP-A, b) pour les conditions BFHP-A-D et BFHP-S-F

La **Figure 13** illustre la relation entre K_w et l'ouverture de fissure maximale w_{max} pour trois spécimens d'une même condition (**Figure 13a**) et la moyenne des différentes conditions d'essai (**Figure 13b**). Le **Tableau 6** résume les valeurs de w_{max} , w_{moy} (pour les fissures secondaires) et le nombre moyen de fissures pour l'ensemble des conditions. Les cellules vides du **Tableau 6** correspondent à des données après la plastification de la barre d'armature, qui ne sont donc pas tracées sur la **Figure 13b**. La **Figure 13a** montre une variabilité relativement faible en comparaison à la différence observée entre les différentes conditions à la **Figure 13b**, ce qui rend la comparaison des courbes moyennes de la **Figure 13b** adéquate.

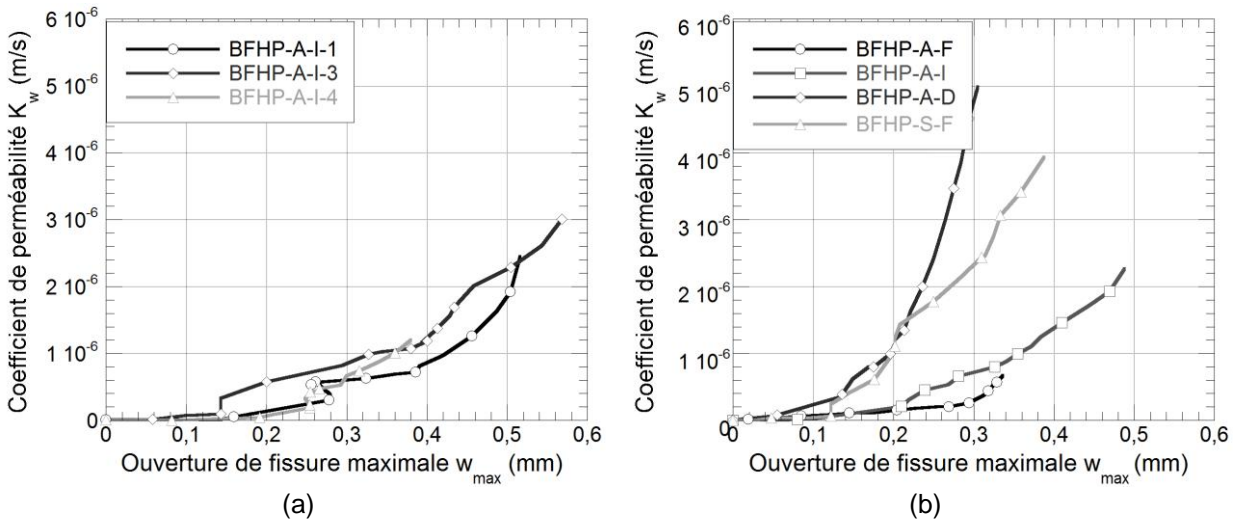


Figure 13 Courbes de perméabilité en fonction de l'ouverture de fissure maximale
 a) au sein d'une même condition (BFHP-A-I), b) pour toutes les conditions (courbes moyennes)

Pour une même valeur de w_{max} , K_w augmente globalement à mesure que l'orientation des fibres se dégrade (**Figure 13b**). Cet effet est plus marqué entre les conditions BFHP-A-I et BFHP-A-D. Ceci peut être expliqué par le fait que les tirants en BFHP-A-I ont plus de fissures et des ratios w_{moy}/w_{max} plus faibles que dans le BFHP-A-D, ce qui signifie que les fissures secondaires sont nombreuses mais plus fines amenant ainsi à une plus faible perméabilité (**Tableau 6**). Les conditions BFHP-A-F et BFHP-A-I montrent des évolutions K_w-w_{max} similaires jusqu'à w_{max} de 0,2 mm puis la perméabilité augmente de manière plus significative par la suite, pour une même valeur de w_{max} , pour une orientation intermédiaire des fibres (BFHP-A-I). En

