

Douai, France  
03-04 juillet 2014

## Propagation d'une macrofissure dans un béton renforcé de fibres sous charge soutenue

D. Daviau-Desnoyers<sup>1,2</sup>, J.-P. Charron<sup>1</sup>, B. Massicotte<sup>1</sup>, P. Rossi<sup>2</sup>, J.-L. Tailhan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CRIB, École Polytechnique de Montréal, Québec, Canada

<sup>2</sup> IFSTTAR – Université Paris-Est, Marseille, France

**RÉSUMÉ** : L'utilisation des bétons renforcés de fibres (BRF) dans des applications, résultat direct du progrès de la recherche, est encadrée par des recommandations nationales et internationales. Bien que ces recommandations soient fiables pour la conception d'éléments structuraux sollicités en flexion à l'état limite ultime, elles restent imprécises pour la conception à l'état limite de service et l'évaluation des ouvertures de fissures. De plus, elles reconnaissent l'importance des effets différés sans toutefois proposer de formules prédictives pour en tenir compte dans le dimensionnement.

Il existe très peu d'informations l'évolution de la fissuration dans une application en BRF soumise à une charge en flexion soutenue sont actuellement disponibles, et encore moins concernant les mécanismes physiques en cause menant à la rupture. Afin de remédier à ce problème, une étude expérimentale et numérique sur l'évolution de la fissuration dans des poutres en BRF de 0.7 m, 4 m, et 8 m de longueur soumises une charge soutenue est en cours de réalisation. Le présent article décrit la campagne d'essais de fluage flexionnel sur les poutres de petite taille, soit de 0.7 m. Les résultats montrent que la propagation d'une macrofissure est à l'origine d'une partie du fluage et gouverne la rupture des spécimens de BRF maintenus à de hauts niveaux de chargement.

### 1. INTRODUCTION

Le comportement mécanique des bétons renforcés de fibres (BRF) d'acier a largement été étudié au cours des trois dernières décennies. Ces études portaient principalement sur la formulation et la caractérisation du matériau lui-même, et ont conduit à la création de recommandations, de type normative, nationales et internationales pour la conception de structures (RILEM 2001, FIB 2010). Ainsi, il est maintenant reconnu dans la communauté scientifique que les BRF améliorent considérablement le comportement post-fissuration et la durabilité d'un élément structurel, plus précisément en termes de contrôle de la fissuration et de perméabilité (Hubert *et al.* 2014).

Au cours de la vie utile d'un élément structurel en béton, les charges appliquées peuvent conduire à la création de macrofissures. En raison de la capacité des BRF à résister aux contraintes après la formation d'une macrofissure, les macrofissures ne compromettent pas automatiquement l'intégrité structurale. En dépit de cela, les ouvertures de fissures créées par l'application d'une charge soutenue devraient être limitées à une ouverture limite pour préserver la durabilité de l'élément. De ce fait, la propagation et l'élargissement des ouvertures de fissures provoqués par une charge soutenue devront être prédits plus précisément dans les prochaines recommandations afin de préserver les avantages de durabilité des BRF.

Granju *et al.* (2000) furent les premiers à s'intéresser à l'évolution de la fissuration des BRF sous charge soutenue. Les auteurs ont effectué une série d'essais expérimentaux de fluage flexionnel sur des poutres entaillées. Dans une première étape, ces poutres ont été pré-fissurées jusqu'à une ouverture de fissure égale à 0.3 mm. Par la suite, une charge soutenue correspondant à 60% de la charge requise pour pré-fissurer les poutres a été appliquée et maintenue pendant 12 mois. Les auteurs ont conclu que le fluage se stabilise après six mois, donc tend vers une asymptote, et que le fluage ne modifie pas le comportement post-fissuration. Plus tard, les travaux de Bernard (2004) ont montré que le fluage du BRF en condition fissurée n'est pas dû à la déformation des fibres. L'auteur a conclu que la charge soutenue a mené à l'arrachement des fibres de la matrice et conduit à la rupture. Cette même conclusion a également été constatée par MacKay et Trottier (2004) lors d'une étude visant à comparer le comportement différé flexionnel de poutres en BRF d'acier et synthétiques. De plus, MacKay et Trottier ont noté que le fluage flexionnel en condition fissurée se stabilise lorsque la charge soutenue ne dépasse pas 60% de la résistance résiduelle de la poutre. Dans une étude exhaustive, Barragan et Zerbino (2008, 2012) ont effectué des essais de fluage flexionnel à différents niveaux de pré-fissuration, variant de 0.19 mm à 3.54 mm, et de chargement, variant de 46 % à 156 %. Les résultats montrent que le fluage flexionnel mène à la rupture des spécimens pré-fissurés à des ouvertures supérieures ou égales à 0.5 mm. De plus, les auteurs ont conclu que le fluage se stabilise lorsque la vitesse d'ouverture de fissure est inférieure à  $0.2 \mu\text{m/h} \cdot \text{MPa}$  lors des premiers mois sous charge soutenue. Il est important de noter que dans cette étude un seul spécimen a présenté une réponse de fluage en trois étapes, primaire, secondaire, et tertiaire, alors que tous les autres spécimens ont cassé soit lors du chargement initial, soit lors d'un cycle de déchargement-charge effectué pour remplacer un spécimen ayant rompu dans un empilement de spécimens, soit après l'augmentation du niveau de chargement. Par conséquent, la rupture du BRF sous charge soutenue est donc fortement liée à l'application de la charge en soit. Finalement, dans une étude expérimentale portant sur les sources du fluage en traction des BRF et l'arrachement de fibres, Boshoff *et al.* (2009) ont conclu que les fibres ne fluent pas, et que l'arrachement des fibres est la cause de la rupture des spécimens de BRF sous charge soutenue. Dans ces essais, toutes les fibres ont été arrachées en moins de 70 heures sous une charge soutenue inférieure à 50 % de la résistance en cisaillement de l'interface fibre-matrice.

