

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

Projet de recherche R791.1

David Conciatori, ing., Ph. D.
Chercheur principal
Département de génie civil et de génie des eaux
Université Laval

Réalisé pour le compte du Ministère des Transports (MTQ)

Février 2021

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

La présente étude a été réalisée à la demande du Ministère des Transports (MTQ) et a été financée par le Ministère.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du Ministère des Transports (MTQ).

Collaborateurs

Luca Sorelli, Professeur

David Bouchard, Étudiant

Vicky Turgeon-Malette, Étudiante

Vanessa Durand, ing., M.Sc.

Soufiène Ben Mabrouk, M.A

Pierre Bolduc, ing., M.Sc.

Daniel Boulet, ing., Ph.D.

Marc-Antoine Loranger, ing.

Michel Paradis, ing., M.Sc.

Daniel Vallée, ing., M.Sc.

SOMMAIRE

Le déplacement des personnes et des marchandises a connu un essor extraordinaire dans ce dernier siècle, au point qu'il est aujourd'hui banal de se trouver quelques jours aux antipodes de notre domicile. Ce magnifique essor s'accompagne à toutes les échelles, international, national et local de la mise en place d'un réseau de plus en plus complexe. Ces dessertes eux-mêmes accueillent une grande hétérogénéité de véhicules, véhicules sans moteur, terrestres, aquatique, aérien, etc. Une perturbation occasionnelle de ce grand réseau occasionne aujourd'hui une gêne à la société que l'on nomme pertes économiques, pertes de liberté, etc.

Un des grands réseaux, le réseau routier est déterminant pour le développement économique d'une région, d'un pays et même continental. Un réseau routier comprend de vastes plateformes permettant aux utilisateurs de se déplacer avec des moyens terrestres, voitures, camions, vélos, à pieds, en général, d'un point à un autre. Les obstacles du relief ou la complexité du réseau engendrent des ouvrages spéciaux comme les viaducs, ponts, tunnels, encorbellements, murs de soutènement, galeries, etc. Le succès du réseau et des moyens de locomotions fait que ce réseau est de plus en plus sollicité avec une importance énorme proche des grandes concentrations de la population. Aujourd'hui, un accident, ou la fermeture d'une partielle ou complète engendre de grands ralentissements sur le réseau ayant de grandes répercussions aux heures de pointes à l'intérieur et proche des grandes agglomérations.

Plusieurs stratégies sont mises en place par les gestionnaires des ouvrages, comme le ministère du transport du Québec (MTQ), des actions sur les flux de trafic, les dispositions compensatoires en cas de fermeture totale ou partielle d'un lien ou simplement à la source par des dispositions constructives. Dans ce travail, le MTQ et l'Université Laval (UL) s'intéressent conjointement aux mesures à la source utilisant l'idéologie du bon matériau au bon endroit pour les structures se trouvant ponctuellement sur le réseau routier. Afin de réaliser cette idéologie, le MTQ a ouvert récemment la possibilité de construire et réhabiliter leurs structures avec une technologie des matériaux innovantes en matière de durabilité et résistance, nommé béton fibré ultra-performant BFUP. La mise en place d'une telle technologie demande (1) la mise en place de normes de savoir-faire et (2) également de la vérification des qualités de ces nouveaux matériaux. Les deux points sont discutés dans ce rapport dans un état de l'art sur les normes et codes actuels dans le monde et au Canada et sur des essais en laboratoire pertinents permettant d'établir des demandes de soumission garantissant des propriétés de ces matériaux adéquates.

Aussi 4 BFUP commercialisés ou en cours de commercialisation ont été choisis et testés pour apprendre plus sur les conditions d'essais, les performances des matériaux, le matériel à utiliser et la performance des essais. Ces expériences et défis sont rapportés dans ce document, afin que

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

le MTQ puisse se familiariser avec l'application de ce nouveau matériau dans leurs projets. Si à priori, le matériau ressemble beaucoup à un béton ordinaire, ces performances mécaniques et de durabilité demandent des ajustements importants pour les caractériser. Plusieurs d'entre eux font l'objet de recommandations dans ce document.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION.....	22
1.1	Objectifs et sous-objectifs du projet de recherche	23
1.2	Description des essais effectués et limites du projet	24
2.	REVUE DE LA LITTÉRATURE	26
2.1	Généralités	26
2.1.1	Description et composition d'un BFUP	26
2.1.2	Caractérisation et propriétés d'un BFUP	27
2.1.3	Revue des normes et recommandations sur le BFUP 29	
2.2	Comparatif des essais pour le BFUP	34
2.3	Propriétés générales	36
2.4	Essai de résistance à la compression	37
2.5	Essai de module élastique et du coefficient de Poisson	39
2.6	Essai de résistance à la traction directe	40
2.6.1	Essai de résistance à la traction selon l'ACI 544.9R-17	44
2.7	Essai de résistance à la traction directe par flexion	45
2.7.1	Analyse inverse	48
2.7.2	Essai de flexion à 4 points sur poutres non entaillées (4PBT)	52
2.7.3	Essai de flexion à 3 points sur poutres entaillées (3PBT)	54
2.7.4	Essai de flexion à 4 points sur dalles minces (4PBT- DM)	57
2.7.5	Essai de flexion selon l'ACI 544.9R «Report on Measuring Mechanical Properties of Hardened-Reinforced Concrete»	59
2.8	Essai d'étalement.....	62
2.9	Essai de mesure du retrait	63
2.10	Essai de fluage en compression	63
2.11	Essai de résistance aux cycles de gel-dégel	64
2.12	Essai de résistance à l'abrasion.....	65
2.13	Essai de perméabilité aux ions chlorure.....	67
2.14	Essai de porosité à l'eau	73
2.15	Essai de perméabilité à l'oxygène.....	73
2.16	Comparatif des procédures d'essai	75
3.	ÉQUIPEMENT ET MÉTHODOLOGIE	76
3.1	Équipement.....	76

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

3.1.1	Malaxeur à béton.....	76
3.1.2	Surfaceuse.....	77
3.1.3	Presse SATEC.....	78
3.1.4	Presse MTS 322.....	79
3.1.5	Banc d'essai et tête de chargement pour essai de flexion.....	79
3.1.6	Appareil pour essais de gel-dégel.....	80
3.1.7	Détecteur ultra-sonique V-METER MK II de James Instruments.....	80
3.1.8	Appareil Perma2 de Giatec mesure de la migration accélérée des ions chlorure.....	81
3.1.9	Comparateur pour mesure de retrait.....	81
3.2	Méthodologie.....	81
3.2.1	Préparation des gâchées.....	81
3.2.2	Coulée.....	82
3.2.3	Démoulage et cure des échantillons.....	83
3.2.4	Préparation des échantillons pour les essais de résistance à la compression (ASTM C39, ASTM C1856)...	84
3.2.5	Préparation des échantillons pour les essais de module élastique (ASTM C469, ASTM C1856).....	84
3.2.6	Préparation des échantillons pour les différents essais de résistance à la flexion (3PBT: NF P18-470 - 4PBT: ASTM C1609, ASTM C1856 - 4PBT-DM: SIA 2052).....	84
3.2.7	Préparation des échantillons pour les essais de résistance à la traction directe (approche développée par l'EPFL).....	85
3.2.8	Préparation des échantillons pour les essais de retrait de séchage (ASTM C157, ASTM C341, ASTM C511, ASTM C1856).....	85
3.2.9	Préparation des échantillons pour l'essai de la teneur en eau, de la masse volumique, de l'absorption et de la porosité (CSA A23.2-11C).....	85
3.2.10	Préparation des échantillons pour les essais de résistance à l'écaillage (BNQ 2621-905).....	86
3.2.11	Préparation des échantillons pour les essais de résistance aux cycles de gel-dégel (ASTM C666, ASTM C1856).....	86
3.2.12	Préparation des échantillons pour les essais de perméabilité aux ions chlorure (ASTM C1202, ASTM C1856).....	86
3.2.13	Préparation des échantillons pour les essais de caractérisation du réseau de bulles d'air (ASTM C457).....	86
4.	PRÉSENTATION DES ESSAIS ET RÉSULTATS.....	87
4.1	Mesures des propriétés mécaniques.....	87
4.1.1	Essai de résistance à la compression.....	87
4.1.2	Essai de module élastique.....	90

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

4.1.3	Essai de résistance à la flexion à 3 points sur prismes entaillés (3PBT)	92
4.1.4	Essai de résistance à la flexion à 4 points sur prismes non entaillés (4PBT)	96
4.1.5	Essai de résistance à la flexion à 4 points sur dalles minces (4PBT-DM)	103
4.1.6	Essai de résistance à la traction directe.....	107
4.1.7	Essai de mesure du retrait.....	114
4.2	Mesures des caractéristiques de durabilité	117
4.2.1	Essai de la teneur en eau, de la masse volumique, de l'absorption et de la porosité	117
4.2.2	Essai de résistance à l'écaillage	120
4.2.3	Essai de résistance aux cycles de gel-dégel.....	120
4.2.4	Essai de perméabilité aux ions chlorure.....	122
4.2.5	Essai de caractérisation du réseau de bulles d'air	130
5.	ANALYSE COMPARATIVE DES RÉSULTATS.....	133
5.1	Mesure des propriétés mécaniques	133
5.1.1	Essai de résistance à la compression.....	133
5.1.2	Essai de module élastique	134
5.1.3	Essai de résistance à la flexion à 3 points sur prismes entaillés (3PBT)	135
5.1.4	Essai de résistance à la flexion à 4 points sur prismes non entaillés (4PBT)	136
5.1.5	Essai de résistance à la flexion à 4 points sur dalles minces (4PBT-DM)	138
5.1.6	Essai de résistance à la traction directe.....	140
5.1.7	Essai de mesure du retrait.....	141
5.2	Mesure des caractéristiques de durabilité	143
5.2.1	Essai d'absorption	143
5.2.2	Essai de résistance à l'écaillage	143
5.2.3	Essai de résistance aux cycles de gel-dégel.....	143
5.2.4	Essai de perméabilité aux ions chlorure.....	144
5.2.5	Essai de caractérisation du réseau de bulles d'air	145
6.	IDENTIFICATION DE LA LOI DE TRACTION PAR TECHNIQUE D'ANALYSE INVERSE DES ESSAIS DE FLEXION	146
6.1	Analyse inverse selon CSA S6 Annexe 8.....	146
6.1.1	Analyse inverse pour un BFUP de type TH-FRC (écrouissant).....	146
6.1.2	Analyse inverse pour un BFUP de type TS-FRC (adouissant)	149

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

6.2	Comparaison entre les résultats de traction directe et les lois de traction déterminées selon la norme CSA S6 Annexe 8.....	155
7.	POTENTIEL DE FISSURATION DU BFUP PAR LA CORROSION	157
8.	EXPÉRIENCES PERTINENTES ET RECOMMANDATIONS.....	167
8.1	Défis rencontrés.....	167
8.2	Recommandations pour les devis du Ministère concernant l'utilisation du BFUP dans les ouvrages d'art et les structures.....	169
9.	CONCLUSION	174
10.	RÉFÉRENCES.....	176

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Coefficient de diffusion des ions chlorure, porosité accessible à l'eau et perméabilité à l'oxygène, données indicatives selon l'AFGC	29
Tableau 2	Valeurs typiques de propriétés du BFUP selon la norme SIA 2052	31
Tableau 3	Résistance minimale requise en compression selon les différentes catégories	32
Tableau 4	Paramètres de la loi de traction et classification des BFUPs	33
Tableau 5	Critères pour la classification du potentiel de durabilité des BFUPs	33
Tableau 6	Propriétés générales indicatives pour un BFUP typique	36
Tableau 7	Comparatif des essais de résistance à la compression sur le BFUP	38
Tableau 8	Facteurs de conversion pour les essais de résistance à la compression sur le BFUP	39
Tableau 9	Comparatif des essais de détermination du module élastique sur le BFUP	40
Tableau 10	Description des recommandations et normes de référence pour les essais de résistance à la traction directe sur le BFUP	43
Tableau 11	Comparatif des essais de résistance à la traction indirecte sur le BRF, trouvés dans la revue de littérature de l'ACI 544.9R-17	47
Tableau 12	Description des recommandations et normes de référence pour les essais de flexion à 4 points sur poutres non entaillées sur le BFUP	52
Tableau 13	Description des recommandations et normes de référence pour les essais de flexion à 3 points sur poutres entaillées sur le BFUP ...	54
Tableau 14	Description des recommandations et normes de référence pour les essais de flexion à 4 points sur dalles minces sur le BFUP	57
Tableau 15	Comparatif des essais de flexion sur le BRF, trouvés dans la revue de littérature de l'ACI 544.9R	60
Tableau 16	Comparatif des essais de traction indirecte sur le BRF, trouvés dans la revue de littérature de la FHWA HRT-06-103.....	61
Tableau 17	Comparatif des essais de mesure de l'étalement sur le BFUP, trouvés dans la littérature.....	62
Tableau 18	Comparatif des essais de mesure du retrait sur le BFUP, trouvés dans la littérature.....	63
Tableau 19	Comparatif des essais de mesure du fluage sur le BFUP, trouvés dans la littérature.....	64
Tableau 20	Comparatif des essais de résistance aux cycles de gel-dégel sur le BFUP, trouvés dans la littérature.....	65
Tableau 21	Comparatif des essais de résistance à l'abrasion sur le BFUP, trouvés dans la littérature.....	66
Tableau 22	Critères de qualification de la pénétration aux ions chlorure des bétons en fonction de la charge totale passée suite à l'essai ASTM C1202	69
Tableau 23	Comparatif des essais de caractérisation de la pénétration aux ions chlorure sur le BFUP, trouvés dans la littérature.....	73
Tableau 24	Comparatif de différents essais de caractérisation de la pénétration aux ions chlorure, O : oui, N : non	74

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

Tableau 25	Comparatif des essais de mesure de la porosité à l'eau sur le BFUP, trouvés dans la littérature	74
Tableau 26	Comparatif des essais de mesure de la perméabilité à l'oxygène sur le BFUP, trouvés dans la littérature	75
Tableau 27	Dimensions du cône à mortier	82
Tableau 28	Résultats des essais de résistance à la compression à 4 jours	88
Tableau 29	Résultats des essais de résistance à la compression à 28 jours	89
Tableau 30	Résultats des essais de résistance à la compression après traitement thermique	89
Tableau 31	Résultats des essais de résistance de module élastique	91
Tableau 32	Résultats des essais de résistance à la flexion à 3 points sur prismes entaillés (3PBT)	93
Tableau 33	Dimensions de la section transversale des échantillons de flexion, selon la norme américaine ASTM C1856	97
Tableau 34	Résultats des essais de résistance à la flexion à 4 points sur prismes non entaillés (4PBT)	99
Tableau 35	Résultats des essais de résistance à la flexion à 4 points sur dalles minces (4PBT-DM)	104
Tableau 36	Résultats des essais de résistance à la traction directe	113
Tableau 37	Résultats des essais de retrait de séchage	115
Tableau 38	Perméabilité aux ions chlorure selon la charge passante	122
Tableau 39	Durée de l'essai modifié de migration accélérée pour chaque échantillon	126
Tableau 40	Dimension de la zone d'étude du réseau de bulles d'air, selon la dimension maximale des granulats	131
Tableau 41	Longueur minimale d'analyse et nombre de points minimums pour l'utilisation de la méthode modifiée par comptage, en fonction de la taille maximale des granulats utilisés	132
Tableau 42	Facteur d'espacement des essais de caractérisation du réseau de bulles d'air	132
Tableau 43	Paramètres moyens de la loi comportement de la résistance en traction obtenus selon les essais de traction directe	140
Tableau 44	Résultats selon l'approche de la norme CSA S6 pour un BFUP de type TH-FRC	151
Tableau 45	Localisation des différents points (Charges) pour l'application de l'approche de la norme CSA S6 pour un BFUP de type TH-FRC	152
Tableau 46	Localisation des différents points (Flèches) pour l'application de l'approche de la norme CSA S6 pour un BFUP de type TH-FRC	153
Tableau 47	Résultats selon l'approche de la norme CSA S6 pour un BFUP de type TS-FRC	154
Tableau 48	Résultats du transport des ions chlorure provenant de la littérature	158
Tableau 49	Quantité d'échantillons utilisés, n_m = pour le "test de migration accélérée" n_i = pour les "analyses d'image" et p_{SMT} = pourcentage de réussite de l'essai de migration SMT	160
Tableau 50	Description des normes de référence pour les essais en compression	183
Tableau 51	Âge de l'échantillon au moment de l'essai de compression et tolérance admissible pour l'essai ASTM C39	184

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

Tableau 52	Âge de l'échantillon au moment de l'essai de compression et tolérance admissible pour l'essai ASTM C109	184
Tableau 53	Description des normes de référence pour les essais de module élastique.....	185
Tableau 54	Description des normes de référence pour les essais d'étalement	186
Tableau 55	Description des normes de référence pour les essais de retrait	188
Tableau 56	Description des normes de référence pour les essais de fluage	189
Tableau 57	Description des normes de référence pour les essais d'absorption	191
Tableau 58	Périodes de mesure pour l'essai d'absorption, et tolérance possible	194
Tableau 59	Description des normes de référence pour les essais d'écaillage	195
Tableau 60	Cote subjective de l'état de la surface pour l'essai d'écaillage, selon la norme ASTM C672	197
Tableau 61	Cote subjective de l'état de la surface pour l'essai d'écaillage, selon le BNQ	197
Tableau 62	Description des normes de référence pour les essais de gel-dégel	198
Tableau 63	Description des normes de référence pour les essais d'abrasion	199
Tableau 64	Description des normes de référence pour les essais de pénétration aux ions chlorure.....	201
Tableau 65	Relation entre les paramètres α_1 et λ_1	215
Tableau 66	Résultats des essais de la teneur en eau, de la densité, de l'absorption et de la porosité	216
Tableau 67	Résultats des essais modifiés de migration accélérée	218

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Comportement contrainte en compression vs. Déformation (schématisé) du béton à ultra-haute performance (UHPC) avec une variation du comportement dans la phase descendante, dépendant du taux de fibres, le type utilisés et l'orientation.	28
Figure 2	Comportement typique Contrainte vs. Ouverture de fissures pour le béton à ultra-haute performance (UHPC) dans un essai de traction..	28
Figure 3	Disposition de l'essai de traction proposé par Graybeal	41
Figure 4	Dimensions des échantillons de l'essai de traction directe pour (a) la norme SIA (b) la recommandation (HPFRCC) – JSCE (c) le CNR-DT 204 et (d) FRC 2014	42
Figure 5	Essais (a) Traction sur cylindre entaillé (b) Essai de fendage avec coin (c) Essai de fendage double avec coin et (d) Essai de poinçonnement double type Barcelone	46
Figure 6	Dimensions de l'échantillon pour l'analyse inverse proposée par Lopez	48
Figure 7	Lois de comportement en compression (gauche) et traction (droite) utilisées dans le modèle de Lopez	49
Figure 8	Position des points critiques nécessaires à l'analyse inverse de Lopez	50
Figure 9	Équilibre mécanique de la section fissurée selon la norme française	50
Figure 10	Description des points de l'analyse inverse (gauche) et distribution des contraintes admises à la section critique au point B (droite) .	51
Figure 11	Disposition des essais de flexion sur poutres, 4PBT (gauche) et 3PBT (droite)	56
Figure 12	Disposition des essais de flexion à 4 points sur dalles minces, norme française (gauche) et norme suisse (droite)	58
Figure 13	Résultats d'essai de résistance aux cycles de gel-dégel sur du BFUP selon différentes cures	65
Figure 14	Résultats d'essai de résistance à l'abrasion selon la cure et le type de préparation de surface	66
Figure 15	Montage pour l'essai de migration accélérée NordTest.....	68
Figure 16	Montage pour l'essai de migration accélérée selon la norme AASHTO T277 (ASTM C1202)	69
Figure 17	Montage pour un essai typique de migration électrique.....	70
Figure 18	Montage pour l'essai de migration électrique selon (Tang et Nilsson 1992)	70
Figure 19	Montage pour l'essai de résistance électrique.....	71
Figure 20	Schématisation d'un essai de résistivité avec la sonde Wenner	72
Figure 21	Montage pour un essai de diffusion par pression	72
Figure 22	Malaxeurs utilisés dans le cadre du projet de recherche ; a) malaxeur Hobart, b) malaxeur à béton 80L	77
Figure 23	Fini de surface d'une éprouvette de BFUP pour un essai de compression ; a) surface acceptable, b) surface inacceptable	78

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

Figure 24 a) Presse SATEC, utilisée pour les essais de compression et de module élastique b) Presse MTS 322, utilisée pour les essais de flexion et de traction directe	79
Figure 25 Banc d'essai pour les essais de flexion sur différents échantillons de BFUP	80
Figure 26 a) Détecteur ultra-sonique V-Meter Mk II et b) positionnement des capteurs sur l'axe longitudinal de l'échantillon	81
Figure 27 Essai de migration accélérée des ions chlorure. (a) Placement des anneaux de caoutchouc et de plastique pour l'étanchéité du montage	81
Figure 28 Cône à mortier et table d'étalement utilisés afin d'assurer un comportement similaire à celui prescrit par le fabricant.....	83
Figure 29 Échantillon avec instrumentation pour la mesure du module élastique	84
Figure 30 Courbes forces-déformation des essais de module élastique ...	91
Figure 31 Courbes force-ouverture de fissure des essais de résistance à la flexion à 3 points sur prismes entaillés (3PBT)	94
Figure 32 Montage et résultats des essais de flexion à 3 points	96
Figure 33 Positionnement des points d'intérêt pour l'analyse des essais de flexion à 4 points sur prismes selon l'ASTM C1609	98
Figure 34 Courbes force-flèche des essais de résistance à la flexion à 4 points sur prismes non entaillés (4PBT).....	100
Figure 35 Essai de flexion à 4 points et multi-fissuration observable.....	101
Figure 36 Courbes force-flèche des essais de résistance à la flexion à 4 points sur dalles minces (4PBT-DM).....	103
Figure 37 Essai de flexion à 4 points sur dalles minces	105
Figure 38 Comparaison des échantillons utilisés pour la caractérisation en traction directe ; a) dimensionnement de l'échantillon de l'université Laval, b) dimensionnement selon la norme SIA.....	108
Figure 39 Spécificité des moules utilisés pour les échantillons de traction	108
Figure 40 Instrumentation pour les échantillons de traction directe	110
Figure 41 Courbes contrainte-déformation des essais de résistance à la traction directe	113
Figure 42 Résultats de divers essais de traction directe. Après la microfissuration, une large fissure visible à l'œil a localisé à la fin de l'essai dans la zone centrale.....	114
Figure 43 Changement de masse des échantillons dû au retrait de séchage	115
Figure 44 Absorption, volume des vides et masse volumique des 4 BFUPs testés.....	119
Figure 45 Surface des plaques de BFUP après l'essai de résistance à l'écaillage.....	120
Figure 46 Résultats des essais de gel-dégel selon la procédure A de la norme ASTM C666.....	121
Figure 47 Montage de l'essai modifié de migration accélérée des ions chlorure	123
Figure 48 Résultats de l'essai de migration accélérée selon la norme ASTM C1202.....	125
Figure 49 Profils de chlore de chaque échantillon de (a) BUP et (b) BFUP	127

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

Figure 50 Surface après broyage des échantillons ayant fissurés lors de l'essai modifié de migration accélérée	128
Figure 51 Résultats de l'essai modifié de migration accélérée des échantillons de BUP et de BFUP. a) Comparaison des profils de chlore (b) Coefficients de diffusion apparent.....	129
Figure 52 Surface intérieure des échantillons de BUP vaporisées au nitrate d'argent.....	130
Figure 53 Comparatif des résultats des essais de compression moyenne avec indication de l'écart type	134
Figure 54 Comparatif des essais de module élastique moyen avec indication de l'écart type.	134
Figure 55 Comparatif des essais de flexion à 3 points sur prismes entaillés (3PBT). Note que le matériau C a cassé prématurément avec une rupture fragile.....	136
Figure 56 Comparatif des essais de flexion à 4 points sur prismes non entaillés (4PBT)	138
Figure 57 Comparatif des essais de flexion à 4 points sur dalles minces (4PBT-DM)	139
Figure 58 Comparatif des essais de retrait de séchage à l'air	142
Figure 59 Comparatif des essais d'absorption	143
Figure 60 Comparatif des essais de résistances aux cycles de gel-dégel	144
Figure 61 Comparatif des essais de résistance à la pénétration des ions de chlore.....	144
Figure 62 Comparatif des facteurs d'espacement	145
Figure 63 Localisation des points d'intérêt pour l'analyse inverse des essais de flexion à 4 points selon la norme CSA S6, pour des matériaux écrouissant	146
Figure 64 Lois de traction selon la norme CSA S6 Annexe 8 pour un BFUP de type TH-FRC.....	149
Figure 65 Lois de traction selon la norme CSA S6 Annexe 8 pour un BFUP de type TS-FRC (gauche Contrainte-Déformation, droite Contrainte-Ouverture de fissure)	150
Figure 66 Comparatif entre les résultats expérimentaux et les lois de traction trouvées selon la norme CSA S6 pour des BFUPs écrouissant ou adoucissant	156
Figure 67 Corrélations avec l'intensité du courant : (a) intensité du courant pour tous les essais de migration en fonction de la température.....	162
Figure 68 Concentration de chlorure dans la première couche broyée : (a) Tests de migration réussis (SMT) et (b) Tests de migration inutilisables (UMT)	163
Figure 69 (a) Un exemple d'échantillons UMT présentant des fissures (marques rouges : rouille et marques blanches : hypochlorite), (b) Exemple de localisation de la corrosion sur le revêtement	164
Figure 70 Corrélations entre les résultats des échantillons analysés : (a) La teneur en volume des fibres selon le coefficient de diffusion des chlorures (b) La teneur en volume des fibres mesurée selon le volume des fibres mises dans le mélange (c) La teneur en en volume des fibres selon la distance entre les fibres (d) L'orientation des fibres selon la distance entre les fibres (e) La teneur en volume des fibres selon l'orientation des fibres et (f)	

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

L'homogénéité de la distribution des fibres selon la distance entre les fibres.	165
Figure 71 Patrons de fissuration à noter pour l'essai de compression fait selon la norme ASTM C39.....	184
Figure 72 Moule standard utilisé pour l'essai d'étalement de béton frais, selon la norme ASTM C143.....	187
Figure 73 Disposition de l'essai de fluage, selon la norme ASTM C512.	190
Figure 74 Disposition de l'essai d'absorption, selon la norme ASTM C1585	194
Figure 75 Dispositif pour l'essai d'abrasion (gauche) et tête abrasive (droite), selon la norme ASTM C944.....	200
Figure 76 Disposition pour l'essai de migration accéléré de chlore, selon la norme XP P18-462	205
Figure 77 Échantillon A1	223
Figure 78 Échantillon A2.....	224
Figure 79 Échantillon A3.....	225
Figure 80 Échantillon B3.....	226
Figure 81 Échantillon D1.....	227
Figure 82 Échantillon D2.....	228

GLOSSAIRE

Codes et normes (sauf indication contraire, la date de publication des normes citées dans le texte correspond à celle présentée dans ce glossaire):

AASHTO

AASHTO T132	AASHTO T132 - Standard Method of Test for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars (1987)
AASHTO T259	AASHTO T259 - Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration (2017)

ACI

ACI 544.9R-17	ACI 544.9R-17 Report on Measuring Mechanical Properties of Hardened Fiber-Reinforced Concrete
---------------	---

ASTM

ASTM C39	ASTM C39 – Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens (2016)
ASTM C109	ASTM C109 - Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) (2016)
ASTM C143	ASTM C143 - Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete (2015)
ASTM C157	ASTM C157 - Standard Test Method Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete (2014)
ASTM C215	ASTM C215 - Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens (2014)
ASTM C341	ASTM C341 - Standard Test Method for Preparation and Conditioning of Cast, Drilled, or Sawed Specimens of Hydraulic-Cement Mortar and Concrete Used for Length Change Measurement (2013)
ASTM C469	ASTM C469 - Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression (2014)
ASTM C490	ASTM C490 - Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete (2017)
ASTM C496	ASTM C496 - Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens (2011)
ASTM C512	ASTM C512 - Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression (2015)
ASTM C597	ASTM C597 - Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete (2016)
ASTM C666	ASTM C666 - Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing (2015)

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

ASTM C672	ASTM C672 - Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals (2012)
ASTM C944	ASTM C944 - Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method (2012)
ASTM C1018	ASTM C1018 - Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading) (1997)
ASTM C1202	ASTM C1202 - Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration (2017)
ASTM C1399	ASTM C1399 - Standard Test Method for Obtaining Average Residual Strength of Fiber-Reinforced Concrete (2015)
ASTM C1437	ASTM C1437 - Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar (2015)
ASTM C1550	ASTM C1550 - Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel) (2012)
ASTM C1585	ASTM C1585 - Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes (2013)
ASTM C1609	ASTM C1609 – Standard Test Method for flexural Performance of FRC (Using Beam with Third-Point Loading) (2012)
ASTM C1856	ASTM C1856 - Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete (2017)

Australienne

FRC 2014 – Australian	FRC 2014 – Joint ACI- <i>fib</i> International Workshop – FRC design according to the Draft Australian Bridge Code (2014)
-----------------------	---

Canadienne

BNQ 2621-905	BNQ 2621-905 – Fascicule de certification – Béton prêt à l'emploi – Programme de certification (2012)
CSA A23.1 Annexe U	Béton : Constituants et exécution des travaux (2019)
CSA A23.2-11C	Water content, density, absorption, and voids in hardened concrete, grout, or mortar
CSA A23.2-22C	Scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals using mass loss
CSA A23.2-23C	Electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration
CSA A3004	Physical Test Methods for Cementitious Materials for Use in Concrete and Masonry
CSA S6 Annexe 8	Code canadien pour le calcul des ponts routiers (2019)

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

FHWA

- FHWA-HRT-13-060 Ultra-High Performance Concrete : A State-of-the-Art Report for the Bridge Community – FHWA-HRT-13-060 (2013)
- FHWA-HRT-06-103 Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete – FHWA-HRT-06-103 (2006)

Française

- AFGC Bétons fibrés à ultra-hautes performances – Recommandations de l'AFGC – Juin 2013
- NF EN 12350-5 NF EN 12350-5 - Essais pour béton frais - Partie 5 essai d'étalement à la table à choc
- NF EN 12350-8 NF EN 12350-8 - Essai pour béton frais - Partie 8 : béton auto-plaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams
- NF EN 12390-3 NF EN 12390-3 Essais pour béton durci – Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes
- NF EN 13892-3 NF EN 13892-3 Méthodes d'essai des matériaux pour chapes – Partie 3 : Détermination de la résistance à l'usure Böhme
- NF P18-459 NF P18-459 – Essai pour béton durci – Essai de porosité et de masse volumique
- NF P18-470 Bétons – Bétons fibrés à Ultra Hautes Performances – Spécification, performance, production et conformité – NF P18-470 (2016)
- XP P18-462 XP P18-462 – Essai sur béton durci - Essai accéléré de migration des ions chlorure en régime non-stationnaire - Détermination du coefficient de diffusion apparent des ions chlorure (2012)
- XP P18-463 XP P18-463 – Bétons - Essai de perméabilité aux gaz sur béton durci (2011)

Européenne (autres)

- CNR-DT 204 CNR-DT 204 - Guide for the Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures (2006)
- CSN EN 13057 CSN EN 13057 – Test methods – Determination of resistance of capillary absorption
- DBV Steel Fibre Concrete,” German Society for Concrete and Construction Technology (2001)
- EN14651 EN14651 - Test method for metallic fibre concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual (2007)
- SIA 2052 Béton fibré ultra-performant (BFUP) : Matériaux, dimensionnement et exécution – Cahier technique prSIA 2052 (2014)

Japonaise

- (HPFRCC) – JSCE Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC) – JSCE (2008)

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

JCI-SF4 JCI-SF4—Methods of Tests for flexural strength and
flexural toughness of fiber reinforced concrete (1984)

Article

Design of UHPC Design of UHPC structural members: Lessons learned
and ASTM test requirements (2015)

UHPC compressive
specimens UHPC compressive strength test specimens: Cylinder
or cube? (2015)

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

3PBT	Flexion à 3 points sur poutres entaillées
4PBT	Flexion à 4 points sur poutres non entaillées
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ACI	American Concret Institute
AFGC	Association française de Génie civil
AFREM	Association française de recherches et d'essais sur les matériaux et les constructions
ATT	Avec traitement thermique
BFUP	Béton fibré ultra performant
BRF	Béton renforcé de fibres
BUP	Béton fibré ultra performant (sans fibres)
DPBT	Essai de poinçonnement double type Barcelone
EFC	Essai de fendage avec coin
EFDC	Essai de fendage double avec coin
FHWA	Federal Highway Administration
FV	Volume de fibres
FV _{me}	Volume de fibres mesuré
FV _{the}	Volume de fibre théorique
IA	Indice d'abrasion
IFD	Distance inter-fibres
MTQ	Ministère des Transports du Québec
N.A.	Non-applicable
N.S.	Non spécifié
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux
STT	Sans traitement thermique
SMT	Essai de migration utilisable
UMT	Essai de migration inutilisable

1. INTRODUCTION

Le béton fibré à ultra-haute performance (BFUP) est un matériau ayant une résistance en compression supérieure au béton ordinaire en plus d'une durabilité accrue. La première utilisation concrète de ce matériau s'est faite à Sherbrooke en 1997 pour la réalisation d'une passerelle piétonne. Bien que cette première réalisation ait été faite au Québec, c'est aux États-Unis et en Europe que le matériau est principalement en émergence. Un nombre grandissant de normes relativement à la caractérisation du matériau, ainsi qu'à son utilisation voit présentement le jour. Parmi les principales normes existantes, les plus notables sont les suivantes :

- ASTM C1856 ; Caractérisation ; États-Unis
- CSA A23.1 Annexe U ; Caractérisation ; Canada
- CSA S6 ; Caractérisation et dimensionnement ; Canada
- NF P18-470 ; Caractérisation ; France
- NF P18-710 ; Dimensionnement ; France
- SIA 2052 Cahier technique ; Caractérisation et dimensionnement ; Suisse

Chaque norme et recommandation ayant leur propre approche, plusieurs méthodes d'essais sont donc disponibles pour la caractérisation mécanique du BFUP. Pour ce qui est de la durabilité du BFUP, celle-ci est difficilement évaluable avec les méthodes existantes puisqu'elle est largement supérieure au béton conventionnel, et les méthodes utilisées pour le BFUP sont encore fortement apparentées aux normes pour le béton.