présence de fibres synthétiques (BFHP-S-F), le comportement K_w-w_{max} est similaire à celui des BFHP-A-D jusqu'à atteindre une valeur de w_{max} d'environ 0,21 mm. Il est donc logique d'observer un nombre moyen de fissures assez similaire et des ratios w_{moy}/w_{max} autour de 70 % pour ces deux conditions (**Tableau 6**). Par la suite, K_w augmente plus rapidement pour les tirants en BFHP-A-D. Les résultats de perméabilité ne sont pas présentés en fonction de l'ouverture de fissure totale (w_{tot}) étant donné que la tendance est similaire à celle de la **Figure 11** puisque σ_s est proportionnelle à (w_{tot} + la déformation élastique).

Tableau 6 Ouvertures de fissures (w) maximales, moyennes et nombre de fissures pour différents niveaux de perméabilité (moyennes sur 4 tirants)

K_w (m/s)	w_{max} (mm) (fissure principale)				w_{moy} , fissures secondaires (mm)				$(w_{moy}/w_{max}) \times 100$ (%)				Nombre moyen de fissures (-)			
	A-F	A-I	A-D	S-F	A-F	A-I	A-D	S-F	A-F	A-I	A-D	S-F	A-F	A-I	A-D	S-F
5 E-8	0,07	0,18	0,07	0,10	0,01	0,05	0,02	0,01	9	28	37	12	1,7	2,7	1,5	1
1 E-7	0,14	0,17	0,09	0,16	0,04	0,05	0,02	0,04	32	32	27	25	3,7	2,7	1,8	1,3
4 E-7	0,31	0,24	0,16	0,20	0,15	0,08	0,05	0,06	47	34	34	29	5,3	4,3	2,5	2,3
8 E-7		0,34	0,18	0,22		0,09	0,12	0,16		28	65	72		6	3	3,3
1 E-6		0,37	0,19	0,23		0,10	0,12	0,17		27	62	73		6,3	3,5	3,3
1,5 E-6		0,45	0,22	0,26		0,11	0,15	0,15		25	68	59		7,3	4	3,7
2 E-6		0,49	0,24	0,28		0,12	0,17	0,17		25	69	59		7,7	4,5	4
3 E-6			0,28	0,40			0,18	0,25			65	62			5	4
4 E-6			0,31				0,19				63				5	
5 E-6			0,33				0,21				63				5	

4. DISCUSSION

4.1. Considérations pratiques concernant l'orientation des fibres d'acier

Malgré l'effort mis pour obtenir des orientations des fibres d'acier favorable, intermédiaire et défavorable, ces orientations (θ) ont varié entre 38,8 et 54,2° et non entre 0 et 90°. De tels résultats ont déjà été observés dans d'autres projets de recherche s'intéressant à l'orientation des fibres dans des bétons fibrés à hautes et ultra-hautes performances (Delsol et Charron, 2013; Ferrara et al., 2012; Yoo et al., 2016). La variation maximale d'orientation des fibres ici observée (d'environ 15°) donne donc un bon aperçu des limites d'orientations qui pourraient être retrouvées dans le cas de structures réelles de BRF. Ce relativement faible écart d'orientation par rapport à la gamme complète 0-90° est néanmoins associé à une importante variation du nombre de fibres à la surface de la fissure (**Tableau 4**). Cette combinaison induit un effet significatif de l'orientation des fibres sur les propriétés mécaniques et sur la durabilité tel que démontré dans cet article. Tel qu'expliqué à la **section 3.1**, moins de fibres par unité d'aire de béton ne signifie pas nécessairement un pourcentage moindre de fibres dans le volume de béton. C'est le cas dans cette étude pour laquelle le dosage en fibre de 0,75 % vol. introduit dans tous les BFHP-A a été vérifié (cf. **section 3.1**).