Parmi ces études, peu d'informations concernant l'évolution de la fissuration pendant un essai de fluage flexionnel sont actuellement disponibles, et encore moins concernant les mécanismes physiques en cause. Par conséquent, des études supplémentaires sur le comportement différé des BRF en condition fissurée sont essentielles pour permettre une meilleure compréhension des mécanismes, et éventuellement incorporer le comportement différé des BRF au sein de modèles numériques. Afin de remédier à ce problème, une étude expérimentale et numérique sur l'évolution de la fissuration dans des poutres en BRF de 0.7 m, 4 m, et 8 m de longueur soumis à un chargement soutenu est en cours de réalisation. Le présent article décrit la campagne d'essais sur les poutres de petite taille, soit de 0.6 m. Les résultats montrent que la propagation de la macrofissure est à l'origine d'une partie fluage et gouverne la rupture des poutres de BRF maintenues à de hauts niveaux de chargement.

## **2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL**

Afin d'étudier le comportement différé les mécanismes menant à la rupture des BRF, un premier programme expérimental de fluage flexionnel sur des poutres de petite taille en BRF a été réalisé. Les objectifs de ce programme étaient d'évaluer la propagation et l'ouverture d'une macrofissure, et l'évolution de l'endommagement. Ce programme expérimental incluait des essais de fluage flexionnel sur des poutres pré-fissurées, en plus d'essais de caractérisation à 28 jours tels que des essais de résistance à la compression et à la traction uniaxiale, et de résistance en flexion 4-points.

### **2.1 Matériaux**

Un béton renforcé de fibres ayant une résistance nominale à la compression de 70 MPa à 28 jours a été utilisé. Ce mélange contenait  $80 \text{ kg/m}^3$ , 1%-volume, de fibres d'acier Dramix ZP-305. Ces fibres ont un diamètre de 0.55 mm et d'une longueur de 30 mm, donnant un rapport L/D égal à 55. Les composantes du mélange sont résumées dans le Tableau 1.

**Tableau 1 : Composition du BRF**

<b>Composante</b>	<b>Masse, kg/m<sup>3</sup></b>
Ciment GUb-SF (HSF)	650
Sable	843
Pierre (2.5-10 mm)	622
Fibres	78
Superplastifiant	38.4
Eau	195

Tous les spécimens ont été démoulés après 24 heures, et placés en cure humide pendant sept jours. Une fois la cure humide terminée, les spécimens ont été placés dans une chambre environnementale contrôlée à  $50 \pm 5$  % d'humidité relative et à  $23 \pm 2$  °C pendant 6 mois. Cette longue période de cure a permis de minimiser les effets du durcissement du béton qui aurait pu survenir pendant les essais de fluage flexionnel.

Pour caractériser le matériau, plusieurs spécimens ont été coulés lors d'une première gâchée : six poutres de 225 x 75 x 700 mm, six cylindres de 102 mm de diamètre et 203 mm de hauteur, et six spécimens de traction directe, en forme d'os. Les poutres et les os de traction ont été entaillés de manière à réduire de 20% la section et assurer la localisation d'une seule microfissure lors des essais. Les propriétés mécaniques en traction, en compression et en flexion mesurées en laboratoire à 28 jours sont résumées dans le Tableau 2.

**Tableau 2 : Propriétés mécaniques du BRF à 28 jours**

	Résistance traction $f_T$ , MPa	Résistance compression $f_c$ , MPa	Module de rupture en flexion (kN)	Module de Young E, MPa	Coefficient de Poisson, $\nu$
Moyenne	4.31	75.7	41.8	35800	0.234
Écart-type	0.28	8.30	5.73	1340	0.017

## 2.2 Spécimens des essais de fluage flexionnel

Les spécimens des essais de fluage flexionnel sont des poutrelles avec une entaille à mi-portée. Celles-ci ont été coulées lors de coulées subséquentes. Une entaille de 37.5 mm de hauteur a été réalisée à 28 jours d'un seul trait de scie de 3.18 mm de largeur. De cette manière, l'orientation préférentielle des fibres suivant la direction de l'écoulement fut préservée. Les dimensions des poutrelles ont été choisies pour représenter une tranche de la section inférieure d'une poutre NEBT, couramment utilisée en Amérique du Nord. Cette poutre sera ultérieurement envisagée pour une application de précontrainte partielle avec BRF, c'est-à-dire une poutre partiellement fissurée en service soumise à des charges soutenues et cyclique.

Une cure humide identique à celle des spécimens de caractérisation a été effectuée pour les poutrelles des essais de fluage flexionnel. Les poutrelles prévues pour les essais en condition endogène ont quant à elles été scellées à l'aide d'un époxy à base de silane après les 7 jours de cure humide, et ont ensuite été placés dans la salle environnementale. Le scellement permet d'empêcher tout échange hydrique entre les spécimens et l'environnement.

## 2.3 Procédure des essais de fluage flexionnel

Les montages de pré-fissuration et de fluage flexionnel, et l'instrumentation utilisée lors de ces essais sont présentés sur les Figures 1 et 2. Ces figures montrent les conditions d'appuis utilisées pour les essais de flexion 4-points, soit trois appuis de type rouleau-rotule et un appui de type rotule placé à l'un des deux points de chargement. Il est à noter que le montage utilisé pour les essais de caractérisation statiques est identique au montage de pré-fissuration.

Six essais statiques de flexion 4-points, avec une portée de 200 mm entre les points de chargement et une portée entre appuis de 600 mm ont été réalisés à 28 jours pour caractériser le comportement flexionnel statique et la variabilité des résultats de cette étude. Les spécimens ont été chargés à l'aide d'un vérin hydraulique MTS de 240 kN, contrôlé en moyenne de déplacement. La flèche et l'ouverture de fissure ont été mesurées de chaque côté des spécimens (Figure 1).