Au Québec, plusieurs compagnies développent ce matériau et quelques formulations différentes sont disponibles. En ayant accès à cette technologie, le Ministère des Transports du Québec (MTQ) souhaite développer une expertise pour caractériser le BFUP et connaître les essais pertinents à inclure dans les devis ainsi que les exigences à spécifier.

Le présent document vise dans un premier temps à présenter les différents essais disponibles pour la caractérisation des propriétés mécanique et de la durabilité du BFUP et identifier les méthodes d'essais pertinentes à inclure dans les devis futurs du MTQ.

Dans un deuxième temps, ce document vise à présenter les différents essais effectués au laboratoire de l'Université Laval préalablement choisis conjointement avec le Ministère sur des BFUPs, à faire une étude comparative de la performance des matériaux testés selon les essais mécaniques et de durabilité ainsi qu'à présenter une série d'essais à préconiser dans la rédaction de futurs devis du Ministère.

Ce présent rapport inclut les différentes parties suivantes :

- la section 2 présente un court historique du BFUP, sa composition, ses propriétés mécaniques et de durabilité typiques, un comparatif complet d'essais pertinents sur le BFUP et un comparatif entre les

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

différentes normes du béton armé, qui servent de base pour les normes et recommandations développées pour le BFUP.

- la section 3 présente les équipements spécifiques utilisés lors des différentes étapes des essais. La méthodologie y est également présentée;
- la section 4 présente succinctement, pour chaque essai, les résultats obtenus sur chacun des matériaux testés;
- la section 5 présente une analyse comparative détaillée des résultats obtenus et présentés à la section 4. Lorsqu'applicable, les catégories de performances des matériaux y sont également décrites;
- la section 6 présente différentes procédures d'analyse inverse, applicables selon les différents essais effectués;
- la section 7 présente les conclusions des auteurs relativement au potentiel de fissuration du BFUP dû à la corrosion;
- la section 8 présente les expériences pertinentes des auteurs relativement à la réalisation des différents essais et également aux difficultés rencontrées. S'y trouvent également les différentes recommandations faites au Ministère à l'égard des essais à préconiser dans l'élaboration des devis, selon les différentes applications envisageables du matériau;
- la section 9 conclut le rapport;
- la section 10 présente les différentes références;
- la section 11 comprend les documents en annexes.

1.1 Objectifs et sous-objectifs du projet de recherche

Les principaux objectifs du projet de recherche sont :

- développer l'expertise au sein du Ministère pour caractériser le BFUP et rédiger des devis;
- caractériser et d'identifier les méthodes d'essais pertinentes et les propriétés mécaniques des BFUPs;
- caractériser et d'identifier les méthodes d'essais pertinentes et la durabilité au gel, si nécessaire;
- caractériser et d'identifier les méthodes d'essais pertinentes et la durabilité relativement à la corrosion des fibres d'acier à l'intérieur du matériau.

Les sous-objectifs spécifiques du projet de recherche sont :

- développer l'expertise au sein du Ministère pour caractériser le BFUP et rédiger des devis :
 - réaliser une revue de littérature sur la technologie du BFUP en général et les présentes normes et recommandations nationales qui l'encadrent;
 - résumer les méthodes d'essais réalisés pour caractériser les propriétés mécaniques et la durabilité des BFUPs;

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

- spécifier les essais que le MTQ devrait utiliser dans ses prochains devis ainsi que les critères d'acceptation;
- caractériser et d'identifier les méthodes d'essais pertinentes et les propriétés mécaniques des BFUPs :
 - identifier la procédure la plus adéquate pour caractériser la résistance à la compression (forme de l'échantillon, dimensions et taux de chargement de la presse, entre autres);
 - identifier la méthode d'essai la plus adéquats pour caractériser les propriétés post-fissuration du BFUP, à savoir l'essai de traction directe ou de flexion;
 - identifier les critères à utiliser dans les devis afin d'évaluer la qualité des BFUPs en ce qui concerne les propriétés mécaniques;
- caractériser et d'identifier les méthodes d'essais pertinentes et la durabilité au gel, si nécessaire :
 - identifier les essais pertinents à réaliser reliés à la durabilité au gel comme la résistance à l'écaillage, la résistance aux cycles accélérés de gel-dégel et la caractérisation du réseau de bulles d'air et l'absorption;
 - identifier les critères à utiliser dans les devis afin d'évaluer la qualité des BFUPs en ce qui concerne la durabilité;
- caractériser et d'identifier les méthodes d'essais pertinentes et la durabilité relativement à la corrosion des fibres d'acier à l'intérieur du matériau et celle par rapport au renforcement (barres d'armature) :
 - identifier les méthodes d'essais et paramètres d'essais pertinents à réaliser en lien avec la durabilité face à la corrosion comme la teneur en ions chlorure et la perméabilité aux ions chlorure;
 - identifier les problématiques et impacts, tant au niveau des matériaux qu'au niveau des structures, de la corrosion des fibres à l'intérieur du BFUP;
 - identifier les critères à utiliser dans les devis afin d'évaluer le BFUP en ce qui concernera le risque de corrosion.

1.2 Description des essais effectués et limites du projet

Les essais réalisés dans le cadre de ce projet ont été établis conjointement avec le responsable du projet du Ministère en 2018. Il convient de noter que la norme canadienne (CSA A23.1) était en cours de rédaction lors des essais, et donc les essais réalisés s'approchent de ceux proposés dans le code canadien, sans toutefois y être nécessairement identiques.

Les essais ont été séparés en 2 catégories ; les essais mécaniques et les essais de durabilité. Cette séparation est également utilisée tout au long de ce rapport. Les essais inclus et effectués dans ce projet de recherche sont les suivants :

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

- Mesure des propriétés mécaniques :
 1. essai de résistance à la compression;
 2. essai de module élastique;
 3. essai de résistance à la flexion à 3 points sur prismes entaillés (3PBT);
 4. essai de résistance à la flexion à 4 points sur prismes non entaillés (4PBT);
 5. essai de résistance à la flexion à 4 points sur dalles minces (4PBT-DM);
 6. essai de résistance à la traction directe;
- Mesure des caractéristiques de durabilité :
 1. essai de la teneur en eau, de la densité, de l'absorption et de la porosité;
 2. essai de caractérisation du réseau de bulles d'air;
 3. essai de résistance à l'écaillage;
 4. essai de résistance aux cycles de gel-dégel;
 5. essai de retrait de séchage;
 6. essai de perméabilités aux ions chlorure;

Conjointement avec le Ministère, il a été établi pour le projet de recherche les critères et limites suivants :

- les produits testés doivent pouvoir être couramment utilisés ou être accessibles sur le territoire québécois;
- les produits étudiés dans ce projet sont pour certains en développement, pour d'autres disponibles depuis plusieurs années sur le marché québécois;
- le taux de fibres a été fixé à 2% en volume (fibres métalliques), sauf indication contraire, par exemple pour certains essais de migration accélérée du chlore;
- les gâchées relatives aux essais présentés dans ce rapport ont été effectuées exclusivement au laboratoire de l'Université Laval (sous supervision ou non des représentants des fournisseurs, à leur discrétion);
- sauf indication contraire, tous les essais ont été réalisés après au moins 28 jours de cure humide.

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

La revue de la littérature présentée dans les sections suivantes permet d'avoir une idée générale de ce qu'est un BFUP et son évolution au cours des dernières décennies. Les différentes normes sur le BFUP, en vigueur et à paraître, sont également présentées. Les essais proposés par ces documents sont comparés et permettent de ressortir les différences entre les essais retenus par les différentes normes.

2.1 Généralités

2.1.1 Description et composition d'un BFUP

2.1.1.1 Évolution des BFUP

Le BFUP tel qu'utilisé aujourd'hui vient de plusieurs décennies de recherche visant à l'optimisation du béton ordinaire. Il est possible de résumer le passage du béton ordinaire au BFUP selon différentes étapes : l'optimisation de la matrice cimentaire en maximisant la compaction, l'utilisation des fibres d'acier et l'amélioration du lien à l'interface de la fibre et de la matrice. Dans les années 1970, la compréhension de la réaction d'hydratation et de la structure des gels s'améliore. La résistance du béton s'élève jusqu'à 50 MPa. Ensuite, dans les années 1980, la fluidité des bétons est augmentée et le rapport E/C est réduit, améliorant les propriétés mécaniques. Des bétons à haute performance sont disponibles ayant des résistances entre 60 et 80 MPa. À l'aide d'agrégats spéciaux particulièrement fins et d'une cure spéciale, des résistances allant jusqu'à 120 MPa sont atteintes. Dans les années 1990, il y a un accroissement du développement des adjuvants et de plus en plus d'ajouts cimentaires sont utilisés en remplacement d'une partie du ciment. Des bétons à ultra-haute performance se distinguent par leur haute densité, leur faible porosité et rapport E/C avec les propriétés des BFUPs tel qu'on les connaît aujourd'hui. Finalement, à partir des années 2000, plusieurs études ont été faites pour optimiser le matériau et pour améliorer la compréhension de ses propriétés (Naaman et Wille 2012).

2.1.1.2 Composition d'un BFUP

Les BFUPs sont un type particulier de béton, même si sa composition relève davantage des matériaux composites que des bétons traditionnels. Sa composition se base généralement sur 4 composantes différentes, soit les matériaux cimentaires et granulaires, l'eau, les fibres ainsi que les divers adjuvants. Le ratio des divers éléments varie quelque peu selon les divers fournisseurs de BFUP.

2.1.1.2.1 Matériaux cimentaires et granulaires

Les matériaux cimentaires, souvent livrés prépesés et prémélangés en sacs de 25 à 30 kg, se composent majoritairement de ciment et de matériau granulaire. Divers ajouts cimentaires sont également ajoutés pour permettre d'obtenir les caractéristiques mécaniques typiques des BFUPs. Ces ajouts comprennent généralement des cendres volantes, de la fumée de silice ou encore du laitier de haut-fourneau. Les matériaux granulaires sont composés de sable de quartz broyés. Dans la pratique, la dimension maximale des

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

particules est généralement inférieure à 10 mm, pour que le mélange soit facilement réalisable dans les malaxeurs à hautes énergies de rotation (usure des pales).

2.1.1.2.2 Eau

L'eau est utilisée de façon beaucoup plus réduite dans le BFUP, comparativement au béton conventionnel. Des rapports E/L de 0,2 ou moins (Resplendino 2006) sont généralement visés dans le cadre du BFUP, alors que des ratios E/L de 0,42 sont communs dans la confection des bétons. Des mélanges eau-glace sont aussi parfois utilisés afin de diminuer l'élévation de température du mélange lors du malaxage, principalement par temps chaud.

2.1.1.2.3 Fibres

Les fibres incorporées dans le mélange, lors du malaxage, peuvent se composer d'acier ou de matières polymères (fibres polypropylène, fibres de carbone). Les dimensions et caractéristiques mécaniques des fibres varient également selon les fournisseurs de BFUP. Présentement, la longueur moyenne des fibres utilisées se situe entre 12 et 15 mm. Certains BFUP utilisent des fibres d'une longueur supérieure à 15 mm. Différents types de fibres peuvent être ajoutés dans un même mélange.

2.1.1.2.4 Adjuvants

Plusieurs adjuvants différents peuvent entrer dans la composition du BFUP, selon les propriétés recherchées du matériau final. Étant donné la faible quantité d'eau utilisée, un réducteur d'eau à grande portée (superplastifiant) est généralement ajouté. L'utilisation d'agent entraîneur d'air n'est pas recommandé puisque les recettes favorisent une étanchéité par une optimisation des parts granulaires diminuant la porosité, favorisant l'étanchéité et la résistance du matériau. L'ajout de bulles d'air diminue ainsi la résistance à la compression et traction des BFUP.

2.1.2 Caractérisation et propriétés d'un BFUP

2.1.2.1 Propriétés mécaniques

Le BFUP est un matériau reconnu pour sa très grande résistance en compression (Figure 1 et Figure 2), autant au jeune âge qu'à maturité. Selon les différentes normes nationales en vigueur à ce jour, une résistance minimale de 120 MPa à 28 jours est nécessaire afin de catégoriser le matériau comme un BFUP. La résistance peut également s'élever à plus de 200 MPa selon le type de cure. Au jeune âge (de 4 à 7 jours), la résistance est aussi généralement très élevée, soit entre 70 et 90 MPa. Les fibres d'acier, présentes dans le matériau, ont très peu d'influence sur la résistance en compression. Cependant, elles modifient grandement le comportement post-pic. Les fibres permettent d'obtenir un comportement plus ductile plutôt qu'une rupture fragile, comme c'est le cas pour le béton ordinaire en traction. Le module de Young du BFUP se situe généralement entre 45 et 55 GPa. La présence de fibres n'a pas une influence significative sur la valeur du module de Young et sur la résistance maximale en compression (Fehling et al. 2014).

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

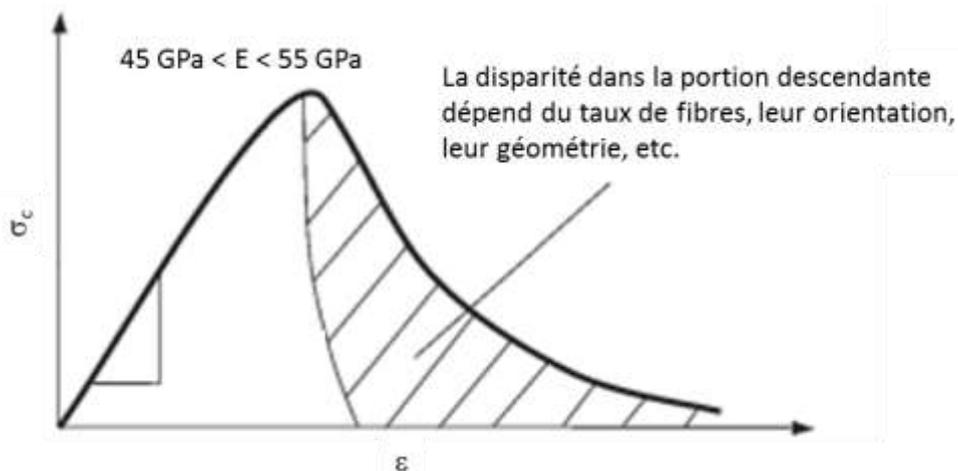


Figure 1 Comportement contrainte en compression vs. Déformation (schématisé) du béton à ultra-haute performance (UHPC) avec une variation du comportement dans la phase descendante, dépendant du taux de fibres, le type utilisés et l'orientation.

Source : Traduction libre de (Fehling et al. 2014)

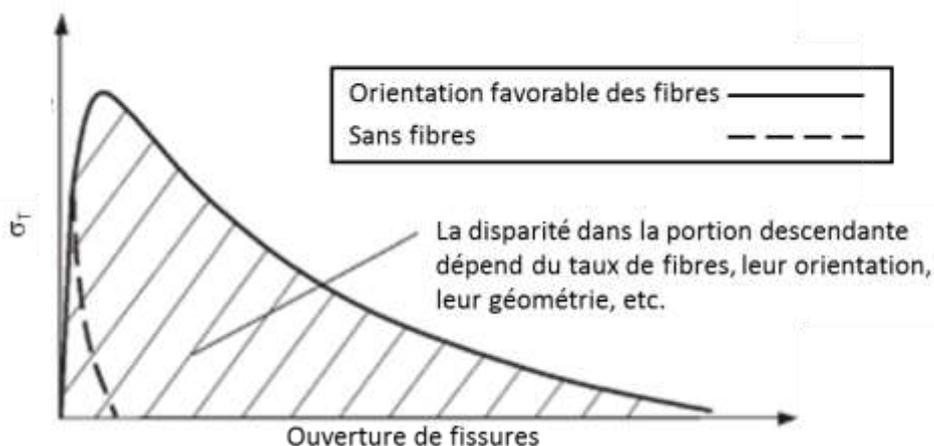


Figure 2 Comportement typique Contrainte vs. Ouverture de fissures pour le béton à ultra-haute performance (UHPC) dans un essai de traction.

Source : Traduction libre de (Fehling et al. 2014)

L'utilisation de fibres permet également d'augmenter la résistance à la traction directe. Celle-ci se situe entre 6 et 10 MPa, avec un comportement ductile dans la phase de fissuration. Le type de fibres, de même que la quantité présente dans le matériau et son orientation par rapport aux efforts de traction, ont une influence importante dans le comportement à la traction du matériau. Trois types de comportement en traction directe sont généralement observés et décrits dans la recommandation de l'AFGC : un comportement écrouissant, résultant d'un béton fortement fibré, un

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

comportement peu écrouissant, correspondant à une forte proportion des BFUPs actuellement disponible, et un comportement adoucissant, pour des matériaux peu fibrés ou dont les fibres sont inefficaces (AFGC).

2.1.2.2 Durabilité

En plus des propriétés mécaniques supérieures aux bétons conventionnels, les BFUPs se démarquent également pour ce qui est de leur durabilité. Le faible rapport E/C et l'utilisation de fines particules permettent d'obtenir un matériau à densité élevée et à faible porosité. Ces caractéristiques sont responsables de la durabilité importante du matériau. Le coefficient de diffusion des ions chlorure pour le BFUP est généralement de l'ordre de 10^{-13} m²/s (AFGC). Également, les résultats de pénétration des ions chlorure obtenus par des essais suivant la norme ASTM C1202 sont négligeables selon la définition donnée par la norme. (B. Graybeal et Tanesi 2007) (T. M. Ahlborn et al. 2008)

Le BFUP présente aussi une résistance élevée au gel-dégel ainsi qu'à l'écaillage. Les échantillons de BFUP soumis à des essais de gel-dégel suivant la norme ASTM C666 présentent peu de dégradation de surface. De plus, une augmentation du module dynamique relatif (RDM) et de la masse des échantillons est généralement observée. Cette augmentation de la masse s'explique par le fait qu'une portion du ciment non hydraté s'hydrate au cours de l'essai (B. Graybeal et Tanesi 2007) (T. M. Ahlborn et al. 2008). Plus de détails sont donnés à la section 2.11 concernant ces essais. Pour ce qui est de l'écaillage, les études réalisées démontrent que la perte de masse de surface est largement inférieure aux limites proposées par les normes (Abbas et al. 2016).

Le document de recommandations de l'AFGC indique que la porosité à l'eau du BFUP se situe entre 1,5% et 5% et la perméabilité à l'oxygène est inférieure à 10^{-19} m². Ces valeurs indicatives sont obtenues par des essais présentés par une recommandation AFREM (AFGC). Le Tableau 1 présente un comparatif entre les valeurs de porosité à l'eau pour différents types de béton, ainsi que les valeurs pour la perméabilité à l'oxygène.

Tableau 1 Coefficient de diffusion des ions chlorure, porosité accessible à l'eau et perméabilité à l'oxygène, données indicatives selon l'AFGC

Essais	BO	BHP	BTHP	BFUP
Coefficient de diffusion des ions chlorure (m ² /s)	> 10^{-11}	10^{-12} à 10^{-11}	10^{-13} à 10^{-12}	10^{-13}
Porosité à l'eau (%)	14 - 20	10 - 13	6 - 9	1,5 - 5
Perméabilité à l'oxygène (m ²)	10^{-16}	10^{-17}	10^{-18}	10^{-19}

Source : (AFGC)

2.1.3 Revue des normes et recommandations sur le BFUP

2.1.3.1 Norme française

À la suite de la publication des recommandations de l'AFGC portant sur les BFUPs, trois documents sont élaborés pour la norme française. Le premier document, publié en 2016, porte sur la spécification, la performance, la

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

production et la conformité des BFUPs (NF P18-470). Un deuxième document, également publié en 2016, porte sur les règles spécifiques pour le calcul des structures en BFUP (NF P18-710) et complète l'Eurocode 2. Le dernier document, lequel sera publié en 2019, portera sur l'exécution des structures en BFUP (NF P18-451).

Les BFUPs sont définis comme étant des bétons dont la dimension nominale supérieure du plus gros granulats est inférieure ou égale à 10 mm, utilisant des fibres métalliques ou non métalliques et ayant une densité entre 2 200 kg/m³ et 2 800 kg/m³. Les BFUPs doivent présenter, à 28 jours, une résistance à la compression supérieure à 130 MPa, une valeur caractéristique de limite d'élasticité en traction supérieure à 6 MPa et un comportement ductile en traction. Les BFUPs doivent également satisfaire à des exigences quant à la durabilité. La porosité à l'eau doit être inférieure à 9%, le coefficient de diffusion des ions chlorure à 90 jours inférieur à 0.5x10⁻¹² m²/s et la perméabilité apparente au gaz à 90 jours inférieure à 9x10⁻¹⁹ m².

La norme NF P 18-470 donne des précisions pour les essais suivants :

- essai de résistance à la compression;
- essai de module élastique;
- essai du coefficient de Poisson;
- essai de résistance à la flexion à 3 points sur prismes entaillés (3PBT);
- essai de résistance à la flexion à 4 points sur prismes non entaillés (4PBT);
- essai de résistance à la flexion à 4 points sur dalles minces (4PBT-DM);
- mesure des facteurs d'orientation K ;
- essais d'abrasion hydraulique;
- mesure du coefficient de diffusion des ions chlorure ;
- essai de perméabilité apparente aux gaz.

2.1.3.2 Norme suisse

Publiée en 2016, la norme suisse SIA 2052 porte sur le dimensionnement et l'exécution des structures comportant des éléments en BFUP. Le Tableau 2 présente les propriétés des BFUPs tel que défini par la norme SIA 2052.

La norme SIA 2052 donne des indications pour les essais suivants :

- essai de résistance à la compression;
- essai de module élastique;
- essai de résistance à la traction directe;
- essai d'absorption d'eau.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

**Tableau 2 Valeurs typiques de propriétés du BFUP selon
la norme SIA 2052**

Propriété	Désignation	Valeur typique (à 28 jours)
Module d'élasticité (traction / compression)	E_U	40 – 60 GPa
Coefficient de Poisson	ν_U	0,2
Résistance à la compression	f_{Uc}	120 – 200 MPa
Résistance limite élastique à la traction	f_{Ute}	7 – 12 MPa
Résistance à la traction	f_{UtU}	7 – 15 MPa
Déformation lorsque la résistance à la traction est atteinte (écrouissage)	ϵ_{UtU}	0 – 3,5 ‰
Énergie spécifique de rupture	G_{FU}	15 – 25 kJ/m ²
Coefficient de dilatation thermique	α_U	10 ⁻⁵ / °C
Valeur finale du retrait	$\epsilon_{Us\alpha}$	sans traitement thermique : 0,6 – 0,8 ‰ avec traitement thermique : 0 ‰
Coefficient final de fluage	$\epsilon_{U\infty}$	sans traitement thermique : 1,5 ($t_0 = 7$ jours); 0,8 – 1,0 ($t_0 = 28$ jours) avec traitement thermique : 0,2 – 0,4
Masse volumique du BFUP durci	ρ_U	2300 - 2700 kg/m ³

Source : (SIA 2016)

2.1.3.3 Norme américaine

La norme ASTM C1856, publiée en 2017, porte sur la fabrication et l'essai en laboratoire du BFUP. Le BFUP y est défini comme un matériau ayant des granulats dont la dimension nominale maximale est inférieure à 5 mm, une résistance en compression supérieure à 120 MPa et un étalement entre 200 et 250 mm.

La norme ASTM C1856 donne des indications pour les essais suivants :

- essai de résistance à la compression;
- essai de module élastique;
- essai du coefficient de Poisson;
- essai de fluage en compression ;
- essai de résistance à la flexion à 4 points sur prismes non entaillés (4PBT);
- essai de résistance à l'abrasion ;
- essai de résistance aux cycles de gel-dégel;
- essai de perméabilités aux ions chlorure.

2.1.3.4 Norme canadienne

Depuis 2019, le Canada s'est doté de normes encadrant la caractérisation du BFUP, de même que le dimensionnement d'éléments selon les états limite de service (SLS) et ultime (ULS). Les normes encadrant l'utilisation du BFUP sont comprises dans deux annexes particulières, soit l'annexe U de la norme CSA A23.1 de même que l'annexe A8.1 de la norme CSA S6.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

L'annexe U de la norme CSA A23.1 Béton : Constituants et exécution des travaux inclut notamment les sections suivantes :

- caractérisation des propriétés à l'état frais et de consistance;
 - essai de mesure de l'étalement (Section U.4.1.4)
- caractérisation des propriétés mécaniques (Section U.4.1.2);
 - essai de résistance à la compression (Clause U.4.1.2.1)
 - essai de module élastique et du coefficient de Poisson (Clause U.4.1.3)
 - essai de résistance à la traction (Clause U.4.1.2.2)
- caractérisation des caractéristiques de durabilité (Section U.4.1.8);
 - essai d'abrasion (Clause U.4.1.8.2)
 - essai de résistance à l'écaillage (Clause U.4.1.8.3)
 - essai d'absorption (Clause U.4.1.8.4)
 - essai de perméabilité aux ions chlorure (Clause U.4.1.8.5)
 - essai de résistance aux sulfates (Clause U.4.1.8.6)
 - essai de caractérisation de la formation d'ettringite différée (Clause U.4.1.8.7)
- fabrication et coulée des échantillons (Section U.4.1.5);
- conditions de cure et traitements thermiques applicable (Section U.4.1.6);
- propriétés au feu (Section U.4.1.7);
- caractérisation de la stabilité dimensionnelle (Section U.4.1.9);
 - essai de fluage (Clause U.4.1.9.1)
 - essai de retrait (U.4.1.9.2)
 - coefficient d'expansion thermique (U.4.1.9.3)

La norme CSA A23.1 propose aussi différentes classifications des BFUPs, dépendamment des résultats obtenus selon les essais proposés. Les différentes classifications sont les suivantes :

- résistance à la compression (valeur caractéristique), voir Tableau 3:
 - BFUP 120: résistance minimale de 120 MPa
 - BFUP 150: résistance minimale de 150 MPa

**Tableau 3 Résistance minimale requise en compression
selon les différentes catégories**

Catégorie	Résistance minimale en compression (MPa)
120	120
150	150

Source : (Canadian Standards Association 2019a) (Tableau U.1)

- résistance à la traction (directe ou indirecte), voir Tableau 4:
 - BFUP écrouissant
 - BFUP adoucissant
 - BFUP non fibré (ou béton ultra-haute performance, BUP)

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

Tableau 4 Paramètres de la loi de traction et classification des BFUPs

Propriété	Paramètre	Écrouissant (H)	Adoucissant (S)	Non fibré (N)
Résistance de première fissuration en traction (MPa)	f_{cr}	≥ 5.0	≥ 4.0	≥ 4.0
Ratio d'écrouissage	f_{tu} / f_{cr}	≥ 1.1	N.A.	N.A.
Déformation à l'ultime (%)	ε_{tu}	≥ 0.1	N.A.	N.A.
Résistance post-fissuration (MPa)	f_{ti}	Voir Clause U.4.1.2.2.7	Voir Clause U.4.1.2.2.8	N.A.