L'analyse des angles d'orientation moyens, du nombre total de fibres par unité de surface et des écart-types pour toutes les conditions BFHP-A a montré des tendances similaires entre ces paramètres. Lorsque l'orientation des fibres devient moins favorable (augmentation de θ de 9 puis 39 % pour les BFHP-A-I et BFHP-A-D par rapport au BFHP-A-F), le nombre de fibres par unité de surface diminue (respectivement de 17 et 39 %) et l'écart-type associé augmente (respectivement de 9 et 22 %). La diminution du nombre total de fibres par unité de surface avec la dégradation de l'orientation peut être expliquée par le fait que des fibres moins bien orientées représentent un obstacle pour le bon positionnement des fibres adjacentes dans une même section transversale des tirants. L'augmentation des écart-types à mesure que l'orientation des fibres se dégrade peut également être expliquée par l'influence des fibres adjacentes puisque l'espace entre les fibres augmente et permet donc une plus grande flexibilité dans la rotation des fibres.

4.2. Influence de l'orientation des fibres sur les propriétés mécaniques et de durabilité

L'orientation des macrofibres d'acier modifie le comportement en traction des mélanges de BFHP-A (**Figure 1**). La rigidité en fin de phase pré-pic, les capacités ultimes et les contraintes post-pic augmentent pour une orientation plus favorable, tel que déjà observé dans d'autres études (Doyon-Barbant et Charron, 2016; Ferrara, 2015). Ces résultats semblent indiquer que les macrofibres d'acier contribuent légèrement au contrôle de la formation des microfissures, fournissent des résistances plus élevées puis contribuent ensuite à la reprise mécanique dans le comportement post-pic (Rossi, 1998). Il est assez inhabituel d'observer l'impact d'un faible dosage en fibres sur le comportement pré-pic des BFHP. Une orientation défavorable des fibres (fibre perpendiculaire à l'axe de sollicitation en traction) peut créer une zone de faiblesse dans le béton et une interface fibre/matrice moins dense par rapport à l'effort de traction imposé aux tirants, résultant en une résistance en traction plus faible. Cette hypothèse, qui nécessiterait d'être validée, pourrait expliquer les observations précédentes. Étant donné que l'impact de l'orientation des fibres a été observé sur le comportement pré-pic des spécimens de caractérisation et sur les tirants, cet effet semble similaire à l'échelle du matériau et de la structure et devrait être fiable.

Ces différences de comportement pré-pic des BFHP-A ont logiquement eu un impact direct sur le comportement mécanique et la perméabilité des tirants. En effet, une orientation des fibres plus favorable a induit une force plus élevée de première fissuration (**Figure 9a**), ce qui a donc retardé l'augmentation associée de K_w (**Figure 12a**).

L'impact de l'orientation des fibres sur le comportement post-pic (contrainte-ouverture de fissure, **Figure 1b**) est également retrouvé dans le comportement à l'état fissuré des tirants en BFHP-A (**Figure 9a**). Lorsqu'une macrofissure se forme, les spécimens de caractérisation en traction de BFHP-A ont montré une chute soudaine de contrainte qui est d'autant plus marquée que l'orientation des fibres se détériore (**Figure 1b**). Cette observation est attribuée à une moins bonne efficacité des fibres à contrôler le développement de la fissure en présence d'une orientation des fibres défavorable (Delsol et Charron, 2013; Oosterlee, 2010). De plus grandes chutes de force ont également été observées à la formation de chaque macrofissure dans les tirants d'orientations moins favorables. Suite à cette soudaine diminution de contrainte, les spécimens de caractérisation en traction ont montré une phase d'écrouissage, plus marquée pour une orientation favorable des fibres, suivie par une diminution progressive de la contrainte avec l'augmentation de l'ouverture de fissure. Pour une même ouverture de fissure, la contrainte est plus faible à mesure que l'orientation des fibres se dégrade. Par suite, les capacités ultimes des tirants ont diminué pour une orientation plus défavorable.

Lorsque l'orientation des fibres se détériore dans le BFHP-A, la perméabilité à l'état fissuré augmente d'environ 7 fois en moyenne pour un même niveau de contrainte dans la gamme de 100 à 350 MPa, correspondant à un état de service de la structure (**Figure 12a**). À niveau de force équivalente, cette augmentation est d'autant plus importante avec une perméabilité environ 21 fois plus élevée pour le BFHP-A-D que pour le BFHP-A-F. Cette différence de perméabilité peut être expliquée par une plus faible contribution des fibres sur le contrôle de la fissuration lorsque leur angle d'orientation augmente. À titre d'exemple, les tirants en BFHP-A-D ont présenté plus de fissures que les tirants en BFHP-A-F avec des ouvertures de fissures maximales (w_{max}) et moyennes des fissures secondaires (w_{moy}) plus importantes (**Tableau 5**). Étant donné que K_w évolue proportionnellement au cube de l'ouverture de fissure (Hubert et al., 2015; Wang et al., 1997), plus de fissures de plus grandes ouvertures induit une augmentation de la perméabilité.