Suivant la procédure proposée par Granju *et al.* (2000), les essais de fluage flexionnel ont été divisés en trois phases (Figure 3), pour lesquelles la flèche et l'ouverture de fissure ont été mesurées de chaque côté des spécimens (Figures 1 et 2). Lors de la première étape, les spécimens ont été pré-fissurés à l'aide du vérin de 240 kN jusqu'à une ouverture de fissure moyenne  $w_0$  spécifiée (Figure 1). L'utilisation d'un contrôleur servo-hydraulique a permis d'imposer une vitesse de chargement constante de 0.2 mm/min et de contrôler précisément le critère d'ouverture de fissure moyenne marquant le début du déchargement, réalisé à la même vitesse. La charge mesurée pour  $w_0$  est appelée  $P_0$ , et est utilisée comme valeur de référence pour déterminer le niveau de charge maintenue de l'essai de fluage flexionnel subséquent. Une fois le spécimen complètement déchargé du montage de pré-fissuration, la deuxième étape a consisté à transférer le spécimen dans le montage de fluage flexionnel (Figure 2). Une fois le transfert effectué, les spécimens ont été chargés à un niveau de chargement  $P_S$  correspondant à un pourcentage de la charge  $P_0$ . La charge a été mesurée par une cellule de charge de 222 kN calibrée pour des charges allant de 0 à 50 kN.



Figure 1 : Montage de pré-fissuration



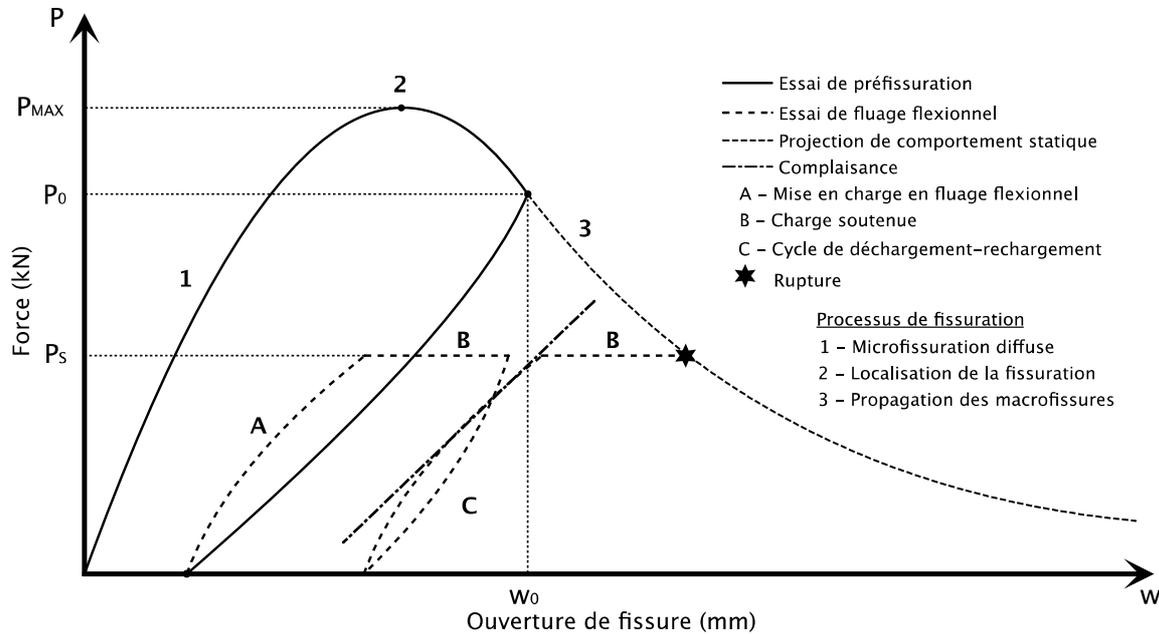
Figure 2 : Montage de fluage flexionnel

Finalement, des cycles de déchargement-rechargement ont été effectués tous les sept jours afin d'évaluer l'évolution de la complaisance élastique des poutrelles. En mécanique de la rupture traditionnelle, la complaisance d'un spécimen est une fonction de la profondeur du plan de fissuration principal. Ainsi, pour les matériaux quasi-fragiles, l'utilisation de cette technique permet d'évaluer l'évolution de l'endommagement d'un spécimen. Cette étape de la procédure expérimentale a été inspirée d'une étude similaire réalisée sur un béton ordinaire (Rossi *et al.* 2014).

La Figure 3 illustre une courbe typique de force-ouverture de fissure décrivant un essai, soit la phase de pré-fissuration (trait plein), l'application de la charge de fluage flexionnel (A), les paliers de chargement maintenu (B), et les cycles de déchargement-rechargement (C). Tous les essais ont été menés jusqu'à rupture. Sur cette même figure, la projection du comportement statique des essais de caractérisation en flexion 4-points à partir du point de déchargement de l'essai de pré-fissuration est représentée par un trait pointillé fin, alors que la complaisance est représentée par un trait pointillé en caractère gras.

De plus, la Figure 3 présente un bref rappel du processus de fissuration des BRF. Lors d'un essai statique en flexion 4-points, illustré par un trait continu et ensuite pointillé sur la Figure 3, trois phases de fissuration surviennent. La première phase consiste à la création de microfissures diffuses au sein du matériau (1). Ces microfissures résultent de l'hétérogénéité du matériau, et donc à la présence de

défauts au sein du matériau. La seconde phase consiste à la localisation de la fissuration. Lors de cette phase, les microfissures s'unissent en une ou plusieurs macrofissures (2). Cette phase est appelée la localisation. À partir de cet instant, le comportement doit être qualifié de comportement structural puisque la localisation affecte le matériau à l'échelle du spécimen et non du matériau. Finalement, la troisième phase consiste à la propagation de la ou des macrofissures, et est responsable du comportement adoucissant des BRF (3).



### 2.3 Conditions d'essais de fluage flexionnel

Les conditions d'essais étudiées sont présentées dans le Tableau 3. Afin d'identifier les spécimens facilement, la lettre « D » indique que les spécimens étaient dans des conditions de séchage, alors que la lettre « S » indique que le spécimen était scellé pour empêcher tout échange hydrique avec son environnement.