Source : (Canadian Standards Association 2019a) (Tableau U.3)

- caractérisation de la durabilité (limite de durabilité), voir Tableau 5:
 - DL50
 - DL100
 - DL200

Tableau 5 Critères pour la classification du potentiel de durabilité des BFUPs

	Perte à l'abrasion (g)	Écaillage (kg/m ²)	Absorption (%)	Perméabilité aux ions chlorure (Coulombs)	Résistance aux sulfates (% expansion)
Norme ou essai utilisé	ASTM C944	CSA A23.2-22C	CSA A23.2-11C	CSA A23.2-23C	CSA A3004
DL50	< 5.0	< 0.4	< 3.0	< 500	< 0.05
DL100	< 1.0	< 0.2	< 3.0	< 300	< 0.05
DL200	< 0.5	< 0.1	< 3.0	< 100	< 0.05

Source : (Canadian Standards Association 2019a) (Tableau U.4)

L'annexe A8.1 de la norme canadienne CSA S6 Code canadien pour le calcul des ponts routiers propose les sections suivantes pour la caractérisation des bétons fibrés (incluant les BFUP) :

- caractérisation des propriétés mécaniques;
 - essai de résistance à la compression (A8.1.4.4)
 - essai de module élastique (A8.1.4.7)
 - essai de résistance à la traction (A8.1.4.5)
- caractérisation de la stabilité dimensionnelle;
 - essai de fluage (A8.1.4.9)
 - essai de retrait (A8.1.4.8)

2.1.3.5 Recommandation JSCE

En 2008, la *Japan Society of Civil Engineers* (Japan Society of Civil Engineers 2008), publie un document de recommandations concernant la conception et la construction de structures en BFUP. Pour être considéré

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

comme un BFUP, le matériau doit être préparé selon la méthode proposée par le document, avoir une déformation ultime en traction supérieure à 0,5% et une ouverture de fissure moyenne inférieure à 0,2 mm. La déformation ultime en traction et l'ouverture de fissure moyenne sont obtenues en suivant les recommandations du document. Le matériau doit également avoir un comportement écrouissant en traction.

Le document de recommandations de la JSCE donne des indications pour les essais suivants :

- essai de résistance à la compression;
- essai de module élastique;
- essai de résistance à la traction directe;
- essai pour déterminer l'ouverture de fissure moyenne et maximale;
- vérification de la corrosion de l'acier par la carbonatation;
- vérification de la corrosion de l'acier par les ions chlorure;
- vérification des dommages occasionnés par le gel-dégel
- essai de perméabilité à l'eau;
- essai de résistance aux attaques chimiques;
- vérification de la réaction alcali-granulat.

Le document consulté est particulièrement incomplet dans les protocoles d'essai proposés, et une nouvelle norme devrait venir compléter ce document afin de faciliter son utilisation.

2.1.3.6 Recommandation australienne

En 2000, un document préparé par Gowripalan et Gilbert est publié ayant pour but de donner une ligne directrice quant à la conception de poutres précontraintes en BFUP.

2.1.3.7 Autres documents en cours de rédaction

Une directive pour le BFUP est en cours d'écriture par le comité allemand du béton (DAfStb), laquelle comportera deux parties. La première partie portera sur le calcul des structures en BFUP et la seconde sur la technologie du matériau et le contrôle de la qualité de celui-ci. La directive considère trois classes de BFUP en fonction de la résistance en compression, soit 130 MPa, 150 MPa et 175 MPa (Schmidt et al. 2017).

2.2 Comparatif des essais pour le BFUP

Les sous-sections suivantes présentent un comparatif de plusieurs normes, recherches ou publications portant sur différents essais effectués sur le BFUP ou, le cas échéant, sur le BRF (Tableau 6). Une comparaison des points principaux des méthodes d'essai est présentée pour les essais suivants :

- essai de résistance à la compression;
- essai de module élastique et du coefficient de Poisson;
- essai de résistance à la traction directe;
- essai de résistance à la traction directe par flexion;
- essai d'étalement;

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

- essai de mesure du retrait;
- essai de fluage en compression;
- essai de résistance aux cycles de gel-dégel;
- essai de résistance à l'abrasion;
- essai de perméabilités aux ions chlorure;
- essai de porosité à l'eau;
- essai de perméabilité à l'oxygène.

Une revue pertinente des différents essais comparés ou encore une présentation de différents résultats obtenus avec ces procédures d'essai est fournie à certaines sous-sections, lorsque jugé nécessaire. Plusieurs des essais présentés à la section 3 sont une modification d'essais utilisés pour la caractérisation du béton conventionnel. Ces procédures sont elles-mêmes décrites à la section 4.

2.3 Propriétés générales

Tableau 6 Propriétés générales indicatives pour un BFUP typique

Référence	NF P18-470	SIA 2052	FHWA-HRT-13-060	FHWA-HRT-06-103	Design of UHPC
Module élastique (GPa)	45 – 65	40 – 60	40 – 70	55 – 58,5	51
Résistance moyenne en compression (MPa)	160 – 230	120 – 200	140 – 200	180 – 225	180
Résistance moyenne en traction (MPa)	7 – 12	7 – 15	6 – 10		11,7
Résistance moyenne en traction à la limite de proportionnalité (MPa)	8 – 12	7 – 12			9
Coefficient de dilatation thermique	11 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$	$10^{-5} / ^\circ\text{C}$	$10^{-5} - 15^{-5} / ^\circ\text{C}$		
Coefficient de Poisson		0,2	0,2		
Coefficient de fluage		STT : 1,5 (7 jrs) 0,8 – 1,0 (28 jrs) ATT : 0,2 – 0,4	0,2 – 0,8	0,2 – 0,5	0,78
Masse volumique moyenne (kg/m^3)		2300 – 2700		2440 – 2550	
Énergie spécifique de rupture (kJ/m^2)		15 – 25			
Diffusion ions chlorure (m^2/s)				19×10^{-14}	
Résistance au gel-dégel (RDM)				100%	
Résistance à l'écaillage (kg/m^2)				< 0,012	
Pénétration de carbonatation (mm)				< 0,5	2,5 – 5,0
Pénétration des ions chlorure (mm)					1

Source: (AFNOR 2016), (SIA 2016), (Benjamin A. Graybeal et Russell 2013), (Benjamin A. Graybeal 2006), (Sritharan 2015)

2.4 Essai de résistance à la compression

La résistance en compression du BFUP est une des propriétés mécaniques les plus étudiées et testées jusqu'à présent. De nombreuses normes nationales incluent, dans leurs annexes respectives sur la caractérisation du BFUP, un protocole d'essai pour déterminer la résistance en compression. Ce protocole consiste généralement en une version légèrement modifiée du protocole standard de compression pour le béton conventionnel. Les normes les plus souvent utilisées, comme référence, incluent la norme américaine ASTM C39 ainsi que la norme européenne NF EN 12390-3.

Règle générale, les essais de compression se font sur des cylindres, bien que certaines normes permettent de procéder à des essais sur des cubes ou encore des prismes. Les dimensions les plus couramment utilisées sont les cylindres de dimensions nominales 75 mm x 150 mm (3" x 6") et de 100 mm x 200 mm (4" x 8") et les cubes de dimensions nominales 50 mm et 70 mm. La valeur des différents coefficients de transformation indique que le changement dans les dimensions des échantillons semble avoir très peu d'effet sur la résistance obtenue. Cette flexibilité permet aussi d'accommoder différentes capacités de presses; puisque le BFUP a une très grande résistance en compression, l'utilisation d'échantillons cylindriques standards (100 mm x 200 mm) peut entraîner une force de rupture nécessaire excédant la capacité de la presse. Par exemple, l'utilisation d'échantillons ayant les dimensions recommandées par l'ASTM C1856 (75 mm x 150 mm) plutôt que les dimensions standards américaines (ASTM C39) pour du béton conventionnel (100 mm x 200 mm) nécessite une force de compression près de 40% moindre, pour une même résistance du matériau.

Les taux de chargement de la presse sont aussi très variables, passant de 0,4 MPa/s à 1 MPa/s. La variabilité du matériau est plus importante que l'effet du taux de chargement. En ce sens, un taux de chargement de 1 MPa/s, tel que recommandé par la norme ASTM C1856 et la recommandation de l'AFGC, est un compromis idéal entre une durée d'essai acceptable et des résultats non biaisés (Tableau 7).

En plus des normes nationales et des recommandations, de nombreux auteurs ou organismes proposent l'utilisation de facteurs de conversion pour convertir les différentes dimensions d'échantillons.

Tableau 7 Comparatif des essais de résistance à la compression sur le BFUP

	NF P18-470	SIA 2052	ACI 544.9R-17	ASTM C1856	(HPFRCC) - JSCE	FHWA-HRT-13-060
Nombre d'échantillons	3	3	N.S	N.S.	3	N.S
Dimensions (mm)	Cylindre, avec $L_f \leq 22$: $\phi = 110$ $L = 220$ Cylindre, avec $L_f > 22$: $\phi = 160$ $L = 320$	Cylindre: $\phi = 70$ $L = 140$ Cube de 100 mm de côté Prisme: $b = 40$ $l = 40$ $L = 160$	Cylindre: $\phi = 100$ $L = 200$ Cylindre: $\phi = 150$ $L = 300$	Cylindre: $\phi = 75$ $L = 150$	Cylindre: $\phi = 50$ $L = 100$ Cylindre: $\phi = 100$ $L = 200$	Cylindre: $\phi = 75$ $L = 150$ Cylindre: $\phi = 100$ $L = 200$ Cube, arête de 50, 70 ou 100
Taux de chargement (MPa/s)	0,4 – 0,8	N.S.	N.S.	1	N.S.	1
Référence	NF EN 12390-3	N.S.	N.S.	ASTM C39	N.S.	ASTM C39, C109

Source: (AFNOR 2016), (SIA 2016), (ACI Committee 544 2017), (ASTM 2017a), (Japan Society of Civil Engineers 2008), (Benjamin A. Graybeal et Russell 2013)

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

Les essais en compression sur le BFUP sont majoritairement effectués sur des échantillons cylindriques de dimensions variables, bien que de nombreux auteurs proposent des facteurs de conversion pour comparer les résultats d'essais sur des échantillons cylindriques aux cubiques. De nombreux facteurs sont également proposés pour comparer les différentes dimensions des cylindres ou des cubes. Ces différents facteurs, provenant d'un grand nombre d'échantillonnage, permettent de rendre l'essai en compression beaucoup plus flexible, en passant par différentes dimensions. Plusieurs publications particulières proposent des facteurs de conversion (Tableau 8) pour les BFUPs (Benjamin A. Graybeal 2014; Schmidt et Fröhlich 2015; Kusumawardaningsih et al. 2015) (Benjamin A. Graybeal et Russell 2013).

Tableau 8 Facteurs de conversion pour les essais de résistance à la compression sur le BFUP

Facteurs de conversion	1	2	3	4
Cyl. 150x300 > Cyl. 100x200		1,04	0,85 – 0,95	
Cyl. 150x300 > Cube 100		0,96		
Cyl. 150x300 > Cube 150		0,90		
Cyl. 100x200 > Cube 100	0,89 - 0,94*	0,93		1,00
Cyl. 70x140 > Cyl. 100x200			1,05 – 1,15	
Cyl. 75x150 > Cyl. 100x200				0,99
Cube 70,7 > Cyl. 100x200				0,93
Cube 50,8 > Cyl. 100x200				0,96
Cube 100 > Cyl. 75x150				1,00
Cube 70,7 > Cyl. 75x150				0,94
Cube 50,8 > Cyl. 75x150				0,96
* Pour des taux de fibres de 0% (0,89) à 2 % (0,94)				
1 : UHPC compressive specimens				
2 : UHPC From Research to Standardization: European Approaches				
3 : FHWA-HRT-13-060				
4 : Compression Testing of UHPC				

Source: (Schmidt et Fröhlich 2015), (Benjamin A. Graybeal et Russell 2013), (Benjamin A. Graybeal 2014), (Kusumawardaningsih et al. 2015)

2.5 Essai de module élastique et du coefficient de Poisson

Les essais de module élastique sur le BFUP (Tableau 9) sont peu représentés dans la littérature scientifique consultée. Les normes européennes française et suisse basent leurs essais sur les normes NF EN 12390-3 et NF EN 12390-13, soit des normes d'essai utilisées pour le béton conventionnel. La nouvelle norme américaine ASTM C1856 propose l'utilisation de cylindres de dimensions nominales 3" x 6" (75 mm x 150 mm) et un taux de chargement de 1 MPa/s, soit des conditions d'essai similaires à celles recommandées pour l'essai de compression, en modification à la norme pour le béton ordinaire (ASTM C469). Le rapport de la FHWA (Benjamin A. Graybeal et Russell 2013) fait état d'essais de module élastique selon la même norme standard (ASTM C469).

Tableau 9 Comparatif des essais de détermination du module élastique sur le BFUP

	NF P18-470	SIA 2052	ASTM C1856	FHWA-HRT-13-060
Modifications par rapport à la norme de référence (Dimension en mm)	Cycles de charge-décharges jusqu'à 30% de la charge maximale	Essais sur 6 échantillons	Cylindre: $\phi = 75$ $L = 150$ Chargement à 1 MPa/s	Âge lors de l'essai compris entre 1 et 56 jours
Référence	NF EN 12390-3 NF EN 12390-13	NF EN 12390-3 NF EN 12390-13	ASTM C469	ASTM C469

Source : (AFNOR 2016), (SIA 2016), (ASTM 2017a), (Benjamin A. Graybeal et Russell 2013)

2.6 Essai de résistance à la traction directe

L'essai de traction directe pour le BFUP est l'un des essais les plus présents dans la littérature scientifique portant sur la normalisation des bétons fibrés à ultra-hautes performances, bien que très peu de normes l'utilisent de façon officielle (Tableau 10). La difficulté d'avoir un essai représentatif en minimisant les moments parasites dans l'échantillon, c'est-à-dire d'avoir un élément en traction pure tout au long de l'essai, rend ce type d'essai particulièrement complexe. La grande variété dans le dimensionnement et la forme des échantillons, dans les taux de chargement, ainsi que dans les conditions d'appuis des échantillons fait en sorte qu'il s'agit d'un essai très différent d'une référence à l'autre. La forme la plus commune, dont une des variantes est adoptée par la norme suisse SIA (Figure 3), consiste en une forme d'os dite « *dogbone* », un prisme rectangulaire très mince, par rapport à sa longueur, et dont la largeur se réduit progressivement à mi-longueur, tel qu'illustrée à la Figure 4. La partie de transition entre les extrémités et la section centrale est conçue de façon à minimiser la concentration des contraintes, ce qui pourrait entraîner des résultats erronés comparativement à la résistance réelle du matériau.

La société japonaise de génie civil (Japan Society of Civil Engineers 2008) et le conseil national de la recherche italien, dans son document (Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction 2007), propose une dimension d'échantillon similaire à celui de la norme suisse, avec quelques modifications concernant la forme, surtout dans la zone de transition. Très peu de détails sont fournis par rapport à ces essais, autre que la forme caractéristique de l'échantillon, de même que les conditions de retenues aux extrémités.

La version préliminaire du code des ponts australien (Stephen Foster 2017), présente une version modifiée de l'essai de traction directe de la norme suisse. L'échantillon a une forme beaucoup plus massive que celui de la norme SIA, avec une épaisseur de 125 mm comparativement à 30 mm pour la norme suisse. De plus, la zone centrale ne présente qu'une très faible zone de fissuration possible; l'essai suisse présente une grande zone centrale de dimensions constantes où une multi-fissuration peut se produire,

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

comparativement à l'essai australien où la zone centrale est très courte. Très peu de détails sont donnés pour cet essai, encore en développement.

Graybeal propose aussi une procédure d'essai de traction directe pour le BFUP, développée et validée dans son article (Benjamin A. Graybeal et Baby 2013). Plutôt que d'utiliser un échantillon cintré comme les normes suisses et japonaises, un échantillon prismatique avec une section carrée de 50,8 mm (2") est privilégié. Deux longueurs ont été utilisées, soit 304,12 mm (12") et 431,8 mm (17"). Des plaques d'aluminium effilées sont collées sur deux surfaces parallèles, et l'échantillon est tenu en place par les mâchoires de la presse. La colle utilisée est une colle époxy à haute résistance de grade structural. La longueur d'ancrage correspond à la longueur directement comprise par les mâchoires de la presse alors que la longueur de transition est celle où les plaques d'aluminium se prolongent et s'effilent progressivement. 4 extensomètres sont placés dans la zone centrale, afin de déterminer précisément les déformations pendant l'essai de traction. Un taux de déplacement de 0,00254 mm/s est utilisé, et le chargement est maintenu jusqu'à une déformation enregistrée de 25 000 $\mu\epsilon$ ou une localisation de la fissure à l'extérieur de la zone de mesure. Le protocole d'essai proposé permet de différencier 4 phases dans le comportement de l'échantillon en traction directe, soit les phases élastiques, de multifissurations, l'ouverture de fissures et la localisation de la fissure principale. Graybeal conclut en recommandant l'utilisation des échantillons longs (431,8 mm) plutôt que les courts car l'influence des moments parasites s'y trouve moins importante avec ce type d'échantillons.

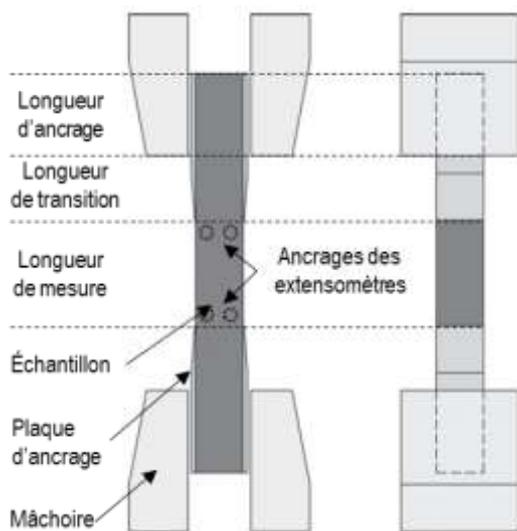


Figure 3 Disposition de l'essai de traction proposé par Graybeal
Source : (Benjamin A. Graybeal et Baby 2013)

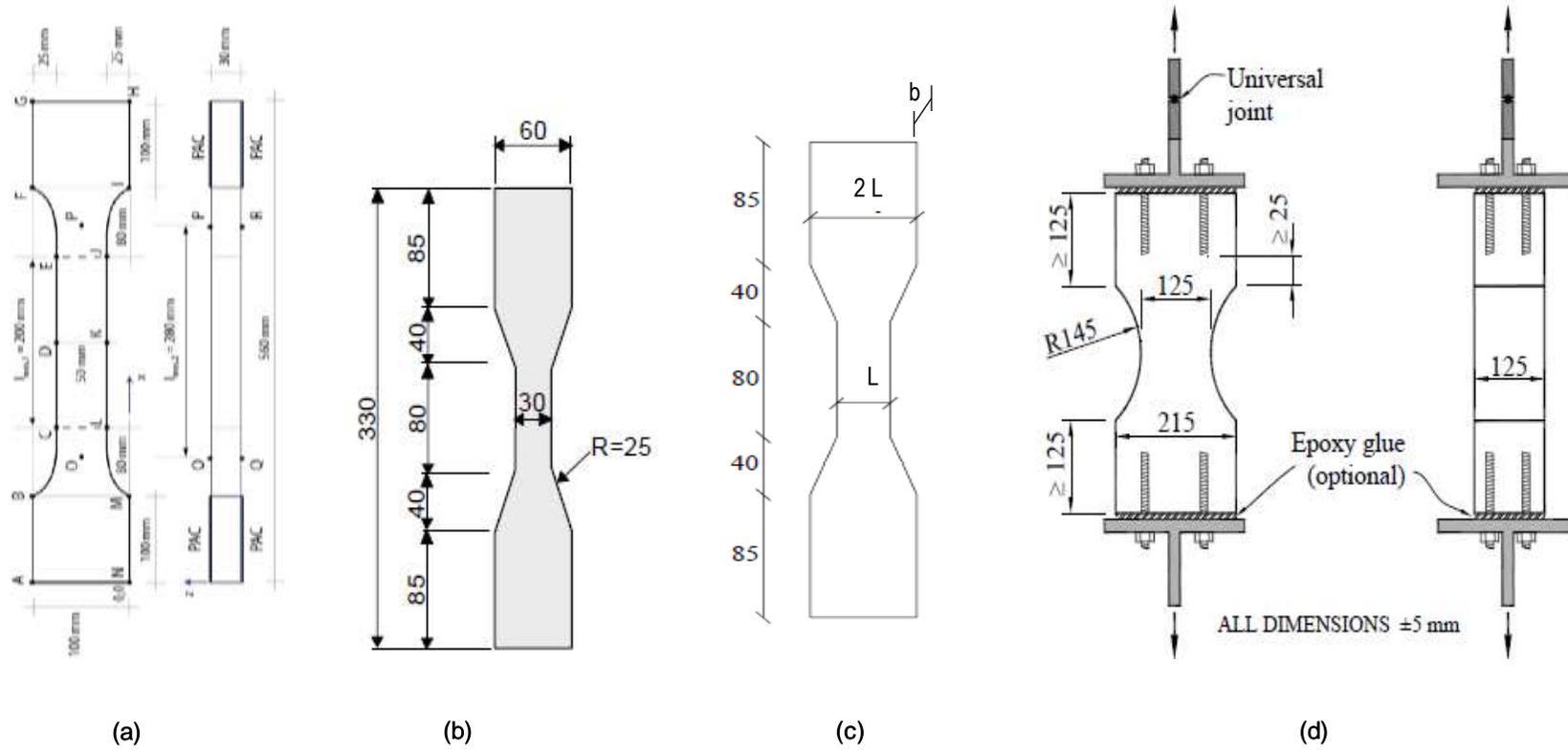


Figure 4 Dimensions des échantillons de l'essai de traction directe pour (a) la norme SIA (b) la recommandation (HPFRCC) – JSCE (c) le CNR-DT 204 et (d) FRC 2014

Source : (SIA 2016), (Japan Society of Civil Engineers 2008), (Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction 2007), (Stephen Foster 2017)

Tableau 10 Description des recommandations et normes de référence pour les essais de résistance à la traction directe sur le BFUP

	SIA 2052	(HPFRCC) – JSCE	CNR-DT 204	FRC 2014 – Australian
Nombre d'échantillons	6	Au moins 5 échantillons	N.S.	N.S.
Dimensions (mm)	Voir Figure 4	Voir Figure 4	Voir Figure 4 $b > \max(5D_{\max}, 13)$ $l > \max(5D_{\max}, 30)$	Voir Figure 4
Conditions d'extrémités	Encastrée-encastrée	Encastrée-rotulée	Rotulée-rotulée	Encastrée-rotulée
Procédure	<ol style="list-style-type: none"> Pour les 3 premiers échantillons, procéder à un chargement de 0,05 mm/min dans la phase élastique et écrouissante. Augmenter la vitesse jusqu'à 0,5 mm/min dans la phase adoucissante. Arrêter l'essai lorsque le déplacement atteint 10% de la longueur des fibres. Pour les 3 derniers échantillons, procéder à 3 cycles de charge-décharge jusqu'à une force équivalant à un tiers de la force maximale moyenne enregistrée au point 1. Poursuivre l'essai selon la procédure utilisée au point 1. 	<ol style="list-style-type: none"> Procéder avec un taux de chargement de 0,5 mm/min. 	<ol style="list-style-type: none"> Procéder avec un taux de chargement de 0,05 mm/min, selon le déplacement de la tête de charge ou du déplacement moyen enregistré par les capteurs. 	<ol style="list-style-type: none"> Procéder à l'essai avec un taux de chargement de 0,0025 mm/min.

Source : (SIA 2016), (Japan Society of Civil Engineers 2008), (Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction 2007), (Stephen Foster 2017)

2.6.1 Essai de résistance à la traction selon l'ACI 544.9R-17

Une revue rapide des différents essais mécaniques visant à déterminer la résistance en traction indirecte des bétons renforcés de fibres (BRF) est présente dans la publication de l'ACI (ACI Committee 544 2017). Bien que le comportement du BRF soit sensiblement différent de celui du BFUP, les différents tests présentés peuvent être envisagés pour la caractérisation du BFUP, moyennant davantage de recherche en ce sens (Tableau 11). Deux des recommandations tirées de l'analyse des divers essais effectués par différents chercheurs sont les suivantes: a) utilisation de prismes de sections circulaires ou prismatiques d'au moins 50 mm, 3 fois la longueur de la fibre, ou 6 fois le diamètre maximal des plus gros granulats et b) les extensomètres doivent avoir une plage de mesure d'au moins 2 à 3 fois la dimension maximale des plus gros granulats. De plus, l'utilisation de presses à cadre très rigide et fonctionnant avec un contrôle en boucle pour l'application de la charge est fortement conseillée. Les conditions d'appui des échantillons de part et d'autre sur la presse influencent aussi énormément les résultats; l'utilisation de conditions encastrées nécessite un alignement parfait et une rectification de l'échantillon afin de prévenir tout effort de flexion parasite.

La RILEM, dans ses publications parues respectivement en 2000 et 2001 (RILEM 2000; 2001), propose l'emploi d'un échantillon cylindrique de 150 mm de diamètre par 150 mm de longueur, entaillé à mi-section et collé aux plateaux de la presse par l'emploi de colle époxy pour déterminer la résistance directe à la traction. Colombo (Colombo, di Prisco, et Felicetti 2010) a utilisé un protocole similaire, et présenté à la Figure 5.

L'essai de fendage avec coin est un essai permettant de déterminer de façon indirecte la résistance en traction. (Löfgren, Stang, et Olesen 2004) ont déterminé que l'essai de fendage sur des cubes entaillés de 150 ou 200 mm d'arête permettent une caractérisation en traction adéquate pour des mélanges de béton fibré. Les résultats indiquent une meilleure répétabilité que pour les essais en traction directe ou que les essais de traction indirecte par flexion. Cet essai permet aussi une caractérisation du matériau avec un volume de béton inférieur aux essais sur poutres, et de l'équipement moins spécialisé que pour les essais de traction directe.

Une autre variante d'essai indirect est proposée par di Prisco et al., (di Prisco, Ferrara, et Lamperti 2013). L'essai de fendage double avec coins (EFDC) est un essai similaire à l'EFC, où un cube de béton renforcé de fibres est soumis à une charge de compression par le biais de coins insérés dans une entaille sur les surfaces inférieures et supérieures. Les conclusions des essais indiquent que l'essai est réalisable dans les phases pré et post-fissuration, autant pour des matériaux écrouissants qu'adouçissants. L'essai permet aussi facilement de tester différentes orientations des fibres à l'intérieure de la matrice cimentaire.

Un quatrième et dernier essai est proposé pour la caractérisation indirecte en traction de béton renforcé de fibres, l'essai de poinçonnement double type Barcelone. Tout comme les essais EFC et EFDC, l'essai DPBT consiste à mettre sous charge compressive un échantillon de béton renforcé de fibres, avec deux poinçons en acier centrés sur l'axe longitudinal de l'échantillon cylindrique. Bien que l'essai ne puisse fournir d'informations par rapport à la

relation contrainte – ouverture de fissures, il permet de déterminer l'énergie dissipée dans les lignes de fissurations, en plus de classer le matériau selon des critères de ténacité. Plusieurs chercheurs se sont dernièrement intéressés à cet essai, dont (Aire et al. 2015), (Blanco et al. 2014) et (Pujadas et al. 2016) qui se sont respectivement penchés sur l'effet de la dimension des échantillons sur les résultats de l'essai, l'élaboration de lois constitutives du matériau et finalement sur l'effet de l'orientation des fibres par rapport aux résultats de l'essai.

2.7 Essai de résistance à la traction directe par flexion

Les essais de résistance indirecte par flexion sont particulièrement nombreux dans la littérature dans les procédures d'essai des BFUPs. La principale raison de cette surreprésentation est qu'il s'agit de l'un des essais privilégiés pour la caractérisation en traction du BFUP. Cet essai est aussi suivi d'une procédure, itérative ou simplifiée, afin de déterminer la loi de traction du matériau. Cette procédure, appelée analyse inverse, est aussi très variable d'un auteur à l'autre. Les essais de flexion sont généralement séparés en trois catégories, soit les catégories suivantes :

- Flexion à 4 points sur poutres non entaillées (4PBT)
- Flexion à 3 points sur poutres entaillées (3PBT)
- Flexion à 4 points sur dalles minces (4PBT-DM)

Chacun de ces essais visent une caractérisation différente. Le 4PBT est utilisé sur des portées variant globalement entre 300 et 500 mm, avec des charges aux tiers points de la portée (Figure 11, Tableau 12). Cet essai permet de voir une multi fissuration dans la face en traction de l'échantillon, et donc de reproduire le comportement en traction du matériau. La norme française NF P18-470 (AFNOR 2016), très fortement inspirée de la recommandation de l'Association française de Génie Civil (AFGC), est la principale norme 4PBT pour le BFUP.

L'essai 3PBT (Figure 12, Tableau 13) est un essai de flexion à trois points fait sur des portées similaires à celles utilisées pour le 4PBT. Une entaille est faite sur la face en traction de l'échantillon, à mi-portée, et l'échantillon est chargé à la rupture avec une charge centrale, appliquée au-dessus de l'entaille. La dimension de cette entaille varie d'une référence à l'autre. Cet essai permet une localisation de la fissuration. Les normes NF P18-470 et ASTM C1609 sont les principales normes pour cet essai. La norme complémentaire ASTM C1856 vient compléter la norme ASTM C1609, utilisée traditionnellement pour le béton renforcé de fibres (BRF).