La relation entre K_w et w_{max} (**Figure 13b**) indique que w_{max} ne contrôle pas à elle seule la perméabilité et qu'il est donc important de considérer les fissures secondaires et le nombre de fissures pour une bonne compréhension de la perméabilité mesurée à l'échelle d'une structure. Un exemple qui illustre ce point est la différence de comportement K_w-w_{max} entre les tirants en BFHP-A-D et en BFHP-A-I. Pour un même niveau de K_w , la condition BFHP-A-D présente une valeur plus faible de w_{max} et moins de fissures (**Tableau 6**), ce qui devrait résulter en une perméabilité plus faible que pour le BFHP-A-I. Néanmoins, les tirants en BFHP-A-D avaient des ouvertures de fissures secondaires très proches de l'ouverture maximale (ratios w_{moy}/w_{max} d'environ 60-70 % en comparaison à 20-30 % pour les tirants en BFHP-A-I). Ainsi, chaque fissure secondaire dans les tirants en BFHP-A-D a significativement favorisé la pénétration d'eau en plus de la contribution de l'ouverture maximale, résultant en une perméabilité plus élevée pour les tirants en BFHP-A-D que pour ceux en BFHP-A-I pour une même valeur de w_{max} .

Le **Tableau 7** donne un aperçu global de l'impact de l'orientation des fibres (θ_{moy}) sur le comportement mécanique et sur la perméabilité du BFHP-A. Il indique les différences quantitatives de contrainte de traction dans les spécimens de caractérisation (f_t), de force de première fissuration ($F_{1ère\ fiss.}$), de force ultime (F_{ult}) et de perméabilité moyenne ($K_w\ moy$) des tirants en comparaison avec la condition BFHP-A-F (orientation favorable des fibres). Les plus grandes différences de f_t , $F_{1ère\ fiss.}$, F_{ult} et $K_w\ moy$ observées pour la condition BFHP-A-D (> 2.5 fois les différences observées pour le BFHP-A-I) sont cohérentes avec la plus grande différence d'orientation des fibres entre le BFHP-A-D et BFHP-A-I (39 %) qu'entre le BFHP-A-I et BFHP-A-F (9 %). Ces données montrent également que l'impact de l'orientation des fibres sur la perméabilité à l'eau des tirants (variation de 250 à 1990 %) est clairement plus significatif que sur leur comportement mécanique (variation de 2 à 33 %).

Tableau 7 Différences d'orientations des fibres, résistances et perméabilités pour les conditions testées par rapport à la condition BFHP-A-F

Bétons	θ_{moy}	f_t (MPa) cylindres	$F_{1ère\ fiss.}$ (kN) tirants	F_{ult} (kN) tirants	$K_w\ moy$ (m/s)	
					À force équivalente $35\ kN \leq F \leq 45\ kN$	À contrainte équivalente $100 \leq \sigma_s \leq 350\ MPa$
BFHP-A-F	-	-	-	-	-	-
BFHP-A-I	+ 9 %	- 7 %	- 2 %	- 3 %	+ 540 %	+ 250 %
BFHP-A-D	+ 39 %	- 33 %	- 18 %	- 17 %	+ 1990 %	+ 600 %
BFHP-S-F	N/A	- 25 %	- 1,2 %	- 17 %	+ 1750 %	+ 560 %