L'historique de chargement, décrit à la Figure 3, a été défini suite à la réalisation d'un essai préliminaire sur le spécimen D1, fissuré à 0.7 mm puis chargé à un niveau de chargement égal ou supérieur à chaque période de 7 jours jusqu'à la rupture. Les spécimens D1, D3, D4, et S4 ont été pré-fissurés à une ouverture de fissure moyenne de 0.7 mm, alors que le spécimen D2 a été pré-fissuré à une ouverture de fissure moyenne de 0.5 mm. Ces deux niveaux de pré-fissuration ont été choisis dans le but de favoriser la propagation de la fissuration suite à la revue de littérature présentée précédemment, plus précisément suite aux travaux de Zerbino *et al.* (2012) dans lesquels il a été observé que le fluage flexionnel mène à la rupture de tous spécimens pré-fissurés à des ouvertures supérieures ou égales à 0.5 mm. Par ailleurs, les spécimens D1, D2, et D3 ont été chargés à 45, 60, et 85 % de leur  $P_0$  respectif pendant un minimum de 14 jours. Leurs niveaux de chargement respectifs ont ensuite été augmentés progressivement tous les 7 jours jusqu'à ce que les spécimens rompent. Quant aux spécimens D4 et S4, un historique de chargement identique leur a été appliqué afin de comparer l'influence des conditions hydriques sur la propagation de la fissuration sous charge soutenue. Les autres informations présentées dans le Tableau 3 sont des résultats d'essais. Ils seront présentés et analysés à la section suivante.

**Tableau 3 : Conditions d'essais et résultats expérimentaux**

Spécimens	Pré-fissuration			Charge soutenue							
	Pré-fissure (mm)	Flèche résiduelle (mm)	Ouverture de fissure résiduelle (mm)	Temps (jours)	Niveau de chargement (%P <sub>0</sub> )	Vitesse secondaire de flèche (um/h)	Vitesse secondaire d'ouverture (um/h)	Vitesse secondaire de flèche par unité de force (um/h)	Vitesse secondaire d'ouverture par unité de force (um/h)	Complaisance (mm/kN)	Vitesse de complaisance par unité de force (mm/kN/hours/F x 1e6)
D1	0.7	0.24	0.33	0-7	45	0.0675	0.0459	0.0633	0.0431	4.777	7.170
				7-14	45	0.0255	0.0298	0.0240	0.0280	6.061	1.468
				14-21	45	0.0214	0.0173	0.0200	0.0162	6.324	-0.176
				21-28	53	0.0277	0.0201	0.0307	0.0222	6.292	4.520
				28-35	60	0.0260	0.0247	0.0326	0.0309	6.979	1.104
				35-42	76	0.0714	0.0630	0.1131	0.0998	7.128	2.826
				42-49	85	0.0754	0.1597	0.1337	0.2830	7.427	2.060
				49-						7.623	
D2	0.5	0.17	0.22	0-7	60	0.0331	0.0507	0.0471	0.0722	5.649	2.920
				7-14	60	0.0450	0.0455	0.0640	0.0648	5.993	4.026
				14-21	75	0.0988	0.1069	0.1757	0.1521	6.469	0.962
				21-28	75	0.0453	0.0615	0.0806	0.0875	6.560	4.668
				28-32	90	0.2079	0.7296			7.000	
D3	0.7	0.29	0.34	0-7	85	0.1942	0.2839	0.3598	0.5260	8.001	6.227
				7-14	85	0.4315	0.3905	0.7994	0.7235	8.565	9.091
				14-					9.390		
D4	0.7	0.24	0.35	0-7	60	0.0439	0.0986	0.0711	0.1597	6.212	17.937
				7-14	75	0.2341	0.1622	0.4739	0.2627	8.073	7.979
				14-					8.735		
S4	0.7	0.22	0.34	0-7	60	0.1046	0.0311	0.1194	0.0355	4.823	7.753
				7-14	75	0.1366	0.1165	0.1949	0.1330	5.964	0.152
				14-21	90	0.9538	1.0574	1.6330	1.2069	5.982	11.843
				21-					7.144		

### 3. RÉSULTATS ET ANALYSE

Les courbes force-déplacement, la courbe moyenne et les intervalles de confiance minimum et maximum des essais de caractérisation statiques en flexion 4-points sont présentés à la Figure 4. Cette figure montre qu'il existe deux familles de réponses en flexion 4-points. Puisque la procédure, les conditions limites, et la vitesse de chargement sont identiques pour tous les essais, seules la distribution spatiale des fibres et l'hétérogénéité de la matrice peuvent expliquer principalement ces deux groupes distincts de réponses. Cette observation rappelle l'importance de l'optimisation du mélange et du procédé de mise en place des BRF.

La Figure 5 illustre une courbe force-déplacement type obtenue lors d'un l'essai de fluage flexionnel. Il s'agit des résultats obtenus pour le spécimen D2. La projection de la courbe force-déplacement moyenne et de l'intervalle de confiance minimum des essais statiques de flexion 4-points ont également été tracés sur la Figure 5. La projection de la courbe moyenne et de l'intervalle de confiance minimum débute au point [P<sub>0</sub>,w<sub>0</sub>], soit le moment qui correspond au déchargement du spécimen lors de l'essai de pré-fissuration, après que l'ouverture de fissure visée pour l'essai ait été atteinte. Les résultats, tels que présentés sur la Figure 5, montrent que le spécimen D2 rompt lorsque sa flèche atteint la projection de l'intervalle de confiance minimum du comportement statique.