L'essai de flexion sur dalles minces est un essai de laboratoire davantage effectué en Europe (Tableau 14). La norme française (NF P18-470) et suisse (SIA 2052) sont les deux principaux protocoles d'essai existants. L'échantillon est testé avec une épaisseur mince, et permet de caractériser des éléments minces en flexion/traction. Aussi, cet essai permet de voir l'influence des effets de bord des moules sur l'orientation des fibres dans la matrice. Cet effet est beaucoup plus prononcé que pour les prismes utilisés dans les essais 4PBT et 3PBT.

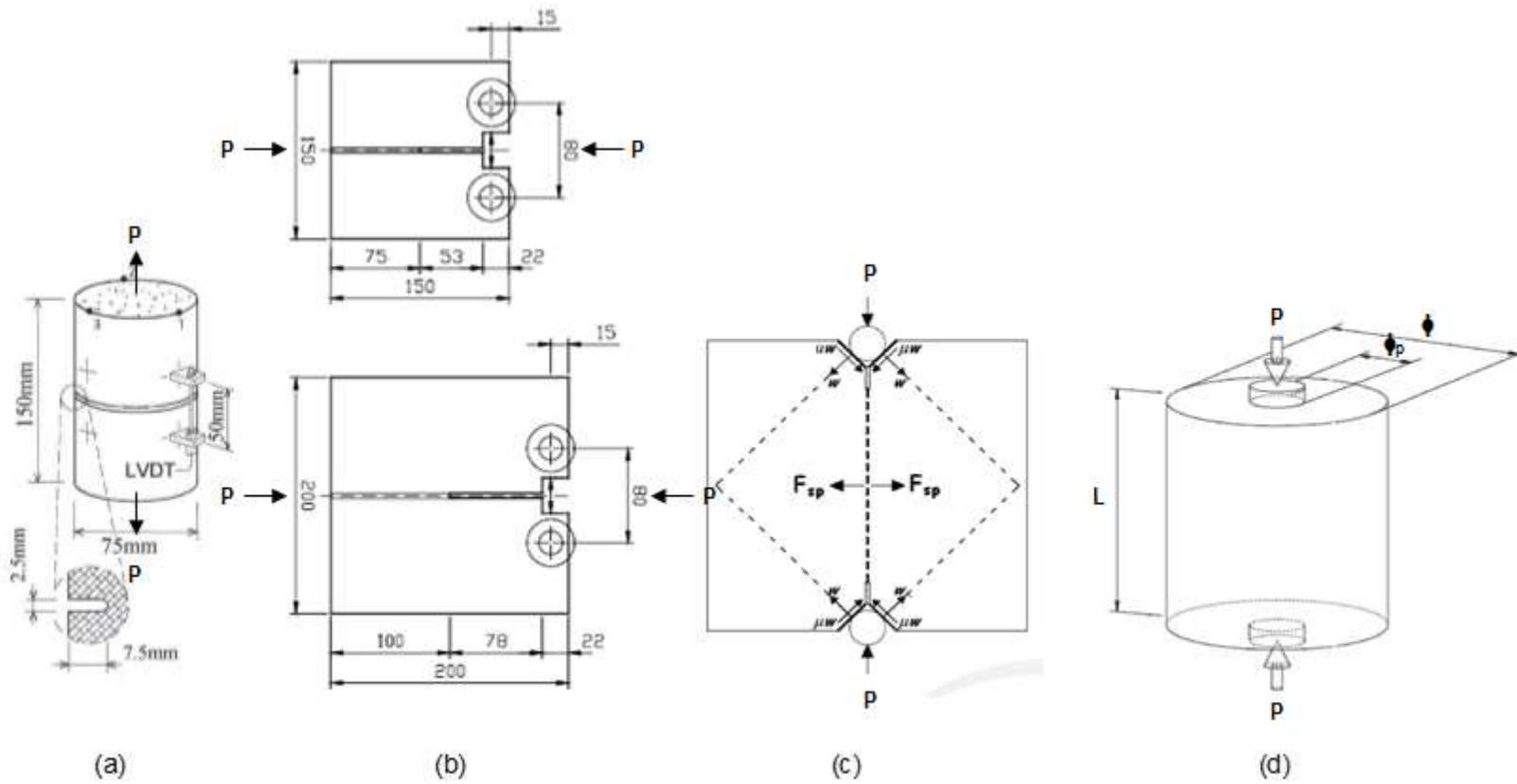


Figure 5 **Essais (a) Traction sur cylindre entaillé (b) Essai de fendage avec coin (c) Essai de fendage double avec coin et (d) Essai de poinçonnement double type Barcelone**
 Source : (Colombo, di Prisco, et Felicetti 2010), (Löfgren, Stang, et Olesen 2004), (di Prisco, Ferrara, et Lamperti 2013), (Molins, Aguado, et Saludes 2009)

Tableau 11 Comparatif des essais de résistance à la traction indirecte sur le BRF, trouvés dans la revue de littérature de l'ACI 544.9R-17

Nom de l'essai	Recommandation du RILEM	Essai de fendage avec coin	Essai de fendage double avec coin	Essai de poinçonnement double type Barcelone
Dimensions (mm)	Cylindre: $\phi = 75$ $L = 150$	Cube, arête de 150	N.S.	Cylindre: $\phi_p = 37,5$ $\phi = 150$ $L = 150$
Préparations supplémentaires	Entaille d'une profondeur de 7,5 mm faite à mi-section du cylindre.	Entaille sur le cube.	N.S.	N.S.
Procédure	<ol style="list-style-type: none"> 1. Coller les extrémités de l'échantillon aux plateaux de la presse. 2. Procéder à l'essai avec un taux de chargement suivant : <ol style="list-style-type: none"> 2.1. Jusqu'à un déplacement de 0,1 mm, utiliser un taux de chargement de 5 $\mu\text{m}/\text{min}$ 2.2. Après l'atteinte du déplacement de 0,1 mm et jusqu'à la fin du test, utiliser un taux de 100 $\mu\text{m}/\text{min}$ 	N.S.	N.S.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Procéder à l'essai avec un taux de chargement de 0,5 mm/min.

Source : (ACI Committee 544 2017)

2.7.1 Analyse inverse

L'analyse inverse est une procédure permettant, grâce à un essai de flexion et certaines hypothèses de base propre à chacune des méthodes, d'identifier la résistance en traction d'un matériau. En considérant la difficulté pratique de mettre en place un essai de traction directe, de nombreux chercheurs et codes utilisent cette technique afin de déterminer le comportement du matériau à la traction. Les différents types d'analyses inverses existantes peuvent se classer en certaines catégories. Certaines méthodes sont du type simplifié, où des points spécifiques des résultats expérimentaux sont utilisés afin de déterminer la loi de traction. D'autres méthodes sont itératives, où à chaque pas de temps de l'essai, l'équilibre de la section de l'échantillon est vérifié et la loi de traction est déterminée afin de respecter cet équilibre.

Dans son article (López et al. 2016), López fournit une procédure analytique d'analyse inverse simplifiée permettant de déterminer facilement la loi de traction du BFUP à l'aide des résultats Force – flèche des essais de flexion sur des prismes de BFUP. Afin d'utiliser cette procédure, les échantillons doivent respecter un critère précis de dimension : un rapport entre la portée (L) et la hauteur (h) de 3 ou 4,5. La largeur de l'échantillon (b) n'influence pas les résultats de cette analyse inverse, mais pourrait cependant avoir un effet sur l'orientation des fibres lors de la coulée. Les têtes de charge sont positionnées aux tiers de la portée, comme illustré à la Figure 6. Les hypothèses principales de ce modèle sont les suivantes :

- La loi de comportement en compression est considérée comme élastique peu importe la contrainte appliquée.
- La loi de comportement en traction est considérée comme une courbe contrainte-déformation composée par 4 lignes (Figure 7).
- Le module élastique est considéré identique dans la phase de traction et de compression.
- La localisation de la fissure se produit à 97% de la contrainte maximale de flexion.

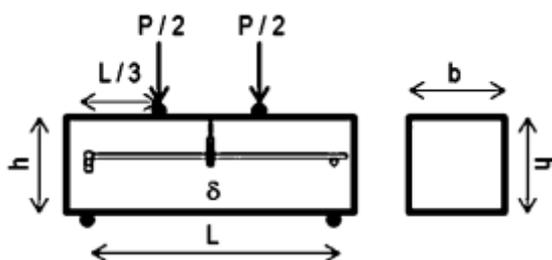


Figure 6 Dimensions de l'échantillon pour l'analyse inverse proposée par López

Source : (López et al. 2016)

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

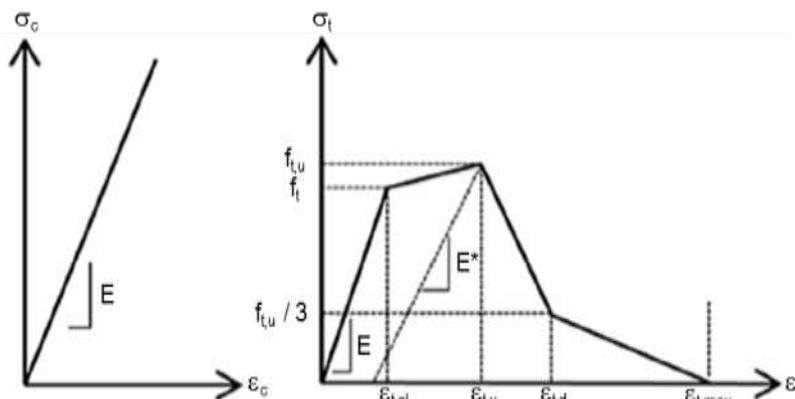


Figure 7 Loies de comportement en compression (gauche) et traction (droite) utilisées dans le modèle de Lopez

Source : (López et al. 2016)

La procédure d'analyse inverse est la suivante (Figure 8) :

1. À partir des résultats Force – flèche, la force appliquée par les vérins est transformée en contrainte flexionnelle, puis la courbe est déplacée pour passer par l'origine du graphique, au point (0, 0).
2. Le module élastique est déterminé en prenant la pente tangente à la section linéaire initiale. Des droites correspondant à des taux de 40 et 75% de la pente du module élastique sont tracées. Les points d'intersection entre ces droites et la courbe expérimentale sont retenus pour le calcul de la loi de traction.
3. Le point de localisation de la fissuration est déterminé comme la contrainte correspondant à 97% de la contrainte maximale, dans la phase antérieure à la contrainte maximale.
4. Les deux points dans le comportement post-pic sont déterminés comme les points où la contrainte calculée est égale à 30 et 80% de la contrainte à la localisation de la fissure, calculée au point 3.
5. Diverses équations empiriques sont ensuite utilisées avec les 5 points déterminés sur la courbe expérimentale pour déterminer les paramètres permettant de tracer la loi de comportement du matériau en traction.

Cette méthode est particulièrement efficace dans ce sens qu'elle ne nécessite que peu de calculs et qu'elle permet des résultats rapides. Cependant, les dimensions des échantillons sont restreintes, et la loi de comportement du matériau en compression pourrait ne pas être parfaitement valide lorsque la contrainte atteint son maximum.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

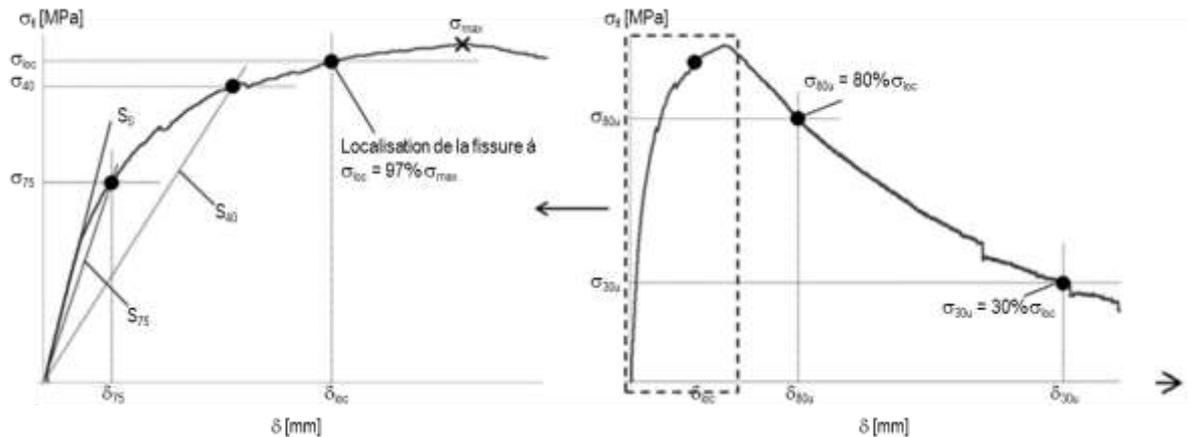


Figure 8 Position des points critiques nécessaires à l'analyse inverse de Lopez

Source : (López et al. 2016)

La norme française NF P18-470 prescrit également une procédure d'analyse inverse à utiliser avec l'essai de flexion afin de déterminer la loi de comportement du matériau en traction (Figure 9). Cette procédure est de nature itérative; l'équilibre de la section est fait à chaque pas de temps, en considérant le moment de la partie fissurée et non fissurée comme égal au moment de flexion imposé par la charge des vérins, et la somme des efforts axiaux étant nulle. Afin de procéder à cette analyse inverse, les données doivent préalablement être filtrées : ceci permet de faciliter le travail de l'algorithme en évitant les bruits dans les données expérimentales induits par l'essai lui-même. Cette méthode nécessite donc une capacité de calcul beaucoup plus importante que pour la méthode simplifiée présentée par Lopez.

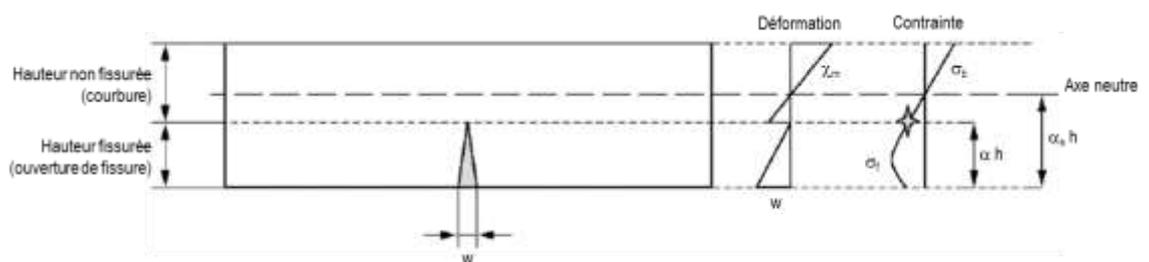


Figure 9 Équilibre mécanique de la section fissurée selon la norme française

Source : (AFNOR 2016)

La norme suisse SIA 2052 donne elle aussi une procédure particulière pour déterminer le comportement en traction par analyse inverse. Le point A Figure 10 représente la fin de la linéarité du comportement, et est déterminé grâce aux essais cycliques de flexion, où la charge appliquée ne dépasse pas 40% de la charge maximale déterminée pour le matériau. Le point B correspond à la charge maximale de l'essai, et le comportement à la section centrale est représenté à la Figure 10. Les points A et B permettent, par le

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

biais d'équations spécifiques, de calculer la résistance limite élastique f_{Ute} et la résistance limite ultime f_{Utu} . Ces valeurs sont ensuite comparées : si f_{Ute} est supérieure à f_{Utu} , le BFUP est dit non écroissant. Dans le cas contraire, une analyse inverse est nécessaire entre les points A et B. 10 couples de valeurs également espacés, entre les points A et B, sont choisis et l'analyse inverse présentée dans le document de recommandation de l'AFGC est utilisée sur ces points afin de déterminer la loi de comportement en traction du matériau.

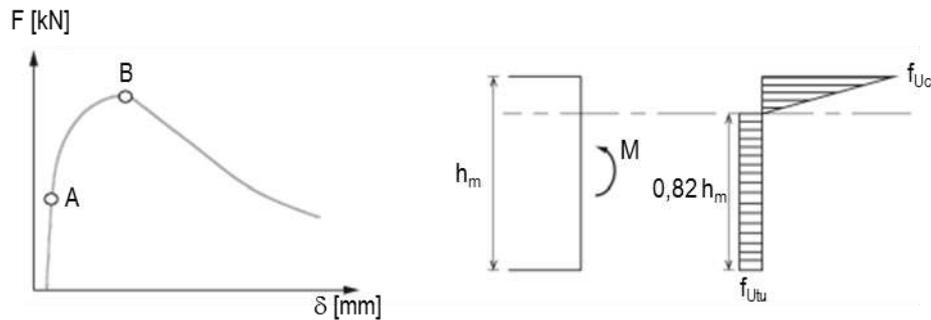


Figure 10 Description des points de l'analyse inverse (gauche) et distribution des contraintes admises à la section critique au point B (droite)

Source : (SIA 2016)

2.7.2 Essai de flexion à 4 points sur poutres non entaillées (4PBT)

Tableau 12 Description des recommandations et normes de référence pour les essais de flexion à 4 points sur poutres non entaillées sur le BFUP

Norme	NF P18-470	AFGC	ASTM C1609
Nombre d'échantillons	Au moins 6 échantillons	N.S.	N.S.
Dimensions (mm)	Prisme: min (5L _f , 70) < (b = l) < max (7L _f , 200) L = 4b	Prisme, avec L _f < 15: b = l = 70 L = 280 Prisme, avec 15 < L _f < 20: b = l = 100 L = 400 Prisme, avec 20 < L _f < 25: b = l = 140 L = 560 Prisme, avec L _f > 25: b = l = 200 L = 800	Prisme, avec L _f < 15: b = l = 75 Prisme, avec 15 < L _f < 20: b = l = 100 Prisme, avec 20 < L _f < 25: b = l = 150 Prisme, avec L _f > 25: b = l = 200 portée=3 x b
Appuis	Tête de charge : Appuis à rouleaux Base : Appui simple et appui à rouleau Les appuis à rouleaux peuvent se déplacer latéralement.	Tête de charge : Appuis à rouleaux Base : Appui simple et appui à rouleau La rotation dans l'axe est permise pour un appui à rouleau de la tête de charge et de l'appui. Les appuis à rouleaux peuvent se déplacer latéralement.	Appuis à rouleaux avec rotation dans l'axe permise

Procédure	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tourner l'échantillon d'un quart de tour selon le sens du moulage, afin d'utiliser les faces latérales coffrées comme face de compression et de traction. 2. Ajuster la portée du banc d'essai de flexion afin d'obtenir une portée égale à 3 fois la hauteur de l'échantillon. 3. Effectuer l'essai de flexion avec un taux de chargement suivant basé sur l'un des critères suivants, en appliquant une précharge légère sur l'échantillon : <ol style="list-style-type: none"> 3.1. Un taux de chargement de 0,25 mm/min basé sur le déplacement de la tête de charge. 3.2. Un taux de chargement de 0,1 mm/min basé sur la flèche moyenne à mi-portée. 3.3. Un taux de chargement de 0,025 mm/min basé sur l'élongation de la fibre inférieure. 4. Arrêter l'essai de flexion à l'atteinte du premier critère parmi les suivants : <ol style="list-style-type: none"> 4.1. La flèche moyenne au centre atteint 0,015 fois la hauteur de l'échantillon. 4.2. L'élongation de la fibre inférieure atteint 0,015 fois la hauteur de l'échantillon. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tourner l'échantillon d'un quart de tour selon le sens du moulage, afin d'utiliser les faces latérales coffrées comme face de compression et de traction. 2. Effectuer l'essai de flexion avec un taux de chargement suivant basé sur l'un des critères suivants, en appliquant une précharge légère sur l'échantillon : 3. Jusqu'à une flèche de $L/900$, utiliser un taux de chargement compris entre 0,025 mm/min à 0,075 mm/min pour l'échantillon de 350 mm, et un taux de 0,035 mm/min à 0,10 mm/min pour l'échantillon de 500 mm. 4. Après l'atteinte de la flèche de $L/900$, utiliser un taux de chargement compris entre 0,050 mm/min à 0,20 mm/min pour l'échantillon de 350 mm, et un taux de 0,050 mm/min à 0,30 mm/min pour l'échantillon de 500 mm. 5. Arrêter l'essai de flexion à l'atteinte d'une flèche égale à $L/150$. 6. Mesurer la distance de la fissure par rapport aux appuis, et arrondir à 0,1 mm.
-----------	--	---

Source : (AFNOR 2016), (AFGC)

2.7.3 Essai de flexion à 3 points sur poutres entaillées (3PBT)

Tableau 13 Description des recommandations et normes de référence pour les essais de flexion à 3 points sur poutres entaillées sur le BFUP

Norme	NF P18-470	AFGC
Nombre d'échantillons	Au moins 6 échantillons	N.S.
Dimensions (mm)	<p>Prisme: $\min(5L_f, 70) < (b = l) < \max(7L_f, 200)$ $L = 4b$</p> <p>Entaille sciée à mi-portée : $l = 3$ $t = L_f / 2$</p>	<p>Prisme, avec $L_f < 15$: $b = l = 70$ $L = 280$</p> <p>Prisme, avec $15 < L_f < 20$: $b = l = 100$ $L = 400$</p> <p>Prisme, avec $20 < L_f < 25$: $b = l = 140$ $L = 560$</p> <p>Prisme, avec $L_f > 25$: $b = l = 200$ $L = 800$</p> <p>Entaille sciée à mi-portée : $l = 2$ $t = 0,1 \times b$</p>
Appuis	<p>Tête de charge : Appui à rouleau Base : Appui simple et appui à rouleau . Les appuis à rouleaux peuvent se déplacer latéralement.</p>	<p>Tête de charge : Appui à rouleau Base : Appui simple et appui à rouleau La rotation dans l'axe est permise pour un appui à rouleau de la tête de charge et de l'appui. Les appuis à rouleaux peuvent se déplacer latéralement.</p>

Procédure	<ol style="list-style-type: none">1. Tourner l'échantillon d'un quart de tour selon le sens du moulage, afin d'utiliser les faces latérales coffrées comme face de compression et de traction.2. Ajuster la portée du banc d'essai de flexion afin d'obtenir une portée égale à 3x la hauteur de l'échantillon.3. Effectuer l'essai de flexion avec un taux de chargement suivant basé sur l'un des critères suivants, en appliquant une précharge légère sur l'échantillon :<ol style="list-style-type: none">3.1. Un taux de chargement de 0,25 mm/min basé sur le déplacement de la tête de charge.3.2. Un taux de chargement de 0,1 mm/min basé sur la flèche moyenne à mi-portée.3.3. Un taux de chargement de 0,025 mm/min basé sur l'élongation de la fibre inférieure.4. Arrêter l'essai de flexion à l'atteinte du premier critère parmi les suivants :<ol style="list-style-type: none">4.1. La flèche moyenne au centre atteint 0,015 fois la hauteur de l'échantillon.4.2. L'élongation de la fibre inférieure atteint 0,015 fois la hauteur de l'échantillon.
-----------	--

Source : (AFNOR 2016), (AFGC), (ASTM 2012a)

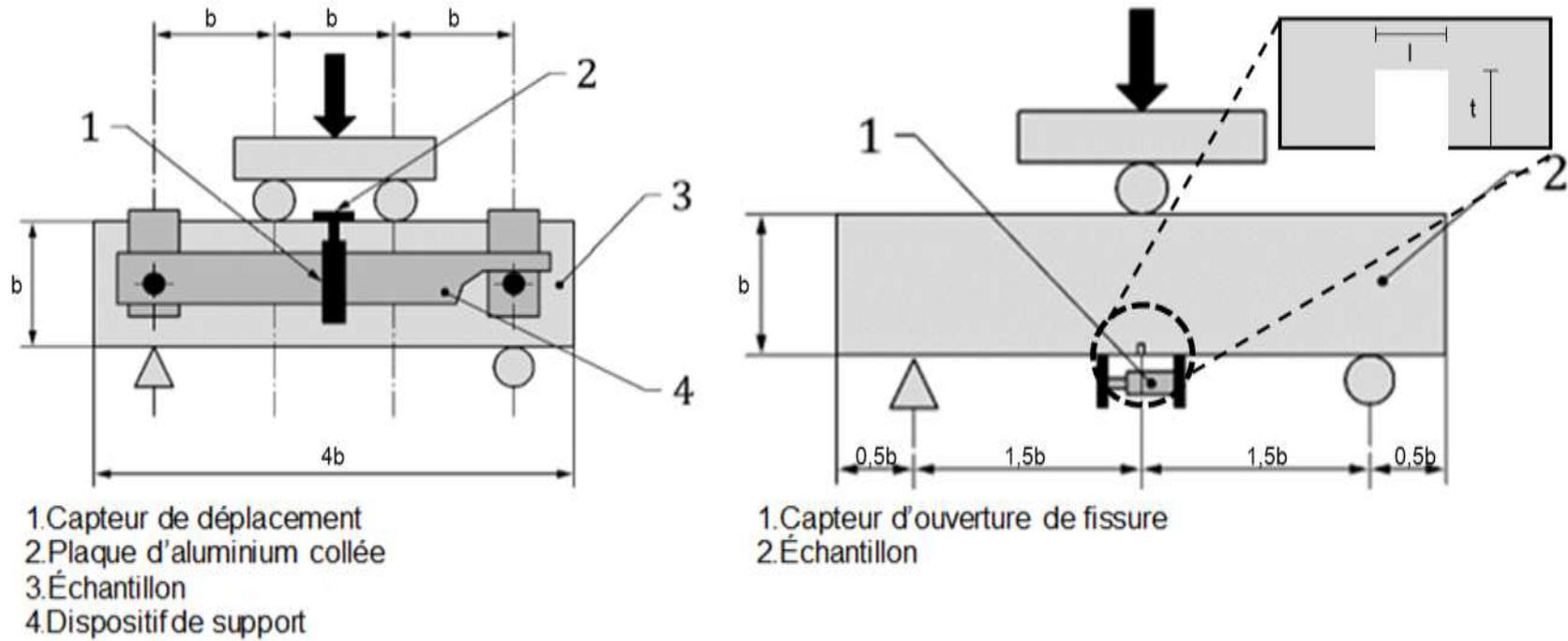


Figure 11 Disposition des essais de flexion sur poutres, 4PBT (gauche) et 3PBT (droite)

Source : (AFNOR 2016)

2.7.4 Essai de flexion à 4 points sur dalles minces (4PBT-DM)

Tableau 14 Description des recommandations et normes de référence pour les essais de flexion à 4 points sur dalles minces sur le BFUP

Norme	NF P18-470	SIA 2052
Nombre d'échantillons	Au moins 6 échantillons par direction de coulage	6
Dimensions (mm)	Prisme: $b \geq 3 L_f$ $l = 8 L_f$ $L = \min(20b, 600)$	Prisme: $b = 30$ $l = 100$ $L = 500$
Procédure	<ol style="list-style-type: none"> 1. Effectuer l'essai de flexion avec un taux de chargement de 0,25 mm/min basé sur le déplacement de la tête de charge, ou encore de 0,1 mm/min basé sur la flèche moyenne à mi-portée. 2. Arrêter l'essai de flexion à l'atteinte du premier critère parmi les suivants : <ol style="list-style-type: none"> 2.1. La flèche moyenne au centre atteint le double de la flèche moyenne atteinte à la charge maximale. 2.2. La flèche moyenne au centre atteint la demi-épaisseur de l'échantillon. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Effectuer l'essai de flexion de la façon suivante : <ol style="list-style-type: none"> 1.1. Pour les trois premiers échantillons, appliquer la charge à un taux de 0,5 mm/min de déplacement de la tête de charge, jusqu'à l'atteinte de la force maximale. Le taux de chargement est ensuite augmenté à 5 mm/min jusqu'à l'atteinte d'une flèche de 25 mm au centre. 1.2. Pour les trois derniers échantillons, effectuer trois cycles de charge-décharge jusqu'à une charge maximale de 33% de la charge maximale moyenne obtenue pour les trois premiers essais. Le déroulement de l'essai se fait ensuite de façon similaire aux 3 premiers essais.

Source : (AFNOR 2016), (SIA 2016)

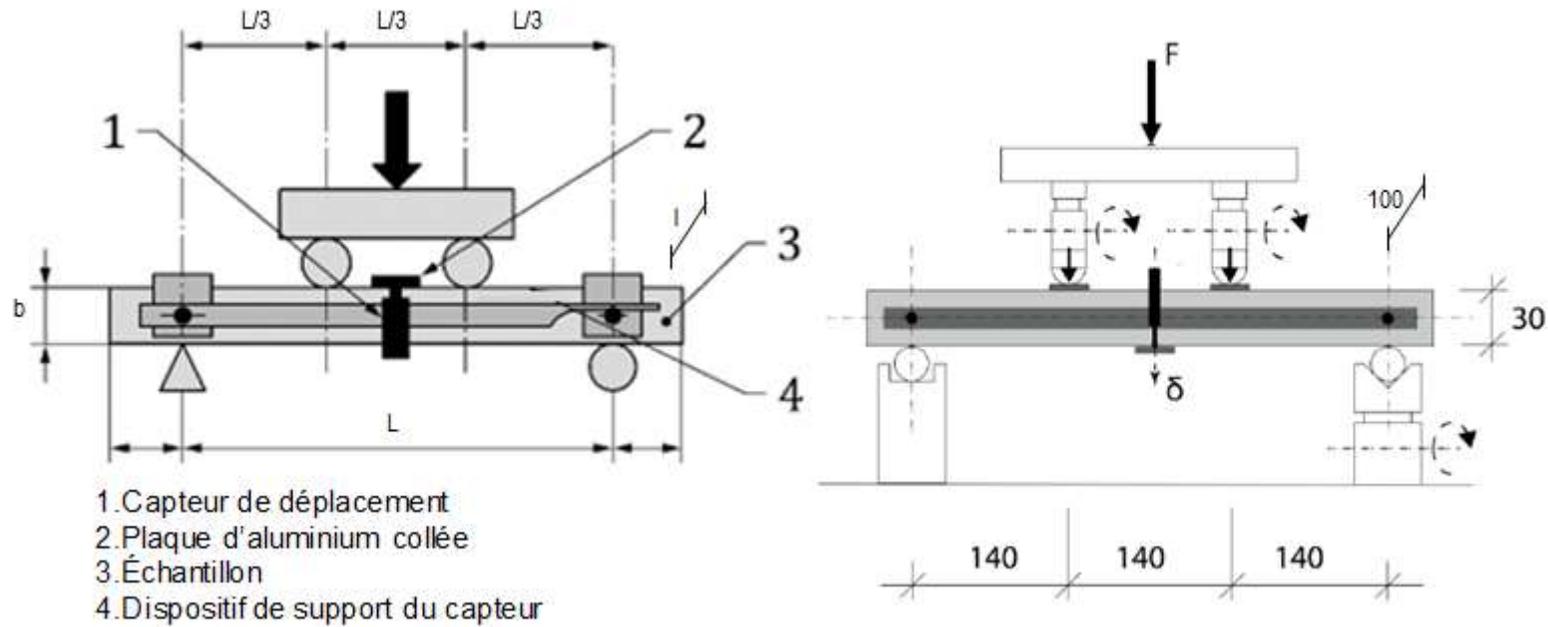


Figure 12 Disposition des essais de flexion à 4 points sur dalles minces, norme française (gauche) et norme suisse (droite)
Source : (AFNOR 2016), (SIA 2016)

2.7.5 Essai de flexion selon l'ACI 544.9R «Report on Measuring Mechanical Properties of Hardened-Reinforced Concrete»

Une revue rapide des différents essais mécaniques visant à déterminer la résistance en traction indirecte par flexion des bétons renforcés de fibres (BRF) est présente dans la publication de l'ACI (ACI Committee 544 2017) (Tableau 15). Bien que le BRF et le BFUP aient des comportements sensiblement différents en flexion, l'utilisation des protocoles présentés pourrait se révéler pertinente dans la caractérisation du BFUP. Divers essais, relatifs au FRC, sont présentés au Tableau 15, soit les essais:

- ASTM C1609 conduit sur deux dimensions d'échantillon et des portées différentes
- ASTM C1399
- ASTM C1550 conduit sur des panneaux circulaires supportés sur trois points équidistants et chargés en leur centre
- EN 14561
- JCI-SF4 conduit sur deux dimensions d'échantillon et de portées différentes
- DBV

Le Tableau 16 présente des essais de traction alternatif pour le béton renforcé de fibres BRF.