Un point intéressant à regarder est de savoir où se situe, en termes de perméabilité, la condition avec une orientation des fibres défavorable par rapport à un même béton non fibré (BHP). La perméabilité d'un BHP de même composition, mesurée avec la même configuration d'essai dans des projets précédents (Hubert et al., 2015), est illustrée à la **Figure 12**. Malgré l'impact significatif de l'orientation des fibres sur la perméabilité à l'eau, le BFHP-A avec la pire orientation des fibres (BFHP-A-D) et le BFHP-S restent clairement moins perméables que le BHP. Pour des contraintes équivalentes correspondant à l'état de service des structures (σ_s de 100 à 350 MPa), le BFHP-A-F et BFHP-A-D présentent une réduction de la perméabilité de 97 % et 75 % respectivement en comparaison au BHP alors que le BFHP-S présente une réduction de 77 %. Ceci confirme que dans toute situation, la pénétration d'eau et d'agents agressifs par perméabilité sera plus faible pour un BFHP que pour un BHP. Le BFHP fournit donc une durabilité accrue.

4.3. Effet du type de fibres (synthétique vs acier) sur le comportement mécanique et la perméabilité

En comparaison avec le BFHP-A mis en place avec la même technique, les spécimens de caractérisation en traction de BFHP-S ont montré une rigidité moindre à la fin de la phase pré-pic et une résistance ultime plus faible (-25 %) (**Figure 1b**). En ce qui concerne le comportement post-pic, pour des ouvertures de fissures passant de 0,1 à 0,5 mm, les contraintes ont été réduites d'approximativement 80 % pour le BFHP-S en comparaison à 40 % pour le BFHP-A. Des tendances similaires ont été obtenues par (Buratti et al., 2011; Soutsos et al., 2012) pour des fibres d'acier et synthétiques. Plusieurs études (Charron et al., 2016; Hannawi et al., 2016) indiquent que les fibres synthétiques sont moins efficaces que celles en acier pour le contrôle de la fissuration. Le volume des fibres synthétiques utilisées devrait être multiplié par 2 ou 3 pour résulter en des contraintes équivalentes en comportement post-pic (Charron et al., 2016). Ce comportement est fort probablement associé au plus faible module d'élasticité des fibres synthétiques (**Tableau 2**) qui diminue le contrôle de la fissuration. Ces différences entre fibres d'acier et fibres synthétiques ont logiquement eu des implications directes sur le comportement mécanique et sur la perméabilité des tirants.

Les forces de première fissuration et forces ultimes des tirants en BFHP-S ont été respectivement plus grandes et égales à celles obtenues pour les tirants en BFHP-A-D. De plus, la création des macrofissures a induit de plus grandes chutes de force dans les tirants en BFHP-S. Ces observations sont cohérentes avec le comportement à l'échelle du matériau observé sur les cylindres entaillés en traction.

L'évolution de la perméabilité (K_w) des tirants en BFHP-S-F en fonction de la contrainte dans l'armature (σ_s) se situe entre les conditions BFHP-A-I et BFHP-A-D, avec une tendance relativement linéaire après $\sigma_s \approx 115\ MPa$ en comparaison à une augmentation plutôt logarithmique pour les spécimens en BFHP-A (**Figure 11a**). Cette linéarité est probablement liée au comportement du matériau. En effet, le comportement en traction du BFHP-S montre une soudaine diminution de force lors de la localisation de la fissure puis les

contraintes de traction dans la phase post-pic restent relativement constantes jusqu'à une ouverture de fissure de 0,5 mm (donc pour les ouvertures de fissure retrouvées dans les tirants) alors qu'une phase d'écroutissage est observée au même moment dans les BFHP-A (**Figure 1b**).

Le comportement de K_w en fonction de w_{max} du BFHP-S-F se trouve entre ceux des BFHP-A-I et BFHP-A-D (**Figure 13b**). Encore une fois, w_{max} ne contrôle pas à elle seule la perméabilité et la considération des fissures secondaires ainsi que du nombre de fissures est importante pour expliquer les résultats.

Les différences quantitatives résumées au **Tableau 7** entre les BFHP-S-F et BFHP-A-F (mise en place similaire pour une orientation favorable) montrent clairement la plus faible efficacité des fibres synthétiques au niveau du contrôle de la fissuration (contraintes de traction plus faibles en post-pic) et au niveau de la limitation de perméabilité par rapport aux fibres d'acier. Ce plus faible impact des fibres synthétiques sur la perméabilité a également été observé par Buratti et al. (2011).