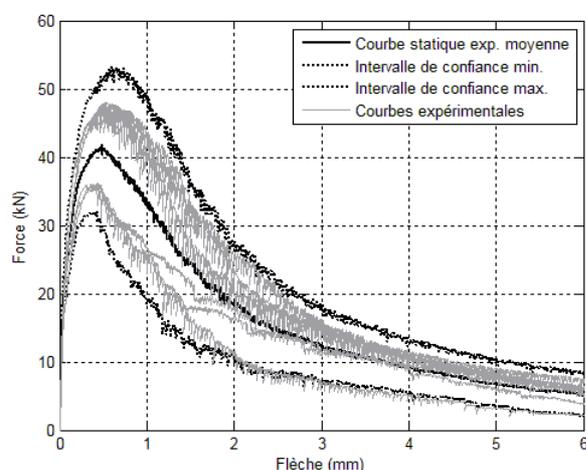


Figure 4 : Réponses statiques flexion 4-points

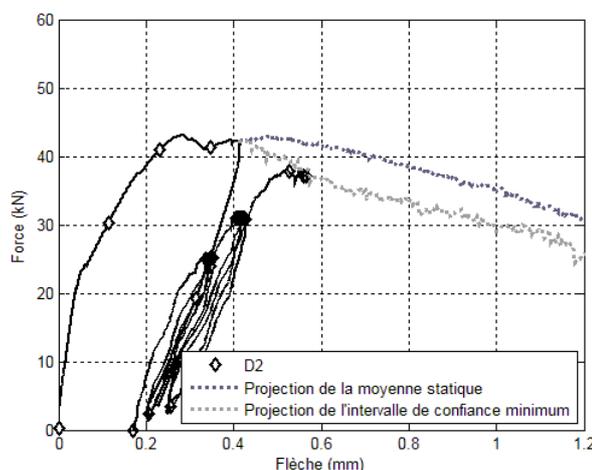


Figure 5 : Courbe force-déplacement type (spécimen D2)

De manière générale, tous les essais ont rompu lorsque leur flèche respective a atteint la projection de la courbe force-flèche statique moyenne ou de l'intervalle de confiance minimum du comportement statique, indépendamment des ouvertures initiales créées lors de la pré-fissuration (0.5 mm ou 0.7 mm) ou de l'historique de chargement.

Les Figures 6 et 7 présentent respectivement les courbes flèche-temps et ouverture de fissure-temps pour tous les spécimens. Pour l'intervalle de 0 à 14 jours, elles montrent une nette augmentation de la flèche et de l'ouverture de fissure suite aux cycles de déchargement-rechargement effectués lors du 7<sup>e</sup> jour entrecoupant les deux paliers de chargement identiques à un niveau supérieur à 45%, pour les poutres D2, D3, D4 et S4. Ces sauts marqués de flèche et d'ouverture de fissure ont aussi été notés par Zerbino *et al.* (2012). À l'inverse, aucune augmentation n'apparaît sur la poutre D1 pour des niveaux inférieurs à ce seuil. Cette limite de 45% du niveau de chargement est cohérente aux observations faites par Granju *et al.* (2000) qui ont noté que le niveau de chargement critique menant à la dégradation d'un spécimen sollicité en fatigue est de 50%.

De plus, ces deux mêmes figures ont permis de calculer les vitesses secondaires de flèche et d'ouverture de fissure lors des paliers de chargement. Les vitesses secondaires, présentées au Tableau 3, ont été calculées pour l'intervalle de temps correspondant à la partie linéaire de chacun des paliers de chargement. Pour ce faire, une fonction mathématique reproduisant au mieux la courbe expérimentale a été définie à chacun des paliers de chargement. À partir de ces fonctions, un intervalle de temps pour lequel la dérivée seconde s'approche de zéro a été choisi. L'utilisation de la dérivée seconde permet de déterminer avec précision la partie linéaire de chacun des paliers de chargement pour ensuite calculer les vitesses secondaires de flèche et d'ouverture de fissure.