Tableau 15 Comparatif des essais de flexion sur le BRF, trouvés dans la revue de littérature de l'ACI 544.9R

Norme	ASTM C1609	ASTM C1399	ASTM C1550	EN14651	JCI-SF4	DBV
Nombre d'échantillons	3	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Dimensions (mm)	Prisme: b = l = 100 L = 350 Prisme: b = l = 150 L = 500	Prisme: b = l = 100 L = 350	Panneau rond: b = 75 $\phi = 800$	Prisme: b = l = 150 L = 550 Entaille sciée à mi-portée : t = 25	Prisme: b = l = 100 L = 350 Prisme: b = l = 150 L = 550	Prisme: b = l = 150 L = 600
Procédure	<ol style="list-style-type: none"> Pour un prisme avec L = 350 mm, utiliser un taux de 0,025 à 0,075 mm/min jusqu'à une déflexion de L/900 et un taux de 0,05 à 0,20 mm/min jusqu'à la déflexion de L/150. Pour un prisme avec L = 500 mm, utiliser un taux de 0,035 à 0,10 mm/min jusqu'à une déflexion de L/900 et un taux de 0,05 à 0,30 mm/min jusqu'à la déflexion de L/150. Arrêter l'essai de flexion lorsque la flèche au centre atteint le critère d'arrêt de L/150. 	<ol style="list-style-type: none"> Utiliser un taux de chargement de 0,65 mm/min, basé sur la vitesse de la tête de charge. Enlever la plaque d'acier à l'apparition de la première fissuration, décharger l'échantillon et recharger sans la plaque jusqu'à la rupture. Arrêter l'essai de flexion. 	<ol style="list-style-type: none"> Utiliser un taux de 3 à 5 mm/min, jusqu'à un déplacement central de 45 mm. Déterminer l'énergie d'absorption à des déplacements de 10, 20 et 40 mm. Arrêter l'essai de flexion. 	Utiliser une portée de 500 mm Utiliser une charge simple à mi-portée.	Utiliser un rapport Portée/Hauteur (L/h) de 3	Utiliser une portée de 500 mm

Source : (ASTM 2012a), (ASTM 2015), (ASTM 2012b), (Comite Europeen de Normalisation (CEN) 2007), (Japan Concrete Institute 1984), (German Society for Concrete et and Construction Technology 2001)

Tableau 16 Comparatif des essais de traction indirecte sur le BRF, trouvés dans la revue de littérature de la FHWA HRT-06-103

Norme	ASTM C1018	ASTM C496	AASHTO T132
Dimensions (mm)	Prisme: b = l = 100 L = 350	Cylindre: ϕ = 100 L = 200	Type os: b = 25 L = 76 Section centrale de 645 mm ²
Procédure	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tourner l'échantillon d'un quart de tour selon le sens du moulage. 2. Effectuer l'essai de flexion avec un taux de chargement permettant une déflexion constante. 3. Arrêter l'essai de flexion lorsque la flèche au centre atteint une valeur 16x plus élevée que la valeur atteinte lors de la première fissuration. 	Utiliser un taux de constant se situant entre 0,7 et 1,4 MPa/s	Utiliser un taux de 0,025 mm/min.

Source : (ASTM 1997), (ASTM 2011), (AASHTO 1987)

2.8 Essai d'étalement

Une des propriétés principales du BFUP à l'état frais est sa grande fluidité. La norme française propose 3 essais différents pour la mesure de l'étalement, soit la table à chocs, le cône ASTM ou encore le cône Abrams. La norme suisse (SIA 2052) et américaine (ASTM C1856) proposent aussi des essais de caractérisation. Ces normes donnent aussi des critères d'étalement à respecter pour le BFUP (Tableau 17).

Tableau 17 Comparatif des essais de mesure de l'étalement sur le BFUP, trouvés dans la littérature

	NF P18-470			SIA 2052	ASTM C1856	FHWA-HRT-13-060
Technique	Table à chocs	Cône ASTM sans choc	Cône Abrams	Cône Abrams	Table d'étalement	
Critère (mm)	C _a sans choc : > 560 C _v sans choc : 420-560 Après 15 chocs : > 560 C _t sans choc : < 420 Après 15 chocs : > 560	C _a > 270 C _v : 230-270 C _t < 230	C _a > 760 C _v : 660-700 C _t < 660		200 - 250	
Modifications au test de référence				Mesure à 1 et 5 minutes	Mesure à 2 minutes Aucune vibration ni consolidation	
Référence	NF EN 12350-5	ASTM C230	NF EN 12350-8	NF EN 12350-8	ASTM C1437	ASTM C1437

C_a : BFUP susceptible d'avoir un comportement autoplaçant, avec une mise en place sans vibration ni aide mécanique

C_v : BFUP avec un comportement visqueux, avec une mise en place sans vibration mais avec une aide mécanique

C_t : BFUP dont la surface au repos est susceptible de tenir une pente

Source: (AFNOR 2016), (SIA 2016), (ASTM 2017a), (Benjamin A. Graybeal et Russell 2013)

2.9 Essai de mesure du retrait

Le BFUP est un matériau caractérisé par un très fort retrait endogène, comparativement au retrait de séchage. Peu d'essai particulier sont proposés dans la littérature pour la caractérisation du retrait du BFUP. La norme ASTM C1856, de même que les rapports de la FHWA ((Benjamin A. Graybeal 2006), (Benjamin A. Graybeal et Russell 2013)), proposent l'emploi de la norme ASTM C157 pour la caractérisation du retrait de séchage du BFUP. La norme ASTM C341 est aussi proposée par l'ASTM C1856. Comme ces essais se font habituellement sur du béton standard, dont le retrait total est beaucoup plus long à atteindre, il est fort possible que ces essais proposent des durées inutilement longues pour le BFUP, dont le retrait se fait relativement rapidement suivant la mise en place. Pour ce qui est du retrait endogène, il n'y a pas d'essai proposé spécifiquement pour le BFUP ni même pour le béton ordinaire. Cependant, la mesure du retrait peut s'effectuer par des mesures linéiques ou volumétriques sur le béton dès la prise selon différentes méthodes. L'essai ASTM C490 peut être réalisé pour suivre le retrait 24h après le gâchage (Stefan 2009). Un dispositif de mesure de retrait restreint a également été développé par Charron (2003) permettant de mesurer le retrait endogène par l'évolution des contraintes dans le béton dès le début de la prise (Tableau 18).

Tableau 18 Comparatif des essais de mesure du retrait sur le BFUP, trouvés dans la littérature

	ASTM C1856	FHWA-HRT-13-060	FHWA-HRT-06-103
Modifications par rapport à la norme de référence	Prisme: b = 75 l = 75 L = 285	Cylindre: ϕ = 75 b = 75	Prisme: b = 76 l = 76 L = 280
Référence	ASTM C157 ou C341	ASTM C157	ASTM C157

Source : (ASTM 2017a), (Benjamin A. Graybeal et Russell 2013), (Benjamin A. Graybeal 2006)

2.10 Essai de fluage en compression

Peu d'information est disponible présentement relativement à la caractérisation du fluage du BFUP. Les références trouvées ((ASTM 2017a), et (Benjamin A. Graybeal et Russell 2013)) pointent vers l'utilisation de la norme ASTM C512 pour la caractérisation en fluage (Tableau 19).

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

**Tableau 19 Comparatif des essais de mesure du fluage sur
le BFUP, trouvés dans la littérature**

	ASTM C1856	FHWA-HRT-13-060
Modifications apportées à la norme de référence	Au moins 6 échantillons Cylindre: $\phi = 75 \text{ mm}$ $L = 150 \text{ mm}$	Cylindre: $\phi = 100 \text{ mm}$ $L = 200 \text{ mm}$
Unité des dimensions en mm	La charge constante appliquée correspond à 40% de la charge maximale atteinte en compression.	Essais à 4, 7 et 28 jours.
Référence	ASTM C512	ASTM C512

Source : (ASTM 2017a), (Benjamin A. Graybeal et Russell 2013)

2.11 Essai de résistance aux cycles de gel-dégel

Le BFUP est un matériau présentant une très grande résistance aux cycles de gel-dégel, résultat de sa matrice très rigide et extrêmement peu poreuse, qui limite les effets d'infiltration d'eau. Sa forte proportion de ciment anhydre colmate la microfissuration. Pour cette raison, le protocole d'essai proposé par la norme ASTM C1856 (ASTM 2017a) et par le rapport de la FHWA (Benjamin A. Graybeal et Russell 2013), soit la norme ASTM C666, n'est pas particulièrement adaptée pour la caractérisation. En effet, des résultats expérimentaux ont démontré que, loin de réduire la résistance du matériau par l'action de la glace qui se forme et qui fait pression sur la matrice cimentaire, cet essai a tendance à apporter une hydratation supplémentaire au ciment, augmentant dès lors sa résistance. L'essai est généralement terminé à l'atteinte de 300 cycles de gel-dégel, et les échantillons ne présentent que très peu de dommages visibles, en plus d'avoir un module élastique dynamique relatif souvent comparable ou supérieur au module élastique avant le début des essais.

Graybeal (Graybeal (2007)) a procédé à des essais de gel-dégel, suivant la procédure A de la norme ASTM C666, avec des bétons ultra-haute performance provenant de 4 cures différentes, soit une cure sans traitement (standard), une cure à vapeur tempérée, une cure à vapeur retardée et une cure à la vapeur. Les essais se sont aussi poursuivis sur 690 cycles, soit plus de 2 fois la durée prescrite pour l'essai standard (300 cycles). Ses résultats, présentés à la Figure 13, indiquent une très faible diminution du module élastique pour les échantillons provenant de la cure à la vapeur, un module stable pour les cures à vapeur tempérée ou retardée, et une augmentation pour la cure sans traitement spécifique. Ces résultats semblent indiquer fortement que le processus de gel-dégel a favorisé, en partie, l'hydratation des échantillons, ce qui expliquerait que la cure la moins favorable (la cure sans traitement) ait engendré une augmentation du module élastique dynamique relatif pendant les essais, alors que la cure à la vapeur, celle qui favorise une hydratation maximale du ciment, ait vu une diminution du module élastique. Cependant, Graybeal prend soin de souligner qu'il est impossible de conclure que la cure standard produit un matériau avec une meilleure résistance aux cycles de gel-dégel. D'autres auteurs, incluant (Lee,

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

Chiu, et Wang 2005) ont noté un module élastique dynamique relatif du béton à ultra-haute performance supérieure à 90% après 1000 cycles. La résistance du BFUP aux cycles de gel-dégel est généralement classifiée comme excellente.

Le *Michigan Tech Transportation Institute*, dans son rapport (T. M. Ahlborn et al. 2008) a aussi procédé à des essais de gel-dégel, en utilisant cette fois la procédure B de l'ASTM C666. Les résultats, après 300 cycles, indiquent encore une augmentation du module élastique dynamique relatif. Ces expériences indiquent soit que ce test n'est pas optimal pour la caractérisation de la résistance aux cycles de gel-dégel, soit que ce matériau possède réellement une résistance exceptionnelle face à ce phénomène (Tableau 20).

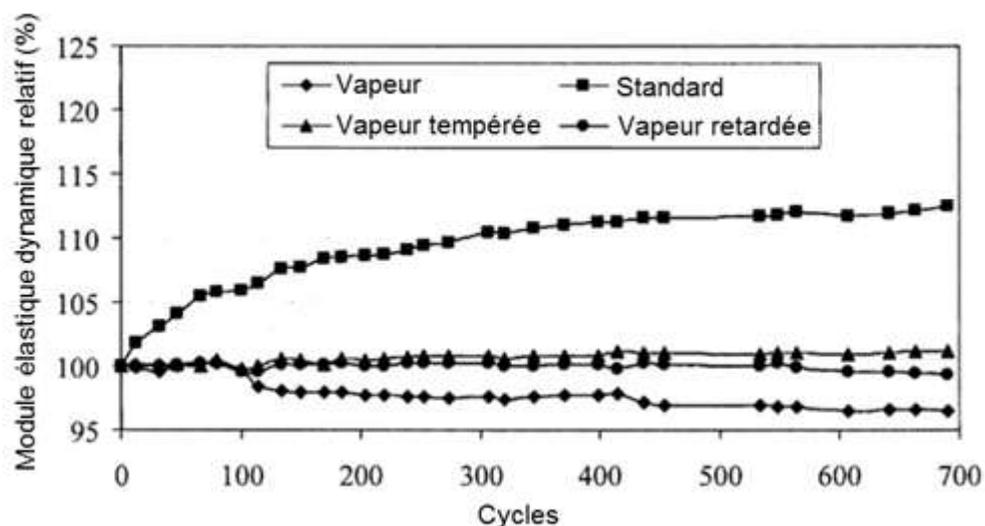


Figure 13 Résultats d'essai de résistance aux cycles de gel-dégel sur du BFUP selon différentes cures
Source : Graybeal (2007)

Tableau 20 Comparatif des essais de résistance aux cycles de gel-dégel sur le BFUP, trouvés dans la littérature

	ASTM C1856	FHWA-HRT-13-060
Modifications par rapport à la norme de référence	Arrêt de l'essai après l'atteinte de 300 cycles de gel-dégel ou lorsque le module élastique relatif dynamique < 90% du module élastique	
Norme de références	ASTM C666 Procédure A	ASTM C666 Procédure A et B

Source : (ASTM 2017a), (Benjamin A. Graybeal et Russell 2013)

2.12 Essai de résistance à l'abrasion

L'essai de résistance à l'abrasion vise à déterminer la résistance en surface d'un matériau sous l'application d'une tête rotative abrasive, à une certaine charge. Les normes européennes (NF P18-470 et SIA 2052) se basent sur l'essai NF EN 13892-3, alors que les publications américaines utilisent la

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

norme ASTM C944. Différents coefficients de performance sont notés autant dans la norme française (AFNOR 2016) que dans la recommandation de l'AFGC.

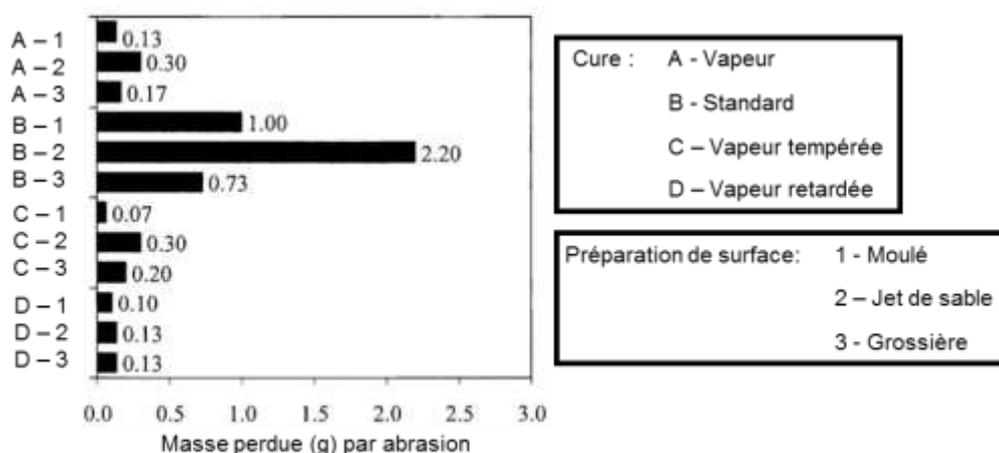


Figure 14 Résultats d'essai de résistance à l'abrasion selon la cure et le type de préparation de surface

Source : Graybeal (2007)

Tableau 21 Comparatif des essais de résistance à l'abrasion sur le BFUP, trouvés dans la littérature

	NF P18-470	AFGC	SIA 2052	ASTM C1856	FHWA-HRT-13-060
Coefficient de performance	RM1: $1.0 < IA < 1.5$ RM2: $0.7 < IA < 1.0$ RM3: $IA < 0.7$	0,8 – 1,3			
Modifications apportées à la norme de référence				Charge de 197 N \pm 2 N	
Norme de référence	NF EN 13892-3	NF EN 13892-3	NF EN 13892-3	ASTM C944	ASTM C944

RM1 : BFUP résistant à l'abrasion hydraulique
 RM2 : BFUP très résistant à l'abrasion hydraulique
 RM3 : BFUP ultra-résistant à l'abrasion hydraulique

Source: (AFNOR 2016), (AFGC), (SIA 2016), (ASTM 2017a), (Benjamin A. Graybeal et Russell 2013)

Graybeal (2007) a procédé à des essais d'abrasion sur des UHPC selon la norme ASTM-C944-99 ayant subi différents types de cure. Les résultats indiquent une perte de masse après l'essai d'abrasion très dépendante de la cure suivie, mais tout de même relativement très faible. La masse totale perdue après l'abrasion correspond à la masse totale de débris récoltée après les essais. 5 essais consécutifs, de 2 minutes chacun, ont été réalisés pour les échantillons ayant eu les cures A, C ou D, et 4 essais ont été faits pour les échantillons sans cure (B). Il serait logique de croire que le BFUP aurait une résistance encore supérieure grâce à la présence des fibres métalliques (Figure 14, Tableau 21).

2.13 Essai de perméabilité aux ions chlorure

L'essai de caractérisation de la pénétration aux ions chlorure est un essai particulièrement important pour le BFUP, puisque ce phénomène influence directement la durabilité à long terme des structures en BFUP. Les différents essais de pénétration aux ions chlorure effectués sur le BFUP sont tirés des essais réalisés sur le béton conventionnel. Les normes américaines et européennes diffèrent très peu de l'essai préconisé pour le BFUP; les deux proposent des essais de migration accélérée faits sur des tranches cylindriques de 50 mm d'épaisseur et de 100 mm de diamètre et placées entre des cellules de migration contenant des solutions d'hydroxyde de sodium (NaOH) et de chlorure de sodium (NaCl). Plus spécifiquement, les normes américaines et françaises, de même que le rapport de la FHWA, recommandent les essais suivants :

- La norme américaine sur la caractérisation du BFUP (ASTM C1856) recommande l'utilisation du protocole d'essai de la norme ASTM C1202, avec la spécification particulière d'utiliser une matrice sans fibres métalliques.
- Le rapport de la FHWA (Benjamin A. Graybeal et Russell 2013) propose la caractérisation avec les normes américaines ASTM C1202 ou AASHTO T259.
- La norme française fait référence à l'essai XP P18-462, qui est l'équivalent français de la norme américaine ASTM C1202.

En utilisant la procédure de la norme ASTM C1202, plusieurs chercheurs ont rapporté des résultats de moins de 100 coulombs sur le BFUP. Ce résultat permet de conclure que ce matériau est très peu perméable aux ions chlorure, démontrant un grand potentiel de durabilité.

Plusieurs autres essais de mesure de la pénétration aux ions chlorure existent dans la littérature ; une revue de littérature exhaustive réalisée à l'Université de Toronto (Stanish et al. 2000) présente les normes existantes pour le béton conventionnel. Les essais à long terme présentés dans ce document incluent l'essai AASHTO T259 et l'essai Nordtest. Ces essais sont particulièrement intéressants pour la caractérisation du BFUP, car ils ne sont pas influencés par la présence de conducteurs électriques (par exemple fibres métalliques) dans la matrice cimentaire. Entre autres, l'essai AASHTO T259 est un essai où une solution de chlorure de calcium est mise en contact pendant 90 jours avec la surface supérieure d'une dalle en béton. À la fin de l'essai, un carottage et une analyse de la poudre extraite provenant de plusieurs profondeurs permet de déterminer la pénétration aux ions chlorure du matériau. Les essais accélérés incluent entre autres les essais présentés dans les normes AASHTO T277, ASTM C1202, de migration rapide et de résistivité. Ces procédures permettent une caractérisation beaucoup plus rapide que les essais dits à long terme. Cependant, cette vitesse de migration engendre certains inconvénients, surtout avec l'utilisation de matrice contenant des inclusions conductrices telle que des fibres métalliques. Les essais les plus intéressants présentés dans cette revue de littérature sont décrits plus en détails dans les paragraphes suivants.

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

L'essai NordTest NT Build 443 est un essai qui permet d'estimer la résistance à la pénétration des ions chlorure d'un matériau cimentaire. Des échantillons cylindriques, d'un diamètre d'au moins 75 mm (ou trois fois la dimension maximale des granulats) et d'une longueur minimale de 100 mm sont conditionnés pendant 28 jours dans de l'eau de chaux saturée. Chacun des trois échantillons est scellé sur le pourtour et la surface inférieure à l'aide d'un époxy, en laissant seulement la face circulaire supérieure exposée. L'échantillon est ensuite placé dans un contenant rempli d'une solution saline à une concentration de 165 g de NaCl par litre d'eau. L'échantillon est laissé dans le contenant pour une durée minimale de 35 jours, et au moins 90 jours pour les bétons de plus haute qualité. La solution est changée à des intervalles de 35 jours, et la concentration en NaCl doit être validée au début et à la fin de son utilisation. La température doit être maintenue entre 21 et 25°C, avec une température cible de 23°C, et mesurée au moins une fois par jour. Le profil de la concentration de chlore est déterminé par l'abrasion de différentes couches de matériau d'un diamètre inférieur de 10 mm au diamètre de l'échantillon. La couche abrasée externe doit avoir une épaisseur minimale de 1 mm. Au moins 7 autres couches doivent être abrasées pour une caractérisation complète du profil de chlore. Au moins 5 grammes de poussières de béton doivent être récupérées de chacune des couches. Le contenu en ions chlorure est ensuite déterminé avec la norme AASHTO T260. La fonction d'erreur de la seconde loi de Fick est calibrée sur les résultats obtenus et le coefficient de diffusion est calculé. Le montage d'essais est présenté à la Figure 15.

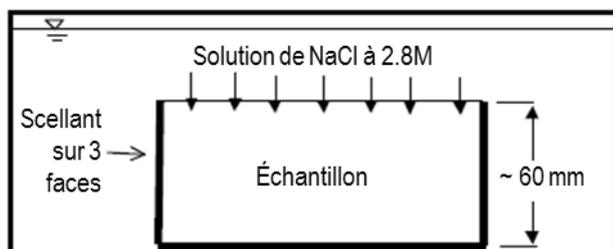


Figure 15 Montage pour l'essai de migration accélérée NordTest
Source : (Stanish et al. 2000)

L'essai de migration électrique accélérée est un essai où un échantillon de béton cylindrique est placé entre deux cellules de migration, et soumis à un courant électrique continu de 60 V distribué par deux électrodes en acier inoxydable. La Figure 16 illustre le montage de l'essai en question, utilisé pour les essais ASTM C1202 et AASHTO T277. L'échantillon utilisé a une épaisseur de 50 mm pour un diamètre de 100 mm. Deux cellules sont placées de part et d'autre de l'échantillon, avec une solution à 0.3 M de NaOH dans la cellule anode, et une solution de 3% de NaCl dans la cellule cathode. L'échantillon est placé de telle façon que sa surface supérieure, surfacée, soit en contact avec la solution de NaCl. La procédure de l'essai implique l'imposition d'un courant de 60 V pour une durée de 6 h, et la charge totale passée dans l'échantillon est ensuite utilisée afin de qualifier le matériau. Le Tableau 22 donne les critères de qualification pour déterminer la pénétration aux ions chlorure des matériaux.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

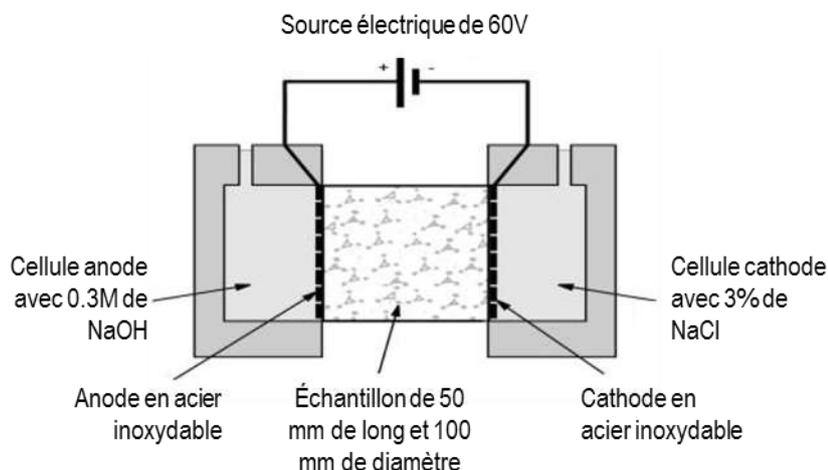


Figure 16 Montage pour l'essai de migration accélérée selon la norme AASHTO T277 (ASTM C1202)

Source : (Stanish et al. 2000)

L'essai de migration électrique est un essai où un échantillon de béton cylindrique est placé entre deux cellules de migration, et soumis à un courant électrique continu. La Figure 17 illustre le montage de l'essai. L'échantillon utilisé est d'un diamètre supérieur ou égal à 100 mm, pour une épaisseur variant de 15 à 50 mm. La procédure de l'essai est très similaire à celle présentée dans l'ASTM C1202. Cependant, le voltage appliqué aux électrodes est de l'ordre de 10 à 12 V, plutôt que 60 V. En diminuant l'intensité du voltage, la température de l'échantillon et de la solution d'ions reste généralement assez constante et basse pour avoir un effet négligeable sur le mouvement des ions. En conséquence, puisque le voltage est inférieur, un temps d'essai beaucoup plus long est nécessaire; les expériences suivant ce protocole durent quelques jours.

Tableau 22 Critères de qualification de la pénétration aux ions chlorure des bétons en fonction de la charge totale passée suite à l'essai ASTM C1202

Charge totale passée (Coulombs)	Pénétration aux ions chlorure
> 4000	Importante
2000 – 4000	Moyenne
1000 – 2000	Faible
100 – 1000	Très faible
< 100	Négligeable

Source : (ASTM 2017b)

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

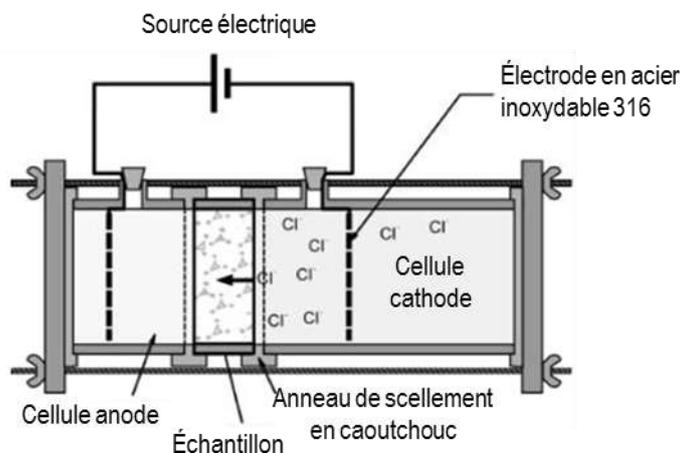


Figure 17 Montage pour un essai typique de migration électrique
Source : (Stanish et al. 2000)

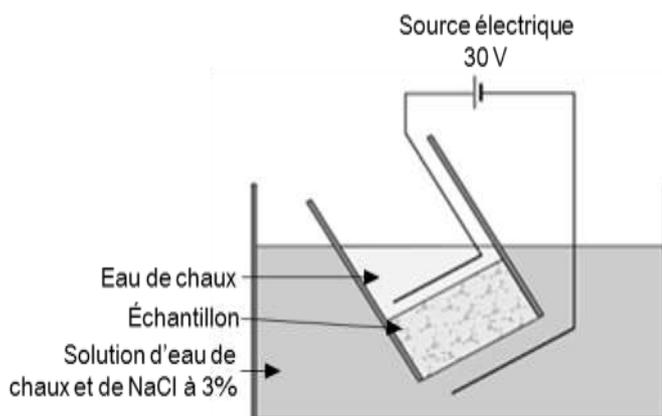


Figure 18 Montage pour l'essai de migration électrique selon (Tang et Nilsson 1992)
Source : (Stanish et al. 2000)

L'essai de migration rapide est un essai développé par (Tang et Nilsson 1992). Un échantillon de béton de 50 mm d'épaisseur pour un diamètre de 100 mm est placé dans la cellule de migration présentée à la Figure 18. L'échantillon est placé dans une solution d'eau de chaux saturée avec une concentration de chlorure de calcium à 3%. Une solution d'eau de chaux est placée sur l'échantillon de façon à le recouvrir totalement. Un voltage de 30 V est appliqué aux bornes du système, de part et d'autre de l'échantillon. Après une durée d'essai prédéterminée (Tang et Nilsson 1992) ont utilisé un temps d'essai de 8h), l'échantillon est fendu en deux et une solution de nitrate d'argent est rapidement vaporisée sur la surface de rupture. Une solution de 0,1 N est jugée adéquate pour déterminer la pénétration des ions chlorure à l'intérieur du matériau. Le changement de la couleur de la solution se produit pour une concentration de chlorures solubles correspondant à 0,15% de la masse du ciment. La profondeur de pénétration est ensuite utilisée pour

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

déterminer le coefficient de diffusion des ions chlorures par le biais de l'équation de Nernst-Enstein.