5. CONCLUSION

L'objectif général de ce projet de recherche était d'évaluer l'impact de l'orientation des fibres sur le comportement mécanique, le développement de la fissuration et la perméabilité à l'eau du béton armé sollicité en traction uniaxiale. Comme les tirants en BFHP ont été mis en place de manière à obtenir les orientations extrêmes des fibres (la meilleure et la pire), les résultats expérimentaux donnent une vue globale de la variation des propriétés mécaniques et de perméabilité à l'eau qui peut être retrouvée dans les structures en BRF. Les principales conclusions de cette étude sont :

- La procédure expérimentale utilisée permet une bonne reproductibilité des résultats au sein d'une même condition d'essai et fournit donc des comparaisons cohérentes des comportements mécaniques et de perméabilité entre les différentes conditions d'essai ;
- Lorsque l'orientation des fibres se détériore dans les BFHP-A (angles de 39 à 54° par rapport à l'axe de sollicitation en traction) dans les BFHP-A, les écart-type sur les angles d'orientation augmentent et le nombre total de fibres par unité de surface diminue de 41 % ;
- Lorsque l'orientation des fibres se détériore dans les BFHP-A (angles de 39 à 54°), la résistance en traction des spécimens de caractérisation (f_t) est réduite de 33% alors que les forces de première fissuration ($F_{1ère\ fiss.}$) et forces ultime (F_{ult}) diminuent de 18 et 17 % respectivement ;
- Lorsque l'orientation des fibres se détériore dans les BFHP-A (angles de 39 à 54°), l'augmentation de perméabilité (K_w) en condition de service atteint 1990 % à force équivalente et 600 % à contrainte équivalente dans l'armature ;
- Malgré l'impact significatif de l'orientation des fibres sur la perméabilité à l'eau, le BFHP-A-D (la pire orientation) et le BFHP-S-F restent significativement moins perméables que le même béton non fibré ;
- Pour des BFHP mis en place de la même manière, les fibres synthétiques sont moins efficaces à contrôler la fissuration à l'échelle du matériau et de la structure et à limiter la perméabilité que les fibres d'acier ;
- L'impact de l'orientation des fibres est clairement plus marqué sur la perméabilité à l'eau que sur le comportement mécanique des BFHP-A ;
- L'ouverture de fissure maximale (w_{max}) ne contrôle pas à elle seule la perméabilité. La considération des ouvertures des fissures secondaires et du nombre de fissures est nécessaire pour une bonne compréhension de la perméabilité des BFHP avec différentes orientations des fibres.

6. REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été financé par le Fond de Recherche du Québec – Nature et Technologie (FRQNT) 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