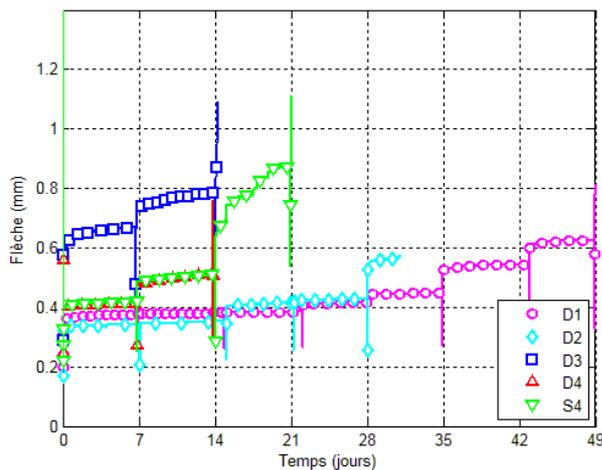


Figure 6 : Courbes flèche-temps

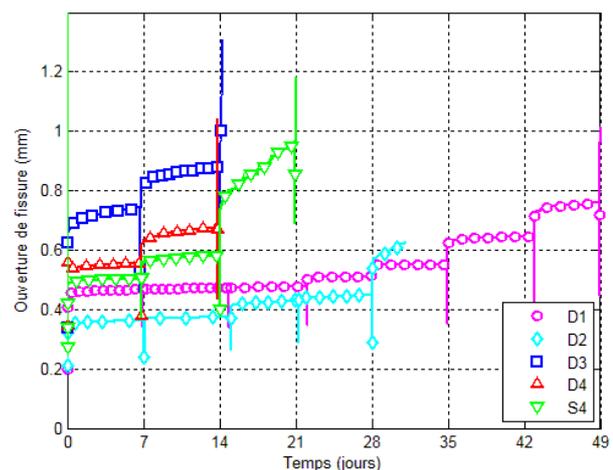


Figure 7 : Courbes ouverture-temps

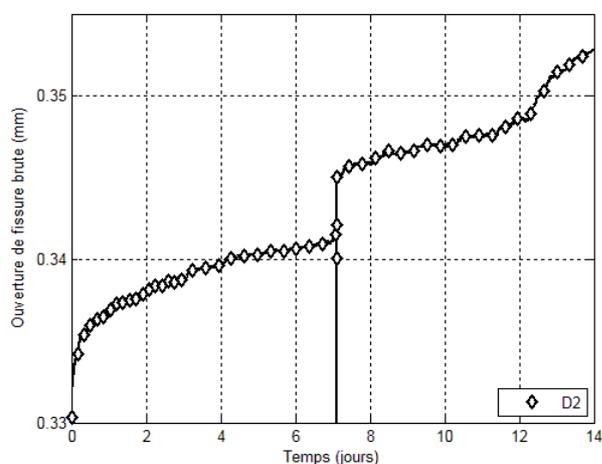
En ce qui concerne l'influence des conditions hydriques, les poutrelles D4 et S4 soumises à un historique de chargement identique suivent tous deux les constatations formulées précédemment. Tel qu'illustré sur la Figure 6, l'amplitude et l'évolution de la flèche dans le temps sont comparables pour les deux spécimens (courbes superposées). Cependant, l'amplitude des ouvertures de fissure semble être plus faible pour le spécimen scellé (Figure 7). Ceci peut s'expliquer par l'hypothèse suivante : l'humidité interne du spécimen scellé étant plus grande que le spécimen séchant, il est raisonnable de croire que le gradient hydrique du spécimen scellé, qui résulte de la différence entre son taux d'humidité interne et l'humidité relative dans la fissure, est moins élevé que pour le spécimen séchant. De ce fait, un gradient moins élevé engendre des contraintes en pointe de fissure plus faibles, et donc une ouverture de fissure plus faible. Néanmoins, plus de données expérimentales seraient nécessaires pour comparer adéquatement l'influence des conditions environnementales sur la propagation de la fissuration sous charge soutenue.

Extrait de la Figure 7, la Figure 8 présente la courbe d'ouverture de fissure brute en fonction du temps du spécimen D2 pour l'intervalle de temps de 0 à 14 jours. Cet intervalle de temps inclut deux paliers de chargement soutenus à 60%, de 0 à 7 jours et de 7 à 14 jours, entrecoupés par un cycle de déchargement-rechargement à 7 jours. L'ouverture brute enregistrée par les LVDTs inclut l'ouverture de fissure liée au chargement jusqu'au niveau souhaité. Ceci explique que l'ouverture de fissure au temps  $t=0$  soit égale à 0.33 mm. Cette figure montre une forte augmentation non-linéaire de l'ouverture de fissure

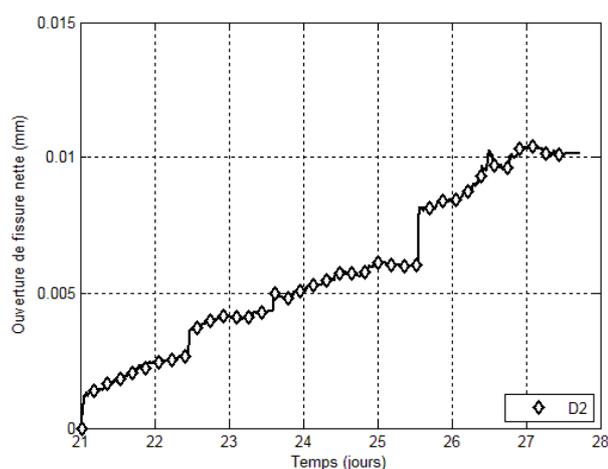
immédiatement après le cycle initial de chargement, soit pour l'intervalle de temps de 0 à 1 jour, alors que cette non-linéarité est nettement moins visible lors du cycle subséquent, soit pour l'intervalle de temps de 7 à 14 jours, à un même niveau de chargement égal à 60 % de  $P_0$ . Cette tendance a aussi été observée pour le spécimen D1.

Par ailleurs, les vitesses secondaires de flèche et d'ouverture de fissure, présentées au Tableau 3, augmentent lorsqu'un cycle de déchargement-charge engendre une phase primaire de fluage non-linéaire marquée après la mise en charge, sans quoi les vitesses conservent le même ordre de grandeur d'un palier à l'autre, et ce même pour un niveau de chargement supérieur. Ceci suggère que la phase de fluage primaire non-linéaire soit la conséquence directe de la création de microfissures au sein du matériau. Ces dernières génèrent un état d'endommagement supérieur en pointe de fissure qui résulte ultimement à des vitesses de fluage secondaire plus importantes, liées à la propagation et à la coalescence de ces microfissures. Cette tendance a été observée pour les niveaux de chargement inférieurs à 75%, et est cohérente aux résultats obtenus par Rossi *et al.* (2014) sur du béton ordinaire.

Aussi extraite de la Figure 7, la Figure 9 montre l'ouverture de fissure nette, soit sans l'ouverture de fissure liée au chargement jusqu'au niveau souhaité, en fonction du temps pour l'intervalle de temps de 21 à 28 jours du spécimen D2. Cette figure montre de nombreux sauts dans les mesures de flèche et d'ouverture de fissure se produisant lors du palier de chargement constant. Ces sauts sont principalement liés à la modification de l'état d'endommagement en pointe de fissure entraînant la propagation de la macrofissure et/ou l'endommagement de l'interface fibre-matrice cimentaire. Ces deux mécanismes de propagation et d'endommagement contribuent à l'élargissement de la macrofissure, et permettent d'expliquer l'augmentation de la complaisance élastique calculée après chaque palier de chargement soutenu (Tableau 3). À l'échelle du matériau, ces mécanismes peuvent être expliqués de la manière suivante. Le maintien de la charge résulte en la création et la propagation de microfissures en pointe de la macrofissure. Dès lors, ces nouvelles microfissures engendrent des transferts hydriques qui induisent des concentrations de contraintes en pointe de la macrofissure lui permettant éventuellement de se propager. Ce phénomène peut être considéré à l'origine d'une part importante du comportement différé (Rossi *et al.* 2011).