Les techniques de mesure de résistances électriques sont aussi des méthodes utilisées pour déterminer la capacité des chlorures à pénétrer le béton. En considérant que la conductivité électrique et la diffusion des ions sont influencées par les mêmes facteurs de la matrice du béton, soit la tortuosité, la dimension des pores et leur interconnexion notamment. Ces essais peuvent être réalisés autant avec un courant alternatif qu'un courant continu. Pour la technique avec courant continu, une source électrique est appliquée aux bornes de deux électrodes placées de part et d'autre d'un échantillon de béton, et deux voltages distincts sont appliqués. Par le biais de certaines équations, la résistivité du matériau peut être trouvée. Un exemple de montage pour l'essai de résistance électrique est présenté à la Figure 19.

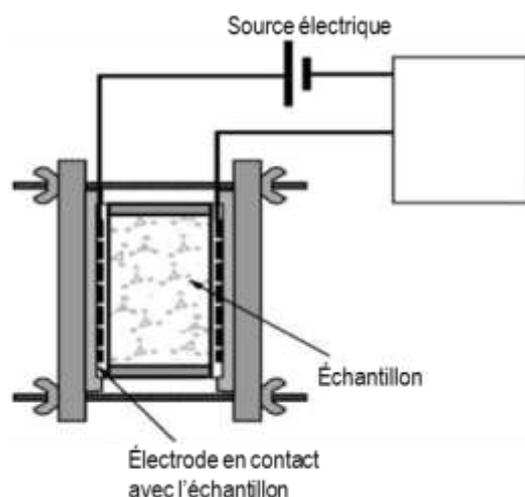


Figure 19 Montage pour l'essai de résistance électrique
Source : (Stanish et al. 2000)

L'utilisation d'une sonde Wenner à 4 points (Figure 20) est une technique existante pour mesurer la résistivité du béton in situ. Un appareil de mesure à 4 pointes conductrices est appliqué sur un échantillon de béton. Les pointes extérieures sont reliées à une source électrique, alors que les deux pointes intérieures sont reliées à un potentiomètre, qui mesure le potentiel réel du courant. Cette technique est efficace pour des éléments dont l'épaisseur est suffisamment importante pour considérer l'élément comme un milieu semi-infini (épaisseur beaucoup plus grande que la distance entre les pointes).

Les techniques de caractérisation par résistivité électrique ont l'avantage d'être des méthodes rapides et simples à mettre en place. Aussi, les faibles voltages utilisés dans les essais limitent la hausse de la température dans le béton, la rendant négligeable en vue des résultats obtenus. Cependant, ces méthodes ont certaines difficultés intrinsèques. La principale difficulté réside dans la caractérisation de la solution poreuse du matériau; la matrice doit

soit être asséchée, ou pré-saturée avec une solution dont la conductivité est déjà bien connue.

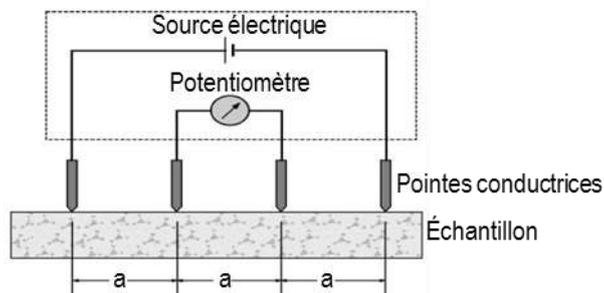


Figure 20 Schématisation d'un essai de résistivité avec la sonde Wenner
Source : (Stanish et al. 2000)

La diffusion des ions chlorure peut aussi être caractérisée par un essai de pression, ou une solution contenant des ions chlorure est forcée au travers d'un échantillon de béton en la mettant sous pression (Figure 21). Les ions sont alors poussés au travers de la matrice par diffusion ou convection. Pour procéder à cet essai, l'échantillon de béton doit préalablement être saturé d'eau. Il est ensuite placé dans une cellule de perméabilité, où une solution de chlore est ensuite appliquée sur l'échantillon. Une pression est appliquée, pendant une période de temps prédéterminée, afin de forcer la pénétration de la solution à l'intérieur du matériau. La procédure pour déterminer le coefficient de diffusion peut ensuite se faire selon deux techniques. Avec la première technique, l'échantillon est retiré de la cellule, fendu en deux et vaporisé avec une solution de nitrate d'argent. Le changement de couleur indique la présence d'ions chlorure, et donc la profondeur de pénétration. Connaissant la profondeur de pénétration, la conductivité peut être déterminée. La seconde technique implique de connaître le profil de la présence de chlore dans l'échantillon, par abrasion de l'échantillon et caractérisation de la poudre obtenue.

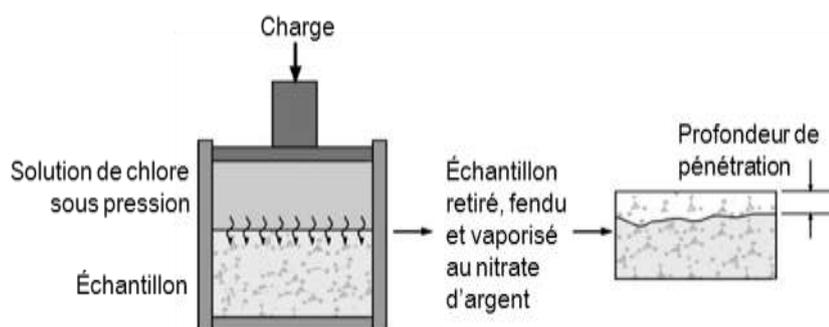


Figure 21 Montage pour un essai de diffusion par pression
Source : (Stanish et al. 2000)

Des méthodes indirectes existent également pour caractériser la porosité du béton, et ainsi déterminer son potentiel de résistance à la pénétration des

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

ions chlorures. Une première méthode, proposée par (Feldman 1987) utilise la diffusion d'isopropanol dans une pâte de ciment initialement saturée en eau. L'échantillon est placé dans une solution d'isopropanol et la masse est prise fréquemment afin de noter l'évolution de la masse de l'échantillon, et ainsi la diffusion de l'isopropanol à l'intérieur de la matrice. (Feldman 1987) pose comme hypothèse que la diffusion des ions chlorures est similaire à celle de l'isopropanol : la diffusion du chlorure est donc facilement trouvée avec la diffusion de l'isopropanol.

Finalement, (Sharif et al. 1997) posent une procédure assez similaire. Un échantillon de béton est placé entre deux cellules contenant d'une part de l'azote et de l'autre, de l'hélium. Les calculs présentés dans les travaux de Sharif permettent de corréler le ratio des différents éléments chimiques dans les cellules à la diffusion des ions de chlorure (Tableau 24, 23).

Tableau 23 Comparatif des essais de caractérisation de la pénétration aux ions chlorure sur le BFUP, trouvés dans la littérature

	NF P18-470	AFGC	ASTM C1856	FHWA-HRT-13-060
Modifications par rapport à la norme de référence			Seulement sur matrice sans fibres métalliques	
Coefficient de diffusion (m ² /s)	< 0.5 x 10 ⁻¹²	10 ⁻¹²		
Coefficient de diffusion amélioré (m ² /s)	< 0.1 x 10 ⁻¹²			
Norme de référence	XP P18- 462		ASTM C1202	ASTM 1202 AASHTO T259

Source : (AFNOR 2016), (AFGC), (ASTM 2017a), (Benjamin A. Graybeal et Russell 2013)

2.14 Essai de porosité à l'eau

L'essai de mesure de la porosité à l'eau est un essai présenté dans les normes françaises et suisses. La norme française sur le BFUP fait référence à l'essai NF P18-459, alors que la norme suisse repose sur l'essai CSN EN 13057. La recommandation de l'AFGC fait appel à un essai présenté dans le document *GranDuBé* (Hornain 2007). Des critères d'acceptation pour le BFUP sont également donnés pour chacune de ces normes (Tableau 25).

2.15 Essai de perméabilité à l'oxygène

La perméabilité aux gaz, ou à l'oxygène, est un essai peu représenté dans la littérature pour la caractérisation du BFUP. La norme française NF P18-470 et la recommandation sur le BFUP de l'AFGC sont les seules publications officielles sur le BFUP à y faire mention. Elles précisent aussi certains critères d'acceptation pour le BFUP. La nouvelle norme française fait référence à la norme XP P18-463, alors que la recommandation de

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

l'AFGC fait appel à un essai présenté dans le document *GranDuBé*. (Hornain 2007) (Tableau 26).

Tableau 24 Comparatif de différents essais de caractérisation de la pénétration aux ions chlorure, O : oui, N : non

Méthode d'essai		Considère le mouvement des ions	Température constante lors de l'essai	Utilisation avec renforcement métallique	Durée approximative de l'essai
Long terme	AASHTO T259	O	O	O	90 jours après la cure
	Nordtest [Figure 15]*	O	O	O	40 – 120 jours après la cure
Court terme	AASHTO T277 (ASTM C1202) [Figure 16]*	N	N	N	6 heures
	Migration électrique [Figure 17]*	O	O	N	Variable
	Migration rapide (CTH) [Figure 18]*	O	O	N	8 heures
	Résistivité [Figure 20]*	N	O	N	30 minutes
	Pénétration par pression [Figure 21]*	O	O	O	Variable
Autre	Sorption – Laboratoire	N	O	O	7 jours (avec la cure)
	Sorption – Chantier	N	O	O	30 minutes
	Diffusion Propan-2-ol	N	O	O	14 jours
	Diffusion de gaz	N	O	O	2 à 3 heures

*Source : Stanish, Hooton, et Thomas (2000)

Tableau 25 Comparatif des essais de mesure de la porosité à l'eau sur le BFUP, trouvés dans la littérature

	NF P18-470	AFGC	SIA 2052
Modifications par rapport à la norme de référence			
Porosité à l'eau	< 9.0%	1.5 – 5.0%	< 100 g/m ² h ^{0.5}
Porosité à l'eau améliorée	< 6.0%		
Norme de référence	NF P18-459		CSN EN 13057

Source : (AFNOR 2016), (AFGC), (SIA 2016)

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

Tableau 26 Comparatif des essais de mesure de la perméabilité à l'oxygène sur le BFUP, trouvés dans la littérature

	NF P18-470	AFGC
Modifications par rapport à la norme de référence		
Perméabilité aux gaz	$< 9 \times 10^{-19} \text{ m}^2$	$< 10^{-19} \text{ m}^2$
Perméabilité aux gaz améliorée	$< 1.1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$	
Norme de référence	XP P18-463 – 2011	

Source : (AFNOR 2016), (AFGC)

2.16 Comparatif des procédures d'essai

Les annexes 1 à 10 donnent un aperçu comparatif des normes actuelles servant de base aux nouvelles normes développées spécifiquement pour le BFUP présentées des sections 2.4 à 2.15 inclusivement. Ces normes sont généralement utilisées pour la caractérisation du béton conventionnel. Les normes présentées portent sur les essais suivants :

- essai de résistance à la compression;
- essai de module élastique et coefficient de Poisson;
- essai d'étalement;
- essai de mesure du retrait;
- essai de fluage en compression;
- essai d'absorption;
- essai de résistance à l'écaillage;
- essai de résistance aux cycles de gel-dégel;
- essai de résistance à l'abrasion;
- essai de perméabilité aux ions chlorure.

Les procédures et les spécifications pour chaque essai sont brièvement présentées ainsi que les montages d'essai lorsque jugé pertinent.

3. ÉQUIPEMENT ET MÉTHODOLOGIE

3.1 Équipement

Les différents équipements utilisés dans le cadre de ce projet de recherche sont présentés dans les différentes sous-sections ci-après.

3.1.1 Malaxeur à béton

Puisque la fabrication du BFUP nécessite une puissance de malaxage importante comparativement à la fabrication du béton conventionnel, le choix du malaxeur est particulièrement important. Un malaxeur inapproprié ou insuffisamment puissant peut augmenter le temps de malaxage requis, affecter la distribution des fibres ou même n'être tout simplement pas assez puissant pour fluidifier le mélange. Deux types de malaxeur ont été utilisés pour les gâchées relatives à ce projet de recherche (Figure 22), soit :

- malaxeur à mortier planétaire Hobart D300 T, d'une capacité de 8L et avec trois vitesses de rotation (94 RPM, 174 RPM et 317 RPM). Afin d'assurer un malaxage efficace, la limite d'utilisation a été fixée à 6L par gâchée;
- malaxeur à béton à tambour et pâles contre-rotatifs, d'une capacité de 80 L et avec une seule vitesse de rotation. Afin d'assurer un malaxage efficace, la limite d'utilisation a été fixée à 40 L par gâchée.

Par souci d'uniformité, les échantillons servant aux mêmes essais ont été fait à l'aide du même malaxeur, pour tous les fournisseurs (par exemple, tous les échantillons servant aux essais de flexion ont été réalisés avec le malaxeur de 80 L). De plus, afin d'assurer une performance similaire entre chacune des gâchées (peu importe le malaxeur utilisé), un minimum de 3 échantillons de compression ont été coulés à chaque gâchée afin d'assurer une résistance stable à 28 jours. Ces essais supplémentaires ne sont pas inclus dans les résultats présentés pour la résistance à la compression afin d'éviter une surabondance de résultats.

Il convient également de noter que les malaxeurs utilisés en industrie par les différents fournisseurs sont sensiblement différents, et peuvent donc produire des mélanges ayant des propriétés différentes.

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)



a)



b)

Figure 22 Malaxeurs utilisés dans le cadre du projet de recherche ; a) malaxeur Hobart, b) malaxeur à béton 80L

3.1.2 Surfaceuse

La surfaceuse a été principalement utilisée afin d'assurer un fini de surface le plus lisse et parallèle possible pour les échantillons servant aux essais de compression et de module élastique. Le surfaçage a été effectué à une vitesse d'environ 0.3 mm/min, de 10 à 20 minutes par face. La Figure 23 présente un fini de surface jugé conforme (à gauche) et non acceptable (à droite) pour des essais de compression ou de module élastique, due à la présence importante de bulles d'air en surface.

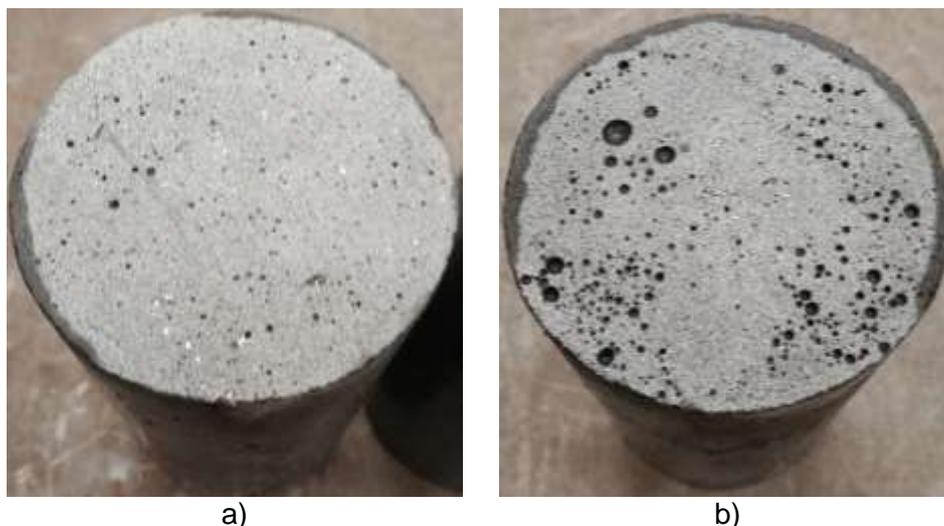


Figure 23 Fini de surface d'une éprouvette de BFUP pour un essai de compression ; a) surface acceptable, b) surface inacceptable

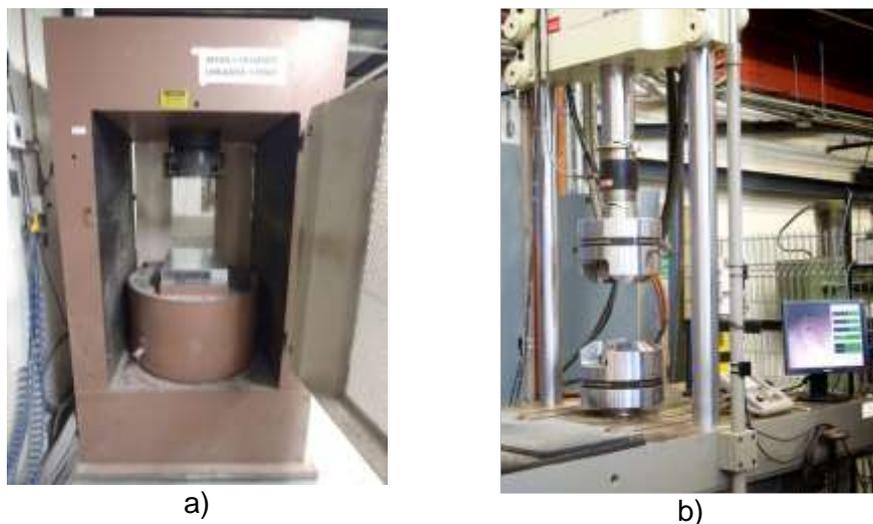
La surfaceuse a également été utilisée afin d'assurer des extrémités planes et parallèles pour certains échantillons servant aux essais de gel-dégel. Puisque la mesure du module élastique dynamique relatif se fait via le temps de transit d'une onde de compression à travers le matériau, un contact parfait entre les extrémités des échantillons et les capteurs est nécessaire.

3.1.3 Presse SATEC

La presse SATEC, présentée à la Figure 24a, est une presse simple action à cadre rigide d'une capacité de 2000 kN avec un plateau inférieur mobile et une tête semi-sphérique, permettant de compenser de faible manquement au parallélisme des faces des échantillons. La presse SATEC a été utilisée pour la réalisation des essais de compression sur cylindres de 75 et 100 mm de diamètre, en plus des essais de module élastique sur cylindres de 100 mm de diamètre.

Le taux de déplacement de la presse a été fixé à 0.405 mm/min, ce qui correspond approximativement à la vitesse prescrite par la norme ASTM C1856 de 1 MPa/sec. Il a cependant été déterminé par des essais préliminaires que la vitesse de chargement n'influence que peu les résultats des essais de compression.

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)



**Figure 24 a) Presse SATEC, utilisée pour les essais de compression et de module élastique
b) Presse MTS 322, utilisée pour les essais de flexion et de traction directe**

3.1.4 Presse MTS 322

La presse MTS 322 (voir Figure 24b) est une presse simple action. La presse MTS 322 a été utilisée pour la réalisation des différents essais de flexion ainsi que pour les essais de traction directe. Différentes cellules de charge et protocoles/vitesses de chargement ont été utilisés pour les essais (§ Méthodologie des différents essais).

3.1.5 Banc d'essai et tête de chargement pour essai de flexion

Un banc d'essai personnalisé a été conçu à l'Université Laval afin de permettre la réalisation des divers essais de flexion présentés dans ce présent rapport. Le banc d'essai permet de tester deux portées différentes, soit 300 et 420 mm. Les conditions d'appui des échantillons permettent une translation sur un des appuis (rouleau mobile) et une rotation sur l'autre appui (rouleau fixe rotulé). La norme française NF P18-470 propose ce type de montage, car la norme CSA A23.1 annexe U n'était pas disponible au moment de la réalisation des essais. Une tête de chargement a également été conçue, pour la réalisation des mêmes essais. La tête de chargement peut être utilisée avec 1 ou 2 points de chargement, dépendamment du type d'essai à réaliser. L'espace entre les deux appuis de chargement peut être choisi entre 100 ou 140 mm. Les conditions des rouleaux de chargement sont les mêmes que pour les rouleaux d'appuis, soit fixe-rotulé et libre. La Figure 25 présente les différentes pièces du banc d'essai et de la tête de chargement.



Figure 25 Banc d'essai pour les essais de flexion sur différents échantillons de BFUP

3.1.6 Appareil pour essais de gel-dégel

Les essais de gel dégel ont été réalisés suivant la procédure A (gel et dégel dans l'eau) prescrite par la norme ASTM C666. Le suivi des températures au cours de l'essai est assuré au moyen de 4 échantillons de béton témoin muni de thermocouples. Les mesures de module élastique dynamique ont été prises après des périodes de 36 cycles de gel-dégel (8 premières mesures), sauf pour le dernier cycle de mesure (12 cycles).

3.1.7 Détecteur ultra-sonique V-METER MK II de James Instruments

La variation du module élastique dynamique relatif des éprouvettes de gel-dégel a été déterminée au moyen d'un détecteur ultra-sonique *V-Meter Mk II*, de *James Instruments Inc.* (voir Figure 26). L'appareil détermine le temps de transit d'une onde ultra-sonique selon l'axe principal de l'échantillon testé, entre deux transducteurs, tel que prescrit par les normes ASTM C215 et ASTM C597. À noter que l'appareil utilisé n'est pas conforme à la norme ASTM C215 qui est citée dans la C666 (cet appareil mesure un temps qui est transformé en fréquence, alors que la norme demande de mesurer la fréquence fondamentale). La Figure 26 illustre le positionnement des capteurs au cours de l'essai.



Figure 26 a) Détecteur ultra-sonique V-Meter Mk II et b) positionnement des capteurs sur l'axe longitudinal de l'échantillon

3.1.8 Appareil Perma2 de Giatec mesure de la migration accélérée des ions chlorure

L'appareil Perma2 de Giatec est utilisé pour l'acquisition des données (Figure 27).



Figure 27 Essai de migration accélérée des ions chlorure. (a) Placement des anneaux de caoutchouc et de plastique pour l'étanchéité du montage

Source : Giatec Scientific Inc.

3.1.9 Compateur pour mesure de retrait

Les mesures de retrait sur prismes rectangulaire de BFUP ont été effectuées sur un compateur fixe *Humboldt H3250* d'une longueur effective de 254 mm (10 pouces). Le capteur de mesure est le modèle *Logic IQ Q3600*, de *Chicago Dial Indicator*. La plage de mesure du capteur est de 15 mm (0.600 pouce), avec une précision de 0.001 mm (0.00005 pouce).

3.2 Méthodologie

La méthodologie est présentée ci-après pour les essais de ce travail de recherche avec les étapes pertinentes.

3.2.1 Préparation des gâchées

Les gâchées ont été préparées préalablement (mesures des composants, préparation des moules) dans les 24h avant l'heure de coulée. Les ajouts liquides ont été préparés juste avant la gâchée, afin de minimiser l'évaporation. Dans certains cas, et sous recommandation des représentants

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

des entreprises impliquées, certaines composantes (les fibres métalliques et l'eau de gâchage) ont été entreposées préalablement dans une chambre frigorifique maintenue entre -12 et -18°C, afin de prévenir et diminuer l'augmentation de chaleur pendant le malaxage.

3.2.2 Coulée

Les différentes coulées ont été effectuées conformément à la procédure prescrite par le fournisseur, avec ou sans la présence d'un représentant technique, selon la discrétion de l'entreprise.

Les gâchées de BFUP suivent généralement la procédure décrite ci-dessous :

1. incorporation des matériaux secs (premix) dans le malaxeur;
2. malaxage à sec pendant 3 à 5 minutes;
3. ajout de l'eau* et/ou des adjuvants (en partie ou en totalité);
4. malaxage pendant 3 à 5 minutes;
5. ajout de l'eau* et/ou des adjuvants (si non ajouté en totalité à l'étape 3);
6. malaxage jusqu'à l'obtention d'une pâte fluide;
7. ajout des fibres d'acier;
8. malaxage pendant 3 à 5 minutes;
9. arrêt du malaxeur et dégazage du mélange (2 à 5 minutes);
10. mesure de l'étalement selon les normes ASTM C1437 et C1856. Le cône à mortier et la table d'étalement utilisés sont conformes à la norme ASTM C230.

* pour la recette B, de la glace accompagne l'eau de gâchage.

Les procédures particulières à chacun des produits testés sont fournies en annexes.

Lors du malaxage des différents produits, une attention particulière a été portée à la température de la pâte à chacune des étapes grâce à un suivi avec un thermomètre numérique infrarouge. Ceci s'est avéré une précaution importante puisque plusieurs gâchées ont été réalisées durant la période estivale. Tous les mélanges retenus dans ce rapport ont eu une température maximale inférieure à 30°C.

À la fin du malaxage, un essai d'étalement a été effectué afin de s'assurer un comportement conforme aux propriétés données par le fabricant. La norme ASTM C1437 a été utilisée pour la procédure d'essai de la mesure de l'étalement, en plus des modifications pour le BFUP apportées par la norme ASTM C1856. Les dimensions du cône utilisé sont les dimensions internes du cône (Tableau 27, Figure 28).

Tableau 27 Dimensions du cône à mortier

Composante	Dimension	
diamètre inférieur	100	mm
diamètre supérieur	70	mm
hauteur	60	mm



Figure 28 Cône à mortier et table d'étalement utilisés afin d'assurer un comportement similaire à celui prescrit par le fabricant

Le remplissage des moules a été réalisé conformément aux différentes procédures décrites dans la norme ASTM C1856. Les échantillons cylindriques ont été coulés le plus possible d'une seule levée, afin d'éviter les joints entre les différentes couches de matériaux. Une consolidation externe a été appliquée sous la forme de 30 coups portés sur le pourtour du moule. Aucune vibration interne (aiguille vibrante) ni d'utilisation de table vibrante n'a été utilisée, afin de prévenir la ségrégation des fibres vers le bas des échantillons et d'affecter le comportement des échantillons.

Les échantillons prismatiques ont été coulés le plus possible d'une seule levée, en inclinant légèrement une des extrémités des moules (dans le cas des prismes servant aux essais de flexion notamment) dans le sens de l'axe principal de la poutre. Cette technique permet un remplissage efficace du moule ainsi qu'une orientation préférentielle des fibres.

Les échantillons ont été rapidement recouverts d'une pellicule plastique posés directement sur la surface fraîche du BFUP, puis laissés immobile à température ambiante pour la première phase de la cure (minimum 24h pour la prise finale). Les échantillons cylindriques ont été placés directement dans la chambre humide, toujours recouverts de la pellicule plastique.

3.2.3 Démoulage et cure des échantillons

Les échantillons ont été démoulés après une période minimale de 24h, puis placés dans une chambre humide à température et humidité contrôlées (23°C, 100% HR). Les échantillons ont été tenus sous conditions humides lors du démoulage par l'application d'une jute humide sur les surfaces décoffrées. Dans de très rares cas, lorsque le matériau n'avait pas atteint une résistance suffisante, les échantillons ont été laissés jusqu'à 48h dans les moules afin de prévenir des déformations lors du démoulage.

Les échantillons ont été laissés en conditions de cure humide jusqu'à la date des essais. La préparation des échantillons pour les différents essais (coupe et surfacage des extrémités des cylindres pour les essais de compression et de module élastique par exemple) a été réalisée en assurant au maximum des conditions environnementales similaires de celles présentes dans la chambre de conditionnement.

3.2.4 Préparation des échantillons pour les essais de résistance à la compression (ASTM C39, ASTM C1856)

La préparation des échantillons, servant aux essais de résistance à la compression, inclut les étapes suivantes :

1. découpe des extrémités des cylindres;
2. surfaçage des extrémités des cylindres, jusqu'à l'obtention de surfaces planes, parallèles et exemptes de bulles d'air excessive (généralement de 10 à 20 minutes par extrémité). Voir Figure 23 pour un exemple de surfaces considérées comme adéquates ou non adéquates après le surfaçage;
3. mesure du diamètre de l'échantillon (3 mesures);
4. mesure de la longueur de l'échantillon (3 mesures);
5. mesure de la masse;
6. inspection visuelle de l'échantillon.

3.2.5 Préparation des échantillons pour les essais de module élastique (ASTM C469, ASTM C1856)

La préparation des échantillons (Figure 29), servant aux essais de module élastique, inclut les étapes suivantes :

1. voir étapes 1-6 (§3.2.4);
2. installation et centrage du support de déformation sur l'échantillon;
3. installation du LVDT.



Figure 29 Échantillon avec instrumentation pour la mesure du module élastique

3.2.6 Préparation des échantillons pour les différents essais de résistance à la flexion (3PBT: NF P18-470 - 4PBT: ASTM C1609, ASTM C1856 - 4PBT-DM: SIA 2052)

La préparation des échantillons, servant aux différents essais de résistance à la flexion sur prismes, ou sur dalles, inclut les étapes suivantes. Les étapes particulières à certains essais sont indiquées.

1. mesure de la position de l'entaille centrale (3PBT);
2. calibration de la profondeur de l'entaille (3PBT);

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

3. mesure de la hauteur de l'échantillon (mesures prises aux points d'application des charges);
4. mesure de la largeur de l'échantillon (mesures prises aux points d'application des charges);
5. mesure de la longueur de l'échantillon;
6. mesure des dimensions de l'entaille (largeur et profondeur) (3PBT);
7. mesure de la masse;
8. inspection visuelle de l'échantillon;
9. application de la peinture blanche et du mouchetis permettant l'utilisation de la corrélation par analyse d'images sur une des surfaces latérales;
10. installation du capteur permettant de mesurer l'ouverture de la fissure centrale pendant l'essai (3PBT) ou installation de la règle centrale permettant le calcul de la flèche lors de l'essai (4PBT, 4PBT-DM).

3.2.7 Préparation des échantillons pour les essais de résistance à la traction directe (approche développée par l'EPFL)

La préparation des échantillons, servant aux essais de résistance à la traction directe, inclut les étapes suivantes :

1. mesure de la hauteur de l'échantillon dans la section centrale;
2. mesure de la largeur de l'échantillon dans la section centrale;
3. idem étapes 8-9 (§3.2.6);
4. installation et collage des extrémités dans les mâchoires rainurées du banc d'essai;
5. installation des 2 LVDT servant au pilotage de l'essai, installés au-delà de la zone centrale;
6. installation des 2 LVDT servant à la détection de la fissuration dans la zone centrale.