- Aldea, C. M., Ghandehari, M., Shah, S. P., et Karr, A. (2000) Estimation of water flow through cracked concrete under load, *ACI Material Journal* 97 (5): 567-575.
- ASTM-A615/A615M-16 (2016) *Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM-C39/C39M-15a (2015) *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM-C1611/C1611M-14 (2014) *Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Buratti, N., Mazzotti, C., et Savoia, M. (2011) Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes, *Construction and Building Materials* 25 (5): 2713-2722.
- Charron, J. P., Desmettre, C., et Androuët, C. (2016) *Utilisation de béton renforcé de fibres (BRF) pour les glissières en béton pour chantier (GBC)*, RAPPORT ST15-06, Montréal, Qc, Canada.
- Claisse, P. (2008) Book review, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials* 161 (3): 135-135.
- Delsol, S., et Charron, J.-P. (2013). *Numerical modeling of uhpfrc mechanical behavior based on fibre orientation*, RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC 2013, Marseille, France.
- Desmettre, C., et Charron, J.-P. (2011) Novel water permeability device for reinforced concrete, *Materials and Structures* 44 (9): 1713-1723.
- Desmettre, C., et Charron, J.-P. (2012) Water permeability of reinforced concrete with and without fiber subjected to static and constant tensile loading, *Cement and Concrete Research* 42 (7): 945-952.
- Doyon-Barbant, J., et Charron, J. (2016). *Influence de l'orientation des fibres sur le comportement mécanique des BRF*. Maitrise, Ecole Polytechnique de Montréal.
- Ferrara, L. (2015) Tailoring the orientation of fibres in high performance fibre reinforced cementitious composites: Part 1 - experimental evidence, monitoring and prediction, *International Journal of Materials and Structural Integrity* 9 (1-3): 72-91.
- Ferrara, L., Caverzan, A., Muhaxheri, M., et Di Prisco, M. (2012). *Identification of tensile behaviour of SFR-SCC : direct vs indirect tests*, BEFIB2012, Department of Structural Engineering, Politecnico di Milano
- Ferrara, L., Ozyurt, N., et di Prisco, M. (2011) High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: the role of "casting-flow induced" fibre orientation, *Materials and Structures* 44 (1): 109-128.
- Hannawi, K., Bian, H., Prince-Agbodjan, W., et Raghavan, B. (2016) Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes, *Composites Part B-Engineering* 86: 214-220.
- 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.
- Hubert, M., Desmettre, C., et Charron, J. P. (2015) Influence of fiber content and reinforcement ratio on the water permeability of reinforced concrete, *Materials and Structures* 48 (9): 2795-2807.
- Lawler, J. S., Zampini, D., et Shah, S. P. (2002) Permeability of cracked hybrid fiber-reinforced mortar under load, *ACI Materials Journal* 99 (4): 379-385.
- Lawler, J. S., Zampini, D., et Shah, S. P. (2005) Microfiber and macrofiber hybrid fiber-reinforced concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering* 17 (5): 595-604.
- Martinie, L., et Roussel, N. (2011) Simple tools for fiber orientation prediction in industrial practice, *Cement and Concrete Research* 41 (10): 993-1000.
- Mehta, P. K. (1991). Durability of Concrete - 50 Years of Progress *Proceedings of the 2nd International Conference on Durability of Concrete* (Vol. 1 et 2, pp. 1-31).
- Mlekusch, B. (1999) Thermoelastic properties of short-fibre-reinforced thermoplastics, *Composites Science and Technology* 59 (6): 911-923.
- Neville, A. (1995) Chloride Attack of Reinforced-Concrete - an Overview, *Materials and Structures* 28 (176): 63-70.
- Oesterlee, C. (2010). *Structural Response of Reinforced UHPFRC and RC Composite Members*. Ph. D., École Polytechnique de Lausanne, Lausanne, Suisse.
- Picandet, V., Khelidj, A., et Bellegou, H. (2009) Crack effects on gas and water permeability of concretes, *Cement and Concrete Research* 39 (6): 537-547.

- Rapoport, J., Aldea, C. M., Shah, S. P., 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, *Materials and Structures* 36 (262): 560-567.
- Rossi, P. (1998). *Les bétons de fibres métalliques*, Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées. Paris.
- Song, H.-W., et Kwon, S.-J. (2007) Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure, *Cement and Concrete Research* 37 (6): 909-915.
- Soutsos, M. N., Le, T. T., et Lampropoulos, A. P. (2012) Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres, *Construction and Building Materials* 36: 704-710.
- 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.
- Wuest, J., Denarie, E., Bruhwiler, E., Tamarit, L., Kocher, M., et Gallucci, E. (2009) Tomography Analysis of Fiber Distribution and Orientation in Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Composites with High-Fiber Dosages, *Experimental Techniques* 33 (5): 50-55.
- Yoo, D.-Y., Kang, S.-T., et Yoon, Y.-S. (2016) Enhancing the flexural performance of ultra-high-performance concrete using long steel fibers, *Composite Structures* 147: 220-230.

MERCI À NOS PRÉCIEUX COMMANDITAIRES



UNIVERSITÉ
LAVAL

Faculté des sciences et de génie
Département de génie civil
et de génie des eaux



Centre de recherche sur les
infrastructures en béton

Québec 



LA référence



Association
Canadienne
du Ciment



QUEBEC &
E. ONTARIO



www.bm-underground.com



Ciment Québec



EUCLID CANADA



INTERNATIONAL
CONCRETE REPAIR
INSTITUTE

SECTION
du Québec



LAFARGE