**Figure 8 : Courbe ouverture de fissure brute – temps [0-14 jours] du spécimen D2**



**Figure 9 : Courbe ouverture de fissure nette - temps [21-28 jours] du spécimen D2**

Les vitesses secondaires de flèche et d'ouverture de fissure calculée par unité de force appliquée sur les poutrelles sont résumées au Tableau 3 et portées en graphique à la Figure 10 en fonction du niveau de chargement (% de  $P_0$ ). Cette figure montre qu'une relation exponentielle existe entre les vitesses secondaires de flèche et d'ouverture de fissure et les niveaux de chargement supérieurs à 60%. Or, la flèche et l'ouverture de fissure représentent des informations à différentes échelles, soit macroscopique et microscopique respectivement. En effet, la flèche fournit une information au niveau global du spécimen, alors que l'ouverture de fissure en fournit une au niveau de la fissure, soit au niveau local. L'augmentation des vitesses secondaires aux deux échelles de mesure indique donc qu'un même phénomène est en cause pour les deux observations. Il est aussi important de noter qu'il n'est pas possible de différencier les déformations différées de la propagation de la fissuration ou de l'arrachement des fibres.

Tel que mentionné précédemment, la complaisance élastique correspond à l'état d'endommagement du spécimen au moment du cycle de déchargement-rechargement. Elle correspond à la partie linéaire de la pente de chargement lors d'un cycle (Figure 3). La vitesse de complaisance élastique est donc calculée comme étant la différence de complaisance entre deux cycles divisée par le temps écoulé entre ces deux mêmes cycles. Ces résultats sont présentés à l'intérieur du Tableau 3 et présentés sous forme de graphique à la Figure 11. Cette figure présente la vitesse d'évolution de la complaisance par unité de force en fonction de la vitesse de flèche secondaire par unité de force pour des niveaux de chargement supérieurs à 60%. La courbe de tendance indique qu'une relation de proportionnalité existe entre l'évolution de la complaisance élastique par unité de force et la vitesse de flèche secondaire par unité de force. Cette corrélation entre l'état d'endommagement global et la vitesse secondaire de flèche à des niveaux de chargement élevés confirme que la propagation de la macrofissure gouverne l'évolution de la flèche d'un spécimen sous une charge soutenue supérieure à 60% de sa résistance statique. Ce phénomène a aussi été observé par Rossi *et al.* (2014) lors d'une étude similaire conduite sur des poutrelles en béton ordinaire. De ce fait, ce phénomène doit nécessairement être lié à la matrice cimentaire et non aux fibres, absentes du béton ordinaire.

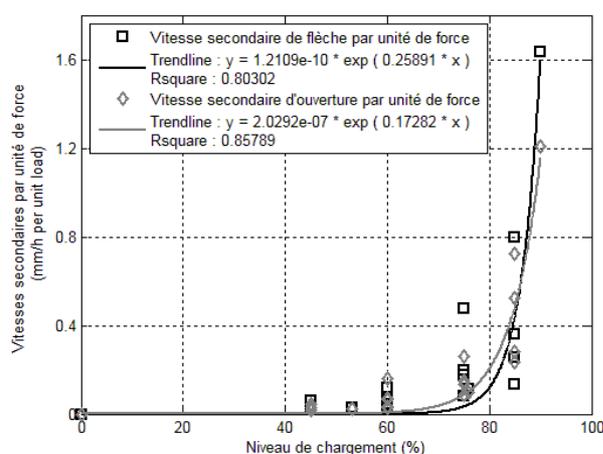


Figure 10 : Taux unitaire - niveau de chargement

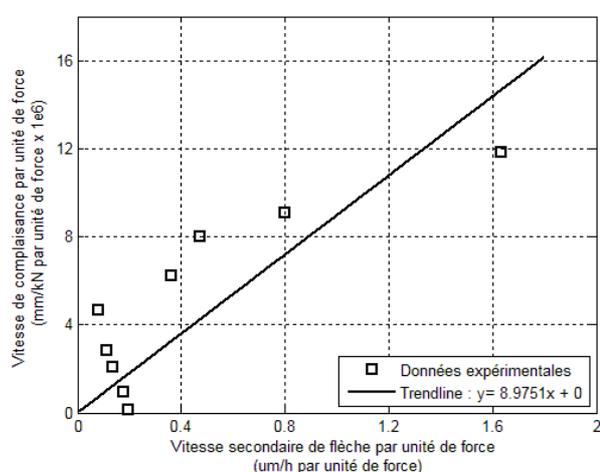


Figure 11 : Complaisance unitaire - taux de flèche secondaire unitaire

Pour résumer, l'analyse des résultats expérimentaux a permis de formuler la conclusion suivante. La propagation de la macrofissure gouverne le comportement sous charge soutenue des poutrelles en BRF. Cette propagation mène à la rupture lorsque l'état d'endommagement différé, causé par la charge soutenue, devient équivalent à l'état d'endommagement statique retrouvé sur la courbe force-déplacement statique. En effet, dans tous les essais réalisés, la rupture des poutrelles sous charge soutenue est survenue à l'atteinte de la projection de leur courbe statique.

#### 4. MÉCANISME PHYSIQUE

La conclusion présentée à la section précédente peut s'expliquer par le mécanisme proposé par Rossi *et al.* (2011, 2014) qui concluent que le fluage du béton ordinaire est principalement dû à la microfissuration, et que la cinétique du fluage dépend du gradient hydrique. L'explication physique de ce mécanisme est présentée en détail dans Rossi *et al.* (2014) et est illustrée sur la Figure 12 pour les BRF.