3.2.8 Préparation des échantillons pour les essais de retrait de séchage (ASTM C157, ASTM C341, ASTM C511, ASTM C1856)

La préparation des échantillons, servant aux essais de retrait de séchage, inclut les étapes suivantes :

1. mesure initiale de la longueur à l'aide du comparateur (§3.1.9);
2. mesure de la masse initiale;
3. mise en cure dans un bac fermé contenant une solution d'eau de chaux saturée (saturation à 3 gramme de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ par litre d'eau).

3.2.9 Préparation des échantillons pour l'essai de la teneur en eau, de la masse volumique, de l'absorption et de la porosité (CSA A23.2-11C)

La préparation des échantillons, servant à l'essai de la teneur en eau, de la masse volumique, de l'absorption et de la porosité, inclut les étapes suivantes :

1. découpe des cylindres en disques de 50 mm;
2. mesure initiale de la masse des échantillons.

3.2.10 Préparation des échantillons pour les essais de résistance à l'écaillage (BNQ 2621-905)

La préparation des échantillons, servant à l'essai de résistance à l'écaillage, inclut les étapes suivantes :

1. mise en cure dans un environnement à 50% d'humidité relative, après 14 jours en cure humide;
2. installation du cadre d'étanchéité avant le 28^e jour de cure;
3. ajout d'une solution saline au 28^e jour de cure et recouvrir l'échantillon d'un matériau imperméable;
4. début de l'essai dans la chambre d'écaillage au 35^e jour de cure.

3.2.11 Préparation des échantillons pour les essais de résistance aux cycles de gel-dégel (ASTM C666, ASTM C1856)

La préparation des échantillons, servant à l'essai de résistance aux cycles de gel-dégel, inclut les étapes suivantes :

1. mesure initiale de la masse et des dimensions des échantillons;
2. mesure de la fréquence fondamentale transverse et début de l'essai au 14^e jour de cure.

3.2.12 Préparation des échantillons pour les essais de perméabilité aux ions chlorure (ASTM C1202, ASTM C1856)

La préparation des échantillons, servant à l'essai de perméabilité aux ions chlorures, inclut les étapes suivantes :

1. découpe des cylindres en disques de 50 mm;
2. mesure initiale de la masse et des dimensions des échantillons;
3. saturation sous-vide des échantillons dans une solution de NaOH à 0,3 M pendant un minimum de 8 heures;

3.2.13 Préparation des échantillons pour les essais de caractérisation du réseau de bulles d'air (ASTM C457)

La préparation des échantillons, servant à l'essai de caractérisation du réseau de bulles d'air, inclut les étapes suivantes :

1. découpe des cylindres en disques de 50 mm;
2. polissage de la surface d'étude avec des disques ayant des grains de 85 à 1200 pendant 8 minutes chacun (4 grades d'abrasif ont été utilisés);
3. repérage et marquage au 2 mm sur la largeur de la position des traverses sur la surface polie des échantillons.

4. PRÉSENTATION DES ESSAIS ET RÉSULTATS

Les sous-sections suivantes présentent les résultats des essais effectués à l'Université Laval. Les essais sont réalisés sur 4 matériaux de 4 compagnies différentes avec une lettre correspondante de A à D pour chacun d'eux. Toutes les recettes ont été confectionnées pour avoir 2% de volume de fibres. Pour les recettes A, B et D (2850 MPa), des fibres métalliques de diamètre 0.2 mm x 13 mm de longueur, alors que pour la recette C, deux types de fibres sont utilisés, soit des fibres ondulées de 13 mm et des fibres plates de 19 mm, ce dernier ayant une teneur en carbone plus élevé.

4.1 Mesures des propriétés mécaniques

4.1.1 Essai de résistance à la compression

Les essais ont été réalisés après 3 durées de cure, soit :

- la résistance atteinte après 4 jours de cure humide, pour obtenir des informations concernant la résistance du béton au jeune âge;
- la résistance atteinte après 28 jours de cure humide, qui correspond de façon assez réaliste à la résistance maximale du matériau;
- la résistance atteinte après un conditionnement immergé de 48h à une température de 90°C, afin de déterminer la résistance atteinte après un traitement thermique.

D'autres essais ont pu être réalisés à des temps de cure différents, principalement afin de déterminer la résistance en compression du matériau lors de la réalisation de certains essais de flexion (qui ont eu lieu après la cure minimale de 28 jours).

Les résultats des essais de résistance à la compression sont présentés (Tableau 28 au Tableau 30) pour chacun des différents matériaux testés, aux trois différentes durées de cure. Au moins 3 échantillons ont été testés pour chaque essai. Des informations supplémentaires sont fournies à l'annexe 11. Les résultats présentés du Tableau 28 au Tableau 30 permettent de voir que, pour les essais réalisés à 4 et 28 jours, les écarts-types obtenus sont relativement faibles. Les écarts-types deviennent sensiblement plus importants après l'utilisation du traitement thermique. Un gain de résistance appréciable est également remarqué pour tous les fournisseurs, avec la maturation et surtout avec un traitement thermique.

En prenant la résistance en compression à 28 jours comme valeur de référence, la résistance en compression à 4 jours est 35% inférieure et la résistance en compression après traitement thermique 38% supérieure. La prise de résistance a été plus importante à 4 jours pour les matériaux B et C, à 28 jours et après traitement thermique pour le matériau A avec 22% de résistance supérieure par rapport à la 2^e plus haute résistance mesurée.

L'écart-type double (1.7 à 2.4 fois), lorsque les résistances en compression à 4 jours sont comparées avec celles obtenues à 28 jours. L'écart-type a une tendance moins claire lorsque la résistance en compression à 4 jours est

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

comparée avec celle obtenue après le traitement thermique. Dans ce cas, l'augmentation varie entre 3 à 4.9 fois et une diminution de 3.8 fois pour le matériau C.

Tableau 28 Résultats des essais de résistance à la compression à 4 jours

Fournisseur	Charge maximale (kN)	Contrainte maximale (MPa)	Moyenne (MPa)	Écart-type (MPa)
A	386	81.73	78.85	2.62
	377	79.80		
	360	78.37		
	358	75.51		
B	384	83.42	82.43	3.03
	364	79.02		
	390	84.85		
C	421	89.73	87.71	4.05
	411	90.35		
	383	83.05		
D	271	57.39	59.25	2.28
	277	58.90		
	258	55.99		
	292	61.84		
	291	61.40		
	283	59.97		

Les coefficients de variation varient de 3 à 5% pour la résistance en compression à 4 jours, de 3 à 6% pour la résistance en compression à 28 jours et de 1 à 7% pour la résistance en compression après traitement thermique. Ce dernier résultat montre la faible variabilité des matériaux.

Selon la clause U.4.5.4.5 de la norme CSA A23.1, 30 essais consécutifs sur un minimum de 3 coulés sont nécessaires pour calculer la valeur caractéristique pour la carte d'identité du BFUP (la valeur caractéristique correspond alors à la valeur moyenne moins 1.4 fois l'écart type de 30 essais). Selon la clause U.4.1.2.1.1 la résistance en compression minimale à 28 jours est de 120 MPa pour le BFUP catégorie 120 et de 150 MPa pour le BFUP catégorie 150 avec une cure TN28 sans traitement thermique (selon U.4.1.6.3).

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

**Tableau 29 Résultats des essais de résistance à la
compression à 28 jours**

Fournisseur	Charge maximale (kN)	Contrainte maximale (MPa)	Moyenne (MPa)	Écart-type (MPa)
A	684	144.39	143.65	4.62
	638	136.92		
	695	146.95		
	702	146.35		
B	515	109.39	117.68	7.18
	580	122.04		
	572	121.60		
C	490	106.25	115.70	6.95
	557	120.05		
	521	112.06		
	493	107.34		
	569	121.32		
	562	120.82		
	578	122.09		
D	471	102.44	97.77	4.18
	434	94.38		
	444	96.50		

**Tableau 30 Résultats des essais de résistance à la
compression après traitement thermique**

Fournisseur	Charge maximale (kN)	Contrainte maximale (MPa)	Moyenne (MPa)	Écart-type (MPa)
A	865	188.04	192.97	12.90
	843	183.26		
	955	207.61		
B	746	162.17	151.96	9.00
	683	148.48		
	668	145.22		
C	723	157.17	157.90	1.07
	724	157.39		
	732	159.13		
D	669	145.43	147.17	7.12
	649	141.09		
	713	155.00		

4.1.2 Essai de module élastique

La norme ASTM C1856 recommande l'utilisation de cylindres de 75 mm de diamètre x 150 mm de longueur, avec un taux de charge-décharge de 1 MPa/s. Dans le cadre de ce projet de recherche, la taille des échantillons utilisée est de 100 mm de diamètre x 200 mm de longueur, car le laboratoire n'est pas encore équipé pour la mesure de module sur des échantillons plus petits. Le taux de chargement utilisé est conforme au taux recommandé par la norme ASTM et CSA, soit 1 MPa/s. Les essais de module élastique ont été réalisés après 28 jours de cure humide, avec 3 cylindres par fournisseur.

L'essai de module élastique consiste à 3 cycles de chargement et déchargement à vitesse contrôlée jusqu'à un taux de chargement prédéfini, correspondant à 40% de la charge maximale obtenue en compression. Le module élastique moyen de chacun des essais (Tableau 31) est calculé en suivant l'équation 1, en déterminant la relation « Charge-Déformation » pour les deux derniers cycles. Trois échantillons ont été testés pour chacun des matériaux, cependant une perte d'enregistrement des données de laboratoire est responsable des deux résultats présentés pour les matériaux A et C.

$$E = \frac{\sigma_{40\%} - \sigma_i}{\varepsilon_{40\%} - 0.000050} \quad [\text{Éq. 1}]$$

Où :

E = Module élastique (MPa)

$\varepsilon_{40\%}$ = Déformation linéaire atteinte à une charge correspondant à 40% de la charge maximale en compression

$\sigma_{40\%}$ = Contrainte correspondant à 40% de la charge maximale en compression (MPa)

σ_i = Contrainte correspondant à une déformation de 50 millièmes (MPa)

Les courbes force-déformation des différents matériaux sont présentées à la Figure 30. Des informations supplémentaires sont fournies à l'annexe 12.

Le module élastique varie considérablement selon le matériau 36 à 52 GPa, soit une différence maximale de 43% (Tableau 31). L'écart-type est du même ordre de grandeur 1.3 à 1.7 GPa, sauf pour le matériau C avec 5.4 GPa. Le coefficient de variation est également faible 2 à 4%, sauf pour le matériau C avec 13%.

Les différents cycles de charge-décharge, effectués sur le BFUP, varient très peu pour chacun des essais. Comme mentionné précédemment, le matériau C (Figure 30c) présente une variabilité plus importante que celle notée pour les 3 autres fournisseurs.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

Tableau 31 Résultats des essais de résistance de module élastique

Fournisseur	Aire moyenne (mm ²)	Masse volumique (kg/m ³)	Module élastique moyen (MPa)	Moyenne (MPa)	Écart-type (MPa)
A	7997	2550	50 683	51 574	1 260
	8167	2551	52 465		
B	7644	2366	37 503	35 970	1 367
	8264	2339	35 531		
C	8009	2451	45 837	42 024	5 393
	8177	2434	38 210		
D	8087	2341	38 429	39 925	1 752
	7769	2366	41 853		
	8209	2375	39 493		

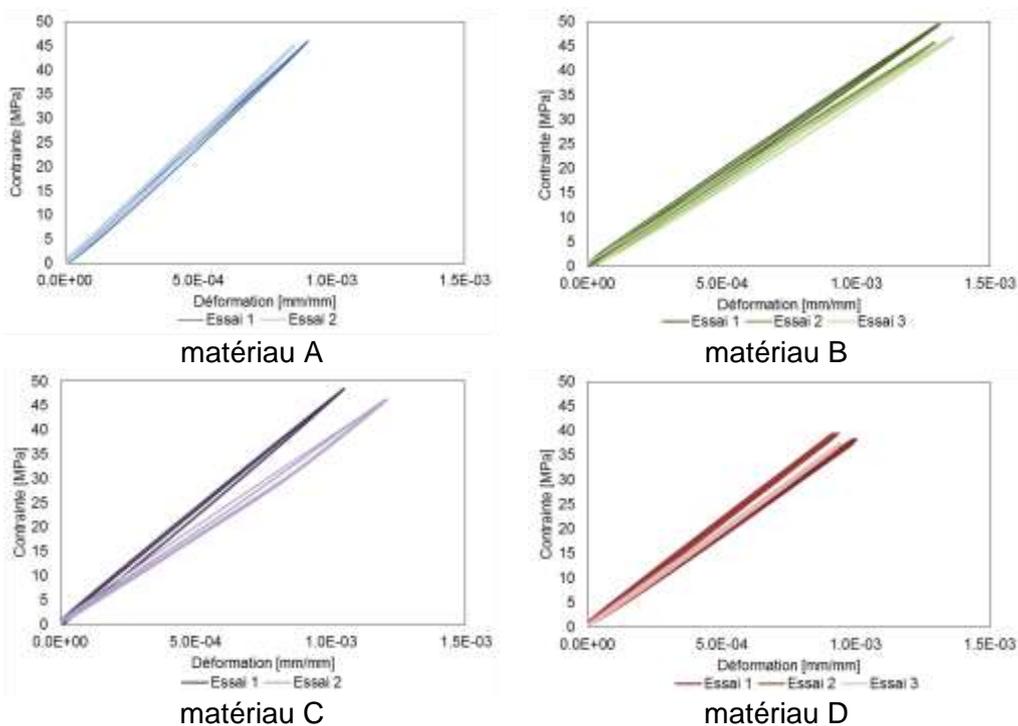


Figure 30 Courbes forces-déformation des essais de module élastique

4.1.3 Essai de résistance à la flexion à 3 points sur prismes entaillés (3PBT)

Dans le cadre de ce projet, les essais de flexion à 3 points ont été réalisés avec un contrôle de la presse déterminé sur le déplacement du vérin. Le taux de chargement était constant tout au long de l'essai, et est de 0.252 mm/min. Le taux de chargement utilisé est conforme à celui prescrit par la norme NF P18-470. Les essais ont été réalisés après les temps de cure suivants :

- 30 jours de cure pour les matériaux B et D;
- 31 jours de cure pour les matériaux A et C.

Les essais n'ont pu être réalisés après 28 jours de cure humide car, dans un souci de réduire le nombre de gâchées nécessaires (et donc de réduire la variabilité potentielle dans les matériaux finaux), les prismes servant aux différents essais de flexion ont tous été coulés au même moment (d'autres gâchées ont été nécessaires pour certains essais de reprises). Comme les trois essais nécessitent l'utilisation de la même presse et doivent être réalisés au même moment, un choix a dû être fait concernant l'ordre de réalisation des différents essais. Des essais de compression ont été réalisés à titre de contrôle lors des essais de flexion à 3 points afin de garantir une résistance en compression similaire à celle à 28 jours.

Une dimension standard de prisme a été choisie, soit 100 mm x 100 mm x 400 mm pour une portée de 300 mm et une entaille localisée à 150 mm des appuis. De ce fait, une légère déviation a eu lieu par rapport à la norme NF P18-470, qui recommande l'utilisation de prismes de différentes dimensions considérant la taille maximale des fibres utilisées dans la composition du BFUP. Selon les critères de la norme NF P18-470, les dimensions de la section transversale doivent être comprises entre 70 et 200 mm, en plus d'être comprise entre 5 et 7 fois la longueur des fibres utilisées. Dans le cadre de ce projet, les BFUPs A, B et D utilisent des fibres d'acier de longueur 12.5 mm, la taille maximale des échantillons selon les critères de la norme est donc de 87.5 mm. Puisque le BFUP C utilise des fibres de 19 mm de longueur maximale, une section transversale de 100 mm x 100 mm est conforme aux critères. Ainsi, par souci de cohérence entre les essais, une dimension uniforme de 100 mm x 100 mm a été choisie. La profondeur des entailles a été ajustée selon la longueur des fibres utilisée.

Les résultats des analyses des essais de résistance à la flexion à 3 points sur prismes entaillés (3PBT) sont présentés au Tableau 32. Les résultats présentés à cette section incluent les charges atteintes à la fin de la linéarité ainsi que la charge maximale, en plus des ouvertures de fissures associées à ces charges. Les zones grisées du tableau indiquent des données indisponibles.

Les courbes force-ouverture de fissure des différents matériaux sont présentées à la Figure 31. Des informations supplémentaires sont fournies en annexe 13.

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

Tableau 32 Résultats des essais de résistance à la flexion à 3 points sur prismes entaillés (3PBT)

Fournisseur	À la fin de la linéarité				Maximale			
	Essai (N)	Moyenne (N) [MPa]	Écart-type (N) [MPa]	Ouverture (mm)	Essai (N)	Moyenne (N) [MPa]	Écart-type (N) [MPa]	Ouverture (mm)
A-1	24 274	26 342 [9.137]	1 280 [0.444]	1.80E-02	44 834	45 885 [15.916]	2 983 [1.035]	0.3079
A-2	25 729			1.70E-02	48 062			0.4467
A-3	27 726			1.92E-02	40 957			0.4192
A-4	27 324			2.17E-02	47 422			0.2915
A-5	25 950			2.13E-02	44 847			0.4683
A-6	27 050			2.14E-02	49 189			0.2769
B-1	18 543	17 221 [5.973]	1 201 [0.417]	2.06E-02	41 387	25 483 [8.839]	9 684 [3.359]	0.8802
B-2	17 025			1.95E-02	19 836			0.5987
B-3	17 479			1.94E-02	23 087			0.8330
B-4	17 748			2.07E-02	26 729			0.4985
B-5	15 312			1.77E-02	16 374			0.7034
C-1					36 057			0.1205
C-2	22 842	21 493 [6.213]	939 [3.057]	3.00E-02	29 791	30 628 [10.624]	2 727 [0.946]	0.1145
C-3	21 705			2.15E-02	28 548			0.1226
C-4	21 368			2.23E-02	30 117			0.1203
C-5	20 222			2.09E-02	30 081			0.1231
C-6	21 328			2.23E-02	29 174			0.1137
D-1	24 164			21 423 [7.431]	1 588 [0.551]			2.26E-02
D-2	21 378	2.37E-02	25 365			0.4162		
D-3	20 403	2.09E-02	25 323			0.4397		
D-4	20 334	1.97E-02	23 126			0.5179		
D-5	20 835	2.09E-02	20 835			0.0209		

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

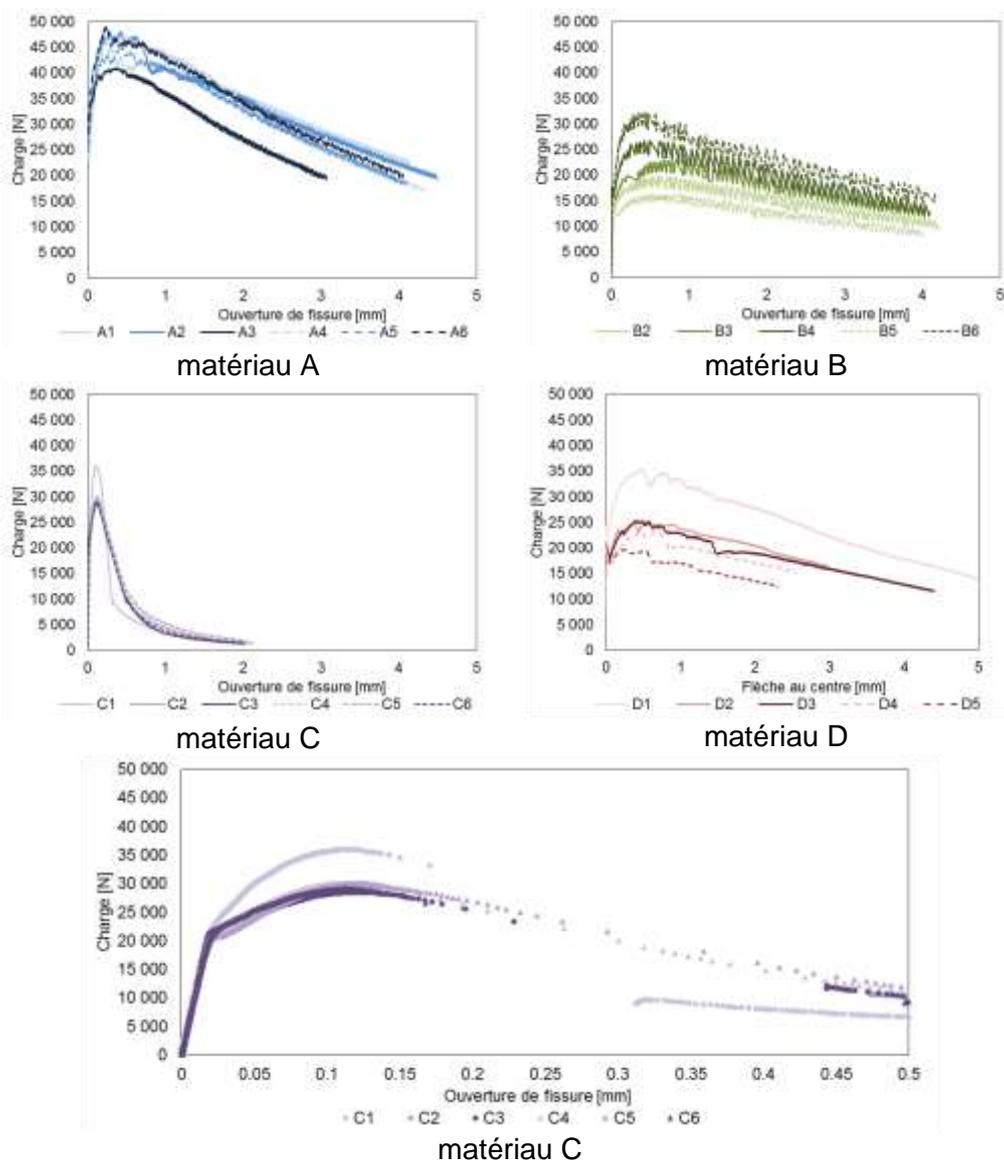


Figure 31 Courbes force-ouverture de fissure des essais de résistance à la flexion à 3 points sur prismes entaillés (3PBT)

Les résultats présentés au Tableau 32 et aux Figure 31 et Figure 32 permettent de faire ressortir certains points importants :

- dans le cas des matériaux A, B et D, il est possible de remarquer l'effet bénéfique des fibres sur la ductilité, en permettant une augmentation plus ou moins importante de la charge avec l'ouverture de la fissure. Une répétabilité acceptable est obtenue pour ces 3 matériaux ; le comportement général est similaire entre chacun des essais;
- pour le matériau A, les 6 échantillons ont présenté des comportements très constants entre eux. La charge à la fin de la linéarité est d'approximativement de 26,3 kN, alors qu'elle est de presque 46 kN au maximum ; le matériau possède ainsi un

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

comportement écrouissant en flexion. Le comportement post-pic (après l'atteinte de la charge maximale) est similaire pour tous les échantillons testés;

- pour le matériau B, le glissement des fibres à l'intérieur de la matrice est responsable de l'effet « dents de scie » des courbes. Bien que le comportement entre chacune des courbes soit plutôt similaire, une très grande variabilité au niveau de la charge maximale atteinte est notée :
 - l'échantillon B1 n'est pas présenté à la Figure 31 car les données de l'extensomètre (donnant la lecture de l'ouverture de fissure) se sont avérées erronées. Néanmoins, la charge maximale atteinte lors de cet essai est considérablement plus élevée que lors des essais avec les échantillons B2 à B5;
 - l'échantillon B2 présente un comportement très peu écrouissant, la charge atteinte à la fin de la linéarité est très près de la charge maximale atteinte lors de l'essai, soit 17 et 19.8 kN;
 - les échantillons B3, B4 et B6 démontrent un comportement écrouissant, avec une augmentation notable de la charge entre la fin de la linéarité et la charge maximale atteinte;
 - l'échantillon B5, comme l'échantillon B2, possède un comportement très peu écrouissant;
- pour le matériau C, il convient d'indiquer que les fibres ont très peu contribué à la résistance de la section fissurée. L'échantillon s'est fendu subitement dès l'ouverture de la fissure, démontrant un comportement très fragile. La Figure 31 présente un agrandissement de la première portion de la courbe Charge-Ouverture de fissure. Les données sont représentées sous forme de points provenant de l'enregistrement, plutôt que sous forme d'une courbe lissée; il est possible de remarquer que très peu de données ont été enregistrées directement après l'atteinte de la charge maximale, indiquant que la résistance s'est abaissée très subitement. La zone, correspondant à la fin de la linéarité, est particulièrement difficile à déterminer, car la transition entre la zone élastique et la fissuration est très mince;
- pour le matériau D, la charge obtenue à la fin de la linéarité est relativement constante pour chacun des essais, et se situe approximativement à 21.5 kN. L'ouverture de fissure à cette charge est également assez constante. Les essais ont donc un comportement similaire entre eux jusqu'à la limite de linéarité. Le comportement des échantillons entre la limite de linéarité et la charge maximale varie sensiblement :
 - l'essai D1 présente une augmentation considérable de la charge, passant de 24.2 kN à 35.4 kN;
 - les essais D2, D3 et D4 ont un comportement écrouissant moins prononcé que pour l'essai 1; la charge augmente de 20.7 kN à 24.6 kN en moyenne;

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

- l'essai D5 présente un comportement adoucissant ; la charge atteinte à la fin de la linéarité ne cesse de diminuer tout au long de l'essai;
- le comportement post-pic (la pente de déchargement après l'atteinte de la charge maximale) est similaire entre tous les essais.

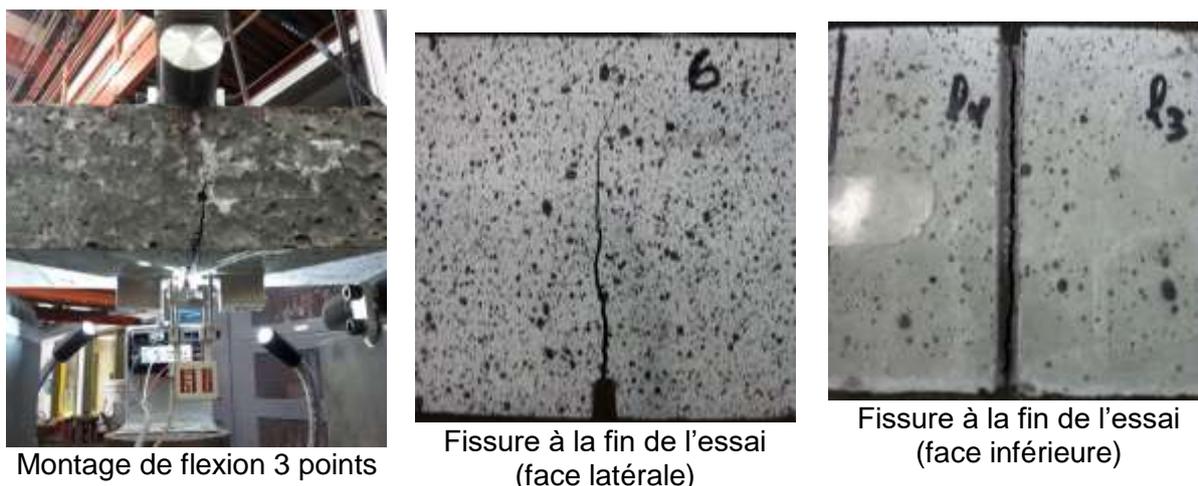


Figure 32 Montage et résultats des essais de flexion à 3 points

4.1.4 Essai de résistance à la flexion à 4 points sur prismes non entaillés (4PBT)

Dans le cadre de ce projet, les essais ont été réalisés avec un contrôle en déplacement correspondant au déplacement du vérin, équivalent à 0.0042 mm/sec (ou 0.252 mm/min). Le taux de chargement utilisé est conforme à celui prescrit par la norme ASTM C1609 et reste constant tout au long de l'essai. Les essais ont été réalisés à 28 jours de cure humide sur 3 échantillons par fournisseur.

Une dimension standard de prisme a été choisie, soit 100 mm x 100 mm x 400 mm pour une portée de 300 mm. Il est à noter que la clause de la norme ASTM C1856, qui recommande l'utilisation de prismes de différentes dimensions considérant la taille maximale des fibres utilisées dans la composition du BFUP, n'a pas été appliquée pour favoriser la comparaison entre les résultats sur les différents BFUPs. Selon le Tableau 33, tiré de la norme ASTM C1856, la dimension de poutre recommandée est de 75 mm x 75 mm pour des échantillons avec des fibres inférieures à 15 mm, ce qui est le cas pour les BFUPs A, B et D. Cependant, puisque le BFUP C utilise des fibres comprises entre 15 et 20 mm, et par souci de cohérence entre les essais, une taille uniforme de 100 mm x 100 mm a été choisie pour tous les essais.

Tableau 33 Dimensions de la section transversale des échantillons de flexion, selon la norme américaine ASTM C1856

Longueur maximale des fibres (l_f), en mm	Dimensions nominales de la section transversale, en mm
< 15	75 x 75
de 15 à 20	100 x 100
de 20 à 25	150 x 150
> 25	200 x 200

Source : (ASTM 2017a)

Les résultats des analyses des essais de résistance à la flexion à 4 points sur prismes non entaillés (4PBT) sont présentés au Tableau 34 et à la Figure 34. Les zones grisées du Tableau 34 pour le matériau C indiquent des données manquantes, car le matériau C ne présente aucune résistance aux déflexions concernées. Des informations supplémentaires sont fournies en annexe 14. Les résultats présentés incluent les contraintes flexionnelles déterminées aux points suivants :

- fin du comportement linéaire, noté par une rupture de la droite élastique [Éq. 2];
- atteinte du chargement maximal [Éq. 3];
- charge résiduelle à une flèche équivalente à 1/600 de la portée (soit 0.5 mm) [Éq. 4];
- charge résiduelle à une flèche équivalente à 1/150 de la portée (soit 2 mm) [Éq. 5].

Les formules nécessaires pour le calcul des différentes contraintes, en fonction des charges obtenues expérimentalement, sont présentées ci-dessous.

$$f_1 = \frac{P_{EoL}L}{bd^2} \quad [\text{Éq. 2}]$$

$$f_p = \frac{P_{max}L}{bd^2} \quad [\text{Éq. 3}]$$

$$f_{600} = \frac{P_{600}L}{bd^2} \quad [\text{Éq. 4}]$$

$$f_{150} = \frac{P_{150}L}{bd^2} \quad [\text{Éq. 5}]$$

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

Où :

- b = Largeur de l'échantillon (mm)
- d = Hauteur de l'échantillon (mm)
- L = Portée (mm)
- f_1 = Contrainte flexionnelle correspondant à la charge atteinte à la fin de la linéarité (MPa)
- f_p = Contrainte flexionnelle correspondant à la charge maximale (MPa)
- f_{600} = Contrainte flexionnelle correspondant à la charge atteinte à la une déflexion de 0.5 mm (MPa)
- f_{150} = Contrainte flexionnelle correspondant à la charge atteinte à la une déflexion de 2 mm (MPa)
- P_{EoL} = Charge atteinte à la fin de la linéarité (N)
- P_{Max} = Charge maximale enregistrée en cours d'essai (N)
- P_{600} = Charge résiduelle à une flèche de 0.5 mm (N)
- P_{150} = Charge résiduelle à une flèche de 2 mm (N)

La Figure 33 présente la localisation des différents points d'intérêt déterminés à l'aide des équations 2 à 5.

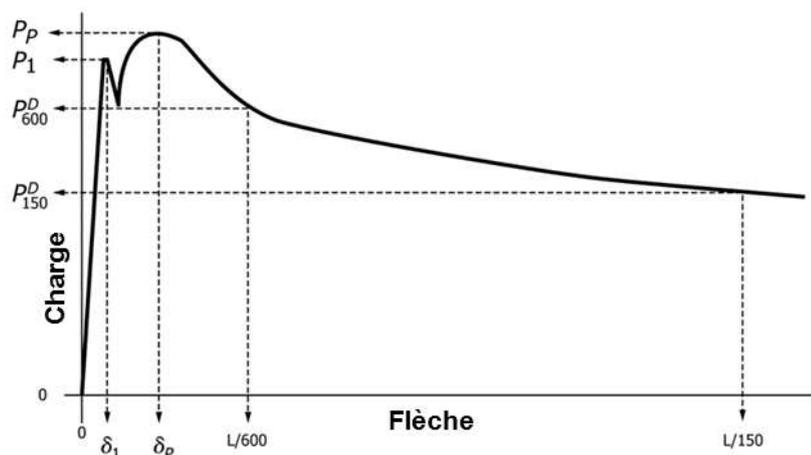


Figure 33 Positionnement des points d'intérêt pour l'analyse des essais de flexion à 4 points sur prismes selon l'ASTM C1609

Source : (ASTM 2012a)

Les courbes force-flèche des différents matériaux sont présentées à la Figure 34.

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

Tableau 34 Résultats des essais de résistance à la flexion à 4 points sur prismes non entaillés (4PBT)

Fournisseur	Contrainte 1 ^{er} pic (f_1) (MPa)	Moyenne ($f_{1,\mu}$) (MPa)	Écart- type ($f_{1,\sigma}$) (MPa)	Contrainte maximale (f_p) (MPa)	Moyenne ($f_{p,\mu}$) (MPa)	Écart- type ($f_{p,\sigma}$) (MPa)	Contrainte résiduelle (f_{600}) (MPa)	Moyenne ($f_{600,\mu}$) (MPa)	Écart- type ($f_{600,\sigma}$) (MPa)	Contrainte résiduelle (f_{150}) (MPa)	Moyenne ($f_{150,\mu}$) (MPa)	Écart- type ($f_{150,\sigma}$) (MPa)
A	16.16	16.30	0.14	18.81	20.42	3.79	18.11	19.73	4.16	9.42	10.94	2.44
	16.44			17.70			16.62			9.64		
	16.31			24.76			24.45			13.75		
B	13.06	13.66	0.63	13.06	14.23	1.12	11.52	13.09	1.45	5.98	6.95	1.57
	14.32			14.32			13.40			6.11		
	13.61			15.30			14.36			8.77		
C	15.88	15.70	0.31	16.68	15.98	0.65						
	15.34			15.39								
	15.88			15.88								
D	13.55	13.18	0.42	14.22	13.92	1.08	13.16	12.32	1.95	6.94	6.44	1.20
	13.28			14.82			13.71			7.31		
	12.72			12.72			10.09			5.08		

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

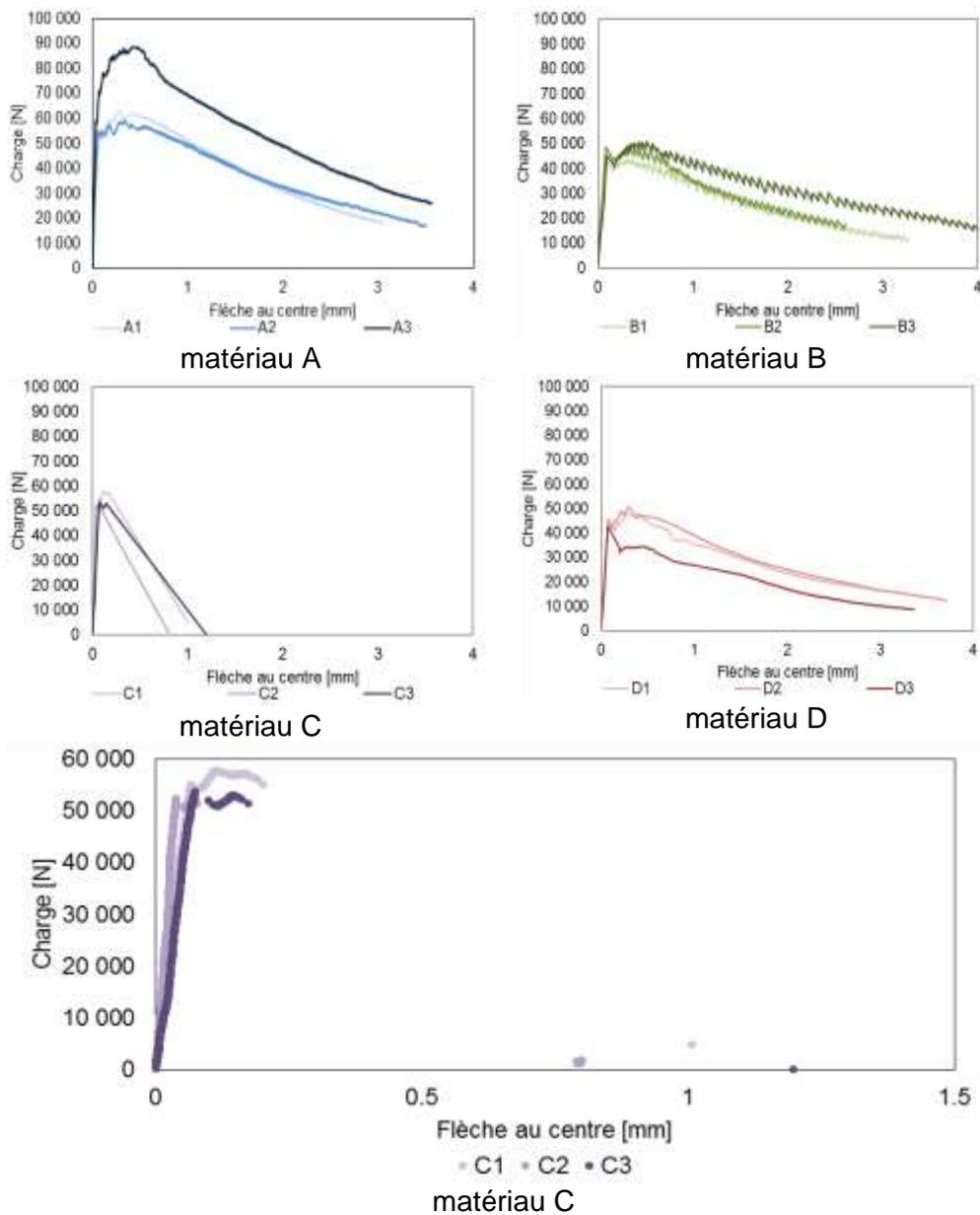


Figure 34 Courbes force-flèche des essais de résistance à la flexion à 4 points sur prismes non entaillés (4PBT)

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)



Montage pour l'essai de flexion à 4 points



Multifissuration observable après humidification des échantillons

Figure 35 Essai de flexion à 4 points et multi-fissuration observable

Les résultats permettent de faire ressortir certains points importants (Figure 35) :

- pour le matériau A, les résultats expérimentaux indiquent que le matériau fourni possède un comportement écrouissant en flexion (c.-à-d., la résistance augmente sensiblement après l'atteinte de la fin de la linéarité) ce qui pourrait correspondre à un BFUP écrouissant en traction (THFRC) ou adoucissant en traction (TSFRC) selon la norme CSA (Canadian Standard Association 2019). Une différence considérable est notée entre le comportement des poutres A1, A2 et la poutre A3 : alors que la contrainte notée à la fin de la linéarité est similaire (de l'ordre de 16 MPa), la contrainte maximale est très différente, approximativement 18 MPa pour les poutres A1 et A2 et 25 MPa pour la poutre A3. Le comportement adoucissant (de la charge maximale jusqu'à la fin de l'essai) est similaire pour tous les essais;
- pour le matériau B, le comportement des trois essais jusqu'à la fin de la linéarité du matériau est très similaire ; la résistance moyenne est de l'ordre de 13.66 MPa. Il est à noter que la fin de la linéarité est marquée par une chute notable de la résistance de l'échantillon. Le comportement des échantillons entre la limite de linéarité et la charge maximale varie sensiblement :

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

- les essais B1 et B2 présentent un comportement adoucissant en flexion (c.-à-d., la résistance augmente sensiblement après l'atteinte de la fin de la linéarité) ce qui devrait correspondre à un BFUP adoucissant en traction (TSFRC) selon la norme CSA (Canadian Standard Association 2019). Après l'atteinte de la limite élastique et la création de la première fissure les échantillons présentent un gain de charge ; ce gain de charge est toutefois inférieur à la charge maximale atteinte à la fin de la linéarité;
- l'essai B3 présente un comportement écrouissant en flexion, où la résistance augmente sensiblement après l'atteinte de la fin de la linéarité;
- globalement, le comportement adoucissant en flexion des essais est similaire entre les 3 essais. Le même phénomène de dents de scie est noté lors de cet essai ; l'effet y est toutefois moins important que pour l'essai de flexion à 3 points sur prismes entaillés;
- pour le matériau C, l'atteinte de la limite élastique a entraîné une rupture soudaine des échantillons, confirmant dès lors les résultats obtenus avec les essais de flexion sur prismes entaillés. Les fibres ne peuvent reprendre la contrainte dans la matrice et cèdent dès l'ouverture de la fissure. La Figure 34 présente, comme pour les essais 3PBT, les résultats sous forme de nuage de points plutôt que par une courbe lissée. L'absence de points dans la phase descendante des essais indiquent une rupture très subite des échantillons. Par conséquent, ce matériau est jugé très fragile en flexion;
- pour le matériau D, le comportement des trois essais jusqu'à la fin de la linéarité du matériau est très similaire ; la résistance moyenne est de l'ordre de 13.2 MPa. Il est à noter que la fin de la linéarité est marquée par une chute plus ou moins marquée de la résistance de l'échantillon, dépendamment de l'essai. Le comportement des échantillons entre la limite de linéarité et la charge maximale varie sensiblement :
 - les essais D1 et D2 présentent un comportement écrouissant en flexion;
 - l'essai D3 présente un comportement adoucissant en flexion, ce qui correspond à un BFUP adoucissant en traction (TSFRC) selon la norme CSA (Canadian Standard Association 2019). La charge notée à la fin de la linéarité correspond également à la charge maximale, et une baisse importante de sa résistance est observée de la poutre après l'atteinte de la charge maximale, qui correspond également à sa charge à la fin de la linéarité;
 - globalement, le comportement adoucissant des essais (après l'atteinte de la charge maximale) est similaire entre les 3 essais.

4.1.5 Essai de résistance à la flexion à 4 points sur dalles minces (4PBT-DM)

Dans le cadre de ce projet, les essais ont été réalisés avec un contrôle du déplacement correspondant au déplacement du vérin. Le taux de chargement choisi est de 0.498 mm/min jusqu'à la charge maximale. Le taux de chargement est par la suite augmenté à 5 mm/min dans la phase d'ouverture de fissures, jusqu'à la fin de l'essai. Le taux de chargement utilisé est conforme à celui prescrit par la norme SIA 2052. Les essais ont été réalisés après les temps de cure suivant :

- 28 jours pour le matériau D;
- 35 jours pour les matériaux A, B et C.

Les dimensions utilisées pour les échantillons respectent les critères de la norme SIA 2052, soit des échantillons de 30 mm x 100 mm x 500 mm, avec une portée de 420 mm. Contrairement à ce que la norme recommande, le dessus des échantillons n'a pu être rectifié préalablement aux essais.

Les résultats des analyses des essais de résistance à la flexion à 4 points sur dalles minces (4PBT-DM) sont présentés au Tableau 35. Les zones grisées du tableau correspondent à des données manquantes, causées par un capteur défectueux (pour l'échantillon A1) et une impossibilité de cibler adéquatement le point correspondant à la fin de la linéarité (pour l'échantillon A3). Les courbes force-flèche des différents matériaux sont présentées à la Figure 36. Des informations supplémentaires sont fournies en annexe 15.

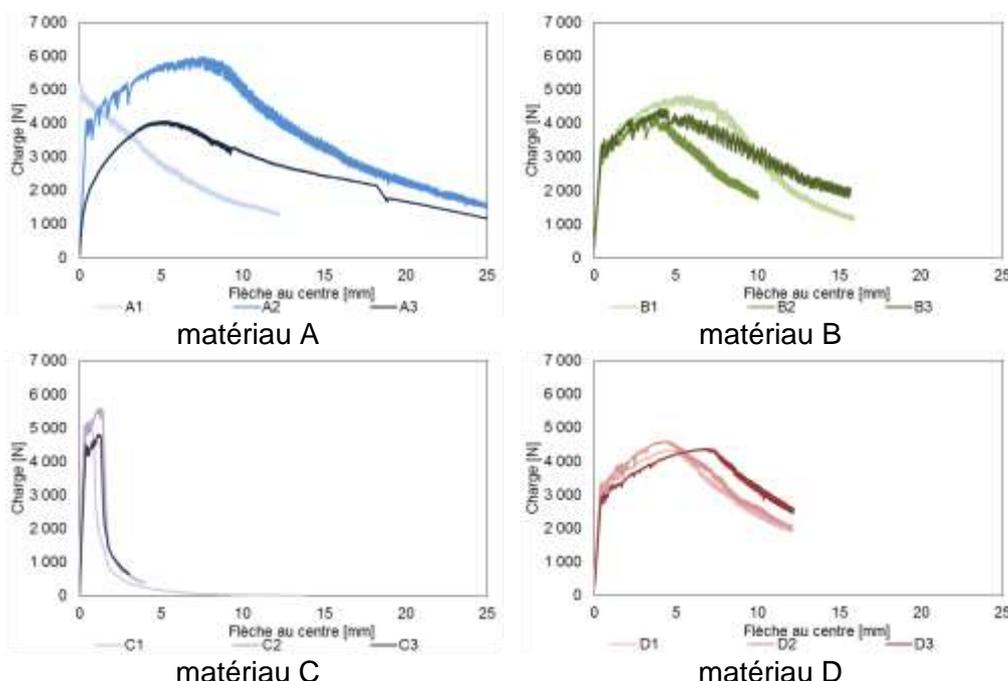


Figure 36 Courbes force-flèche des essais de résistance à la flexion à 4 points sur dalles minces (4PBT-DM)

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

Tableau 35 Résultats des essais de résistance à la flexion à 4 points sur dalles minces (4PBT-DM)

Fournisseur	À la fin de la linéarité				Maximale			
	Essai (N)	Moyenne (N)	Écart-type (N)	Flèche (mm)	Essai (N)	Moyenne (N)	Écart-type (N)	Flèche (mm)
A-1		4085			5146	5055	956	
A-2	4085			0.428	5963			7.340
A-3					4057			5.138
B-1	3232	3372	153	0.433	4823	4477	322	5.735
B-2	3348			0.521	4186			3.145
B-3	3535			0.651	4422			4.193
C-1	5096	4889	332	0.287	5192	5196	392	0.744
C-2	5065			0.395	5591			1.256
C-3	4507			0.398	4807			1.143
D-1	2913	3110	298	0.451	4330	4432	140	4.711
D-2	3453			0.790	4591			4.248
D-3	2965			0.435	4375			6.874



Figure 37 Essai de flexion à 4 points sur dalles minces

Les résultats présentés au Tableau 35 et aux Figure 36 et Figure 37 permettent de faire ressortir certains points importants concernant les essais de flexion à 4 points sur dalles minces.

- pour le matériau A :
 - pour l'échantillon 1, une perte de signal a été notée lors du chargement, résultant en la première partie de la courbe de chargement étant manquante. La partie adoucissante de l'essai, située après l'atteinte de la charge maximale, est similaire à celle obtenue pour l'essai 2;
 - l'essai 2 a présenté un comportement linéaire jusqu'à une charge approximative de 4 kN, puis un comportement de multifissuration entre 4 et 6 kN, avec une flèche au centre variant entre 1 jusqu'à 8 mm. La localisation de la fissure principale s'est produit à une charge maximale de près de 6 kN, puis sa résistance diminue graduellement jusqu'à l'arrêt de l'essai;
 - l'échantillon 3 a présenté un comportement tout à fait différent de l'essai 2, ne présentant pas de fin bien défini de sa limite de linéarité. Le comportement écrouissant en flexion avec fissuration multiple est aussi beaucoup plus lisse (phénomène en « dents de scie » enregistré lors de l'essai),

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

- moins important (compris entre 1 et 5 mm, 1 kN et 4 kN) et avec une pente d'écroûissage plus élevée. Le comportement après l'atteinte de la charge maximale est moins brusque que pour l'essai 2;
- globalement, l'essai a présenté beaucoup de variabilité ; bien que les échantillons 2 et 3 présentent chacun un comportement écroûissant, la différence considérable notée pourrait être due à un défaut initial (ex. une pré-fissuration dû à un défaut au retrait) ou à une orientation préférentielle des fibres;
 - pour le matériau B, les échantillons ont présentés des comportements globalement similaires, atteignant une charge à la fin de la linéarité d'environ 3.4 kN. Une variabilité un peu plus importante est enregistrée pour la charge maximale. Finalement, une certaine différence est notée dans le comportement post-pic entre les essais B1 et B2 et l'essai B3 :
 - pour l'essai B1, la charge maximale obtenue est de plus de 4800 N, pour une flèche de 5.7 mm. Après l'atteinte de la charge maximale, sa résistance diminue rapidement, présentant même une résistance plus faible que l'échantillon 3 après l'atteinte d'une flèche d'environ 10 mm;
 - pour l'essai B2, la zone de multi fissuration est beaucoup plus courte et brusque que celle notée pour les deux autres essais. Sa partie adoucissante présente des similarités avec celle de l'échantillon 1;
 - pour l'essai 3, le comportement jusqu'à la charge maximale représente plutôt bien la moyenne des essais 1 et 2. Après l'atteinte de la charge maximale, le comportement adoucissant est marqué par de brusques « changements » représentant le glissement des fibres;
 - globalement, les essais faits sur le matériau B présentent beaucoup de bruits dans les données, dû aux interactions fibres-matrices;
 - pour le matériau C, contrairement aux essais faits sur prismes, un très léger comportement écroûissant en flexion est noté après l'atteinte de la linéarité élastique. Les différents échantillons ont cependant présenté une rupture encore une fois très fragile. La limite élastique notée, comprise entre 4 et 5 kN, est la plus haute de tous les matériaux testés. Cependant, le comportement fragile et le manque flagrant de contribution des fibres, dès que la charge maximale est atteinte, rendent ce matériau peu efficace en flexion post-fissuration;
 - pour le matériau D, les essais ont présenté un comportement assez similaire et une bonne reproductibilité, autant par des écarts-types faibles que par le comportement observé directement à la Figure 36. L'atteinte de la limite élastique est bien marquée, le comportement écroûissant en flexion (entre la fin de la linéarité et la charge

maximale) est similaire et le comportement après la charge est également très comparable :

- les essais D1 et D2 ont présenté un comportement très similaire tout au long de l'essai, les courbes se confondant à plusieurs endroits;
- l'essai D3 a présenté un domaine écrouissant légèrement plus long que pour les essais D1 et D2 mais, globalement, la résistance maximale atteinte et le comportement après la charge maximale sont comparables aux deux autres essais.

4.1.6 Essai de résistance à la traction directe

La caractérisation de la résistance à la traction directe du BFUP reste un sujet très discuté et aucun essai n'est, pour l'instant, unanimement accepté par la communauté scientifique. Peu de codes incluent pour l'instant cet essai dû à la difficulté à reproduire des résultats constants et des recherches sont toujours en cours afin de développer un essai plus performant et facile à réaliser.

L'essai proposé dans le cadre de ce projet est fortement basé sur l'essai de traction directe développé par le groupe MCS du professeur E. Brühwiler à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) (Hajiesmaeili et Denarié 2018; Helbling et Brühwiler 1987). De légères modifications ont été apportées, suite à l'expérience acquise à l'Université Laval et également dû à des contraintes inhérentes aux équipements utilisés.

L'échantillon utilisé pour l'essai de traction directe est une version surdimensionnée de l'échantillon proposé dans le cahier technique de la SIA (SIA 2016). La Figure 38 présente un comparatif entre les dimensions de l'échantillon présenté dans la norme SIA et celui utilisé à l'Université Laval. La forme de la zone de transition (zone arrondie entre la zone centrale et les zones d'extrémités) a été réutilisée (après mise à l'échelle) sur l'échantillon proposé dans ce rapport. L'épaisseur des échantillons testés à l'université Laval est d'approximativement 57 mm; les échantillons peuvent ensuite être surfacés à une épaisseur de 50 mm pour éliminer la peau de surface du BFUP, qui contient moins de fibres et qui présente une résistance plus limitée en traction. Dans le cadre des essais à l'université Laval, la surface supérieure des échantillons (surface non coffrée) n'a pas été surfacée.

L'utilisation d'un échantillon de cette dimension fourni les avantages suivants :

- orientation des fibres moins favorable dans la zone centrale due aux effets de parois moins importants pour des fibres standard de 12 à 13 mm;
- utilisation possible avec des presses de grande capacité sans avoir à utiliser des cellules de charge de faible capacité;
- possibilité d'effectuer des essais de durabilité sur la section centrale avec un montage spécial utilisant des cellules de migration typiques.

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

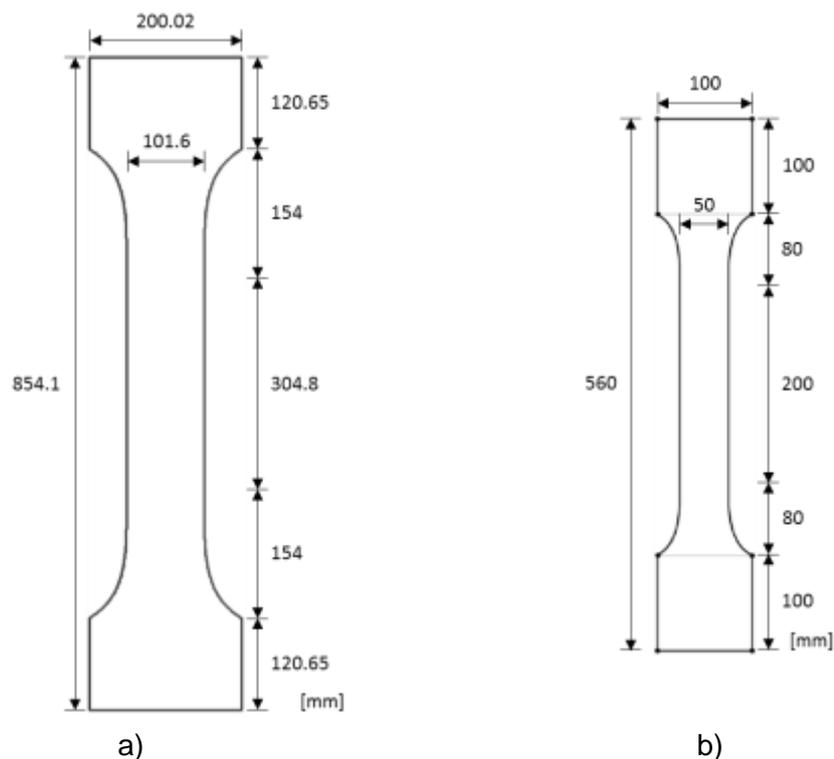


Figure 38 Comparaison des échantillons utilisés pour la caractérisation en traction directe ; a) dimensionnement de l'échantillon de l'université Laval, b) dimensionnement selon la norme SIA

Cependant, la taille des échantillons requiert un volume de matériau considérable (approximativement 6L), et les échantillons deviennent plus difficiles à manipuler dû à leur poids (approximativement 14 à 16 kg).

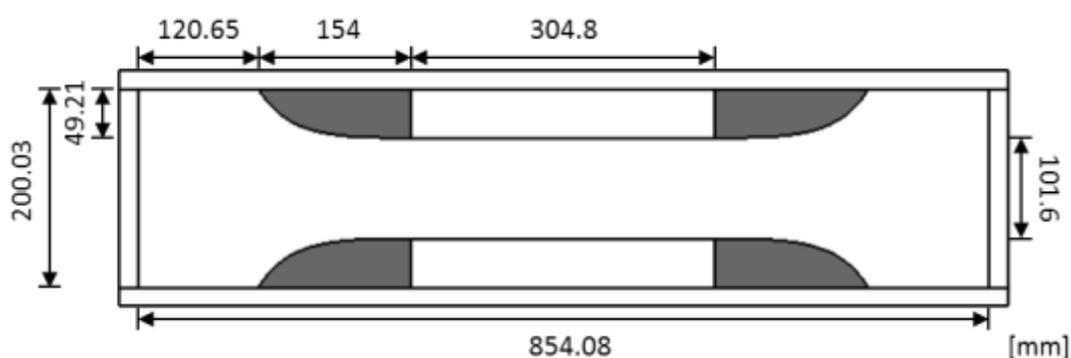


Figure 39 Spécificité des moules utilisés pour les échantillons de traction

Afin de prévenir le risque d'apparition de fissures de retrait restreint dans les échantillons, les moules ont été conçus afin d'incorporer des éléments déformables en silicone dans les zones de transition. Ces éléments permettent suffisamment de déformation du BFUP pour prévenir la fissuration avant le démoulage. Afin d'assurer l'absence de microfissuration de retrait, des échantillons sans fibres ont été coulés à titre d'essais

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

préliminaires ; aucune fissuration dans ces échantillons n'a été notée. La Figure 39 indique la position des pièces des arrondis déformables (grisées) dans les moules utilisés. Le reste du moule a été fabriqué en HDPE, un type de plastique particulièrement lisse qui permet d'obtenir à la fois des surfaces très propres et qui facilite également le démoulage.

Le montage consiste en un ensemble de mâchoires robustes en acier, qui vient s'insérer dans les mâchoires ajustables de la presse MTS 322. L'effort de traction est transmis des mâchoires en acier à l'échantillon de BFUP au moyen d'une colle époxy bi-composante (dans le cadre des essais présentés dans ce rapport, la colle utilisée est l'Araldite AW 2101 et le durcisseur 2951). La colle vient recouvrir complètement les faces des échantillons, alors qu'elle vient se buter aux différentes rainures présentes sur les plaques. C'est par cet effet de butée que la charge est retransmise du montage expérimental à l'échantillon. Le principe de l'essai est le suivant (procédure encore en développement):

1. les montages d'essai sont installés dans les mâchoires de la presse, et l'alignement est vérifié à l'aide de laser et de repères gravés sur les pièces afin d'assurer un effort le plus uniaxial possible;
2. les mâchoires en acier sont recouvertes entièrement d'un agent graissant (dans le cadre des essais réalisés dans ce projet de recherche, une huile antirouille en aérosol a été utilisée), afin de prévenir l'adhésion de la colle sur les différentes pièces du montage;
3. la colle Araldite est appliquée généreusement sur les faces rainurées des pièces d'acier, ainsi que sur les différentes faces des échantillons;
4. les échantillons sont insérés dans les montages, puis centrés afin de minimiser les efforts et les moments parasites lors des essais;
5. la colle est laissée pour un minimum de 12 heures, avant de procéder à l'essai;
6. les différents capteurs (extensomètres et LVDTs) sont positionnés aux endroits nécessaires afin de bien suivre les déformations en cours d'essai. Les capteurs permettent de déterminer les déformations de la zone centrale (de largeur uniforme) sur les faces « avant » et « arrière », ainsi que la déformation totale de l'échantillon (déformation mesurée à partir de la limite des mâchoires inférieures et supérieures), sur les faces « gauche » et « droite ». Le pilotage de l'essai est basé sur la déformation totale de l'échantillon;
7. une précharge est appliquée sur l'échantillon, de façon à atteindre une déformation uniforme avant le début de l'essai. La précharge est limitée à 10% de la charge de rupture estimée;
8. les capteurs de déformations sont remis à zéro, et l'essai est débuté;
9. l'essai est arrêté lorsque la charge atteinte correspond à 10 à 20% de la charge maximale mesurée en cours d'essai.

Cette configuration optimisée a été utilisée avec:

- une machine d'essai rigide (4 colonnes);
- des conditions de support fixes / fixes pour l'échantillon;

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

- un alignement très précis de l'échantillon grâce à une procédure spéciale permettant de le relier directement à la machine sans serrage. Les spécimens ont été reliés au montage de test au moyen de l'approche « gluing without bonding » proposée par [(Helbling et Brühwiler 1987)], et appliquée à un spécimen en forme d'haltère. L'utilisation de la colle permet de réduire les concentrations de contraintes liées à l'utilisation de systèmes tels que le pincement des échantillons par le dispositif d'essai.

L'instrumentation des échantillons comprend l'utilisation de deux extensomètres et de deux LVDTs. La Figure 40 présente un échantillon totalement instrumenté installé dans la presse MTS.



Figure 40 Instrumentation pour les échantillons de traction directe

Les extensomètres sont situés sur les faces avant (face à la caméra) et arrière (surface non coffrée) des échantillons.

Les essais de traction directe sont analysés selon la méthodologie proposée dans la norme SIA 2052, bien que la dimension des échantillons utilisés soit différente (voir Figure 38). De plus, dans le cadre de ce projet de recherche, seulement 2 échantillons sont testés en traction directe, et aucun essai de cyclage n'a été effectué. Ceci a pour effet que la détermination du module élastique