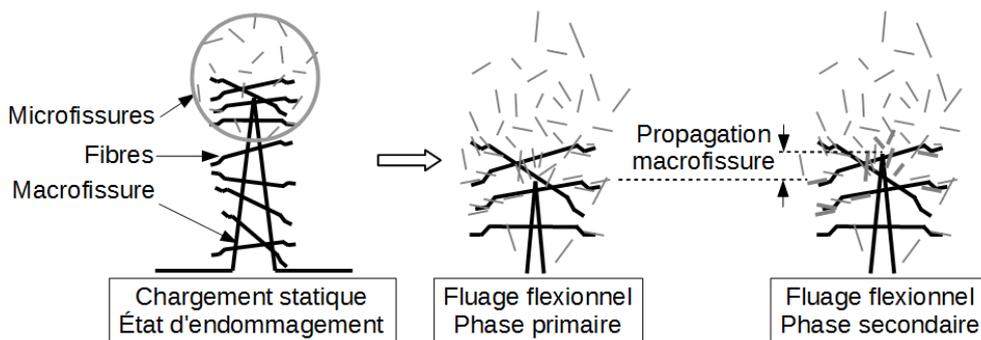


Figure 12 : Mécanisme physique

À priori, la présence de fibres dans le béton ne modifie aucunement le mécanisme en question. La pré-fissuration d'un spécimen (chargement statique) provoque la localisation d'une microfissure et une zone de microfissuration l'entourant. Il s'agit de l'état d'endommagement initial. Une fois la charge soutenue appliquée sur le spécimen, de nouvelles microfissures sont créées alors que d'autres se referment en pointe de fissure. Ceci correspond à la phase primaire de fluage. Puisque des fibres sont présentes dans cette zone, il est raisonnable de supposer que l'interface fibre-matrice est affectée par la présence de microfissures. De ce fait, la création de nouvelles microfissures et la propagation ou coalescence de ces dernières contribuent à la détérioration graduelle de l'interface fibre-matrice et de l'effet de pontage des fibres. Par conséquent, ceci provoque la propagation de la microfissure représentée phase secondaire de fluage, et peut mener ultimement à la rupture du spécimen si les conditions requises sont réunies.

## 5. CONCLUSIONS

Les résultats de cinq essais de fluage flexionnel évaluant l'évolution de la fissuration dans un béton renforcé de fibres ont été présentés dans cet article. Ces résultats ont permis de comparer les spécimens en termes d'endommagement initial, de niveau de chargement, de vitesses secondaires de flèche et d'ouverture de fissure, et de complaisance élastique. De plus, l'influence des conditions environnementales a brièvement été étudiée.

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- Une augmentation des vitesses secondaires de flèche et d'ouverture de fissure survient après une phase de fluage primaire, non-linéaire et marquée. Ceci suggère que la phase de fluage primaire non-linéaire soit la conséquence directe de la création de microfissures au sein du matériau. Ces dernières génèrent un état d'endommagement supérieur en pointe de fissure qui résulte ultimement à des vitesses de fluage secondaire plus importantes;
- Il existe une relation exponentielle entre le taux secondaire de flèche et d'ouverture de fissure par unité de force et le niveau de chargement à partir de 70% de la résistance statique. Ceci suggère qu'un même mécanisme de dégradation s'expriment aux deux échelles d'observation différentes;
- Il existe une relation proportionnelle entre l'évolution de la complaisance élastique et la vitesse secondaire de flèche. Ceci indique que la propagation de la microfissure gouverne l'évolution de la flèche différée du BRF.

Le mécanisme physique proposé pour expliquer les résultats de fluage flexionnel est le suivant :

- L'amplitude du fluage du béton résulte principalement de la présence de microfissures, et la cinétique de fluage dépend du gradient hydrique;
- La création de microfissures, et la propagation et la coalescence de celles-ci endommagent progressivement l'interface fibre-matrice, provoquent l'arrachement des fibres dans le temps, et causent la propagation de la microfissure.

## 6. REMERCIEMENTS

La réalisation de ce document a été rendue possible grâce à la contribution financière du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) et du Fonds de Recherche en Nature et Technologies du Québec (FRQNT). Les matériaux ont gracieusement été fournis par Bekaert, Holcim et Euclid.

## 7. RÉFÉRENCES

Barragán, B. E. and R. L. Zerbino (2008). Creep behaviour of cracked steel fibre reinforced concrete beams. BEFIB 2008: 7th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete, RILEM Publications SARL.

Bernard, E. S. (2004). Creep of cracked fibre reinforced shotcrete panels. Shotcrete: More Engineering Developments Proceedings of the Second International Conference on Engineering Developments in Shotcrete, Carins, Queensland, Australia, Routledge, USA.

Boshoff, W. P., V. Mechtcherine and G. P. A. G. Van Zijl (2009). "Characterising the time-dependant behaviour on the single fibre level of SHCC: Part 1: Mechanism of fibre pull-out creep." Cement and Concrete Research **39**: 779-786.

FIB (2010). Bulletin 56: Model Code 2010, First complete draft – Volume 2. Lausanne, The International Federation for Structural Concrete (fib). **56**: 312.

Granju, J.-L., P. Rossi, G. Chanvillard, B. Mesureur, A. Turatsinze, H. Farhat, C. Boulay, J.-J. Serrano, P. Fakhri, O. Roque and P. Rivillon (2000). Delayed behaviour of cracked SFRC beams. Fifth RILEM symposium on fibre-reinforced concrete (FRC), Lyon.

Hubert, M., C. Desmettre and J.-P. Charron (2014). "Influence of Fiber content and Reinforcement Ratio on the Water Permeability of Reinforced Concrete." Materials and Structures.

MacKay, J. and J.-F. Trottier (2004). Post-crack creep behavior of steel and synthetic FRC under flexural load. 2nd Intern. Conference on Engineering Developments in Shotcrete. Australia: 183-192.

RILEM (2001). "RILEM TC 162-TDF—tests and design 736 methods for steel fibre reinforced concrete: uni-axial tension 737 test for steel fibre reinforced concrete." Materials and Structures **34**: 3-6.

Rossi, P., C. Boulay, J.-L. Tailhan, E. Martin and D. Daviau-Desnoyers (2014). "Macrocrack propagation in a concrete specimen under sustained loading: study of the physical mechanisms " Cement and Concrete Research.

Rossi, P., J.-L. Tailhan, F. Le Maou, F. Gaillet and E. Martin (2011). "Basic creep behavior of concretes investigation of the physical mechanisms by using acoustic emission." Cement and Concrete Research.

Zerbino, R. L. and B. E. Barragán (2012). "Long-Term Behavior of Cracked Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams under Sustained Loading." ACI Materials Journal **109**(M22): 215-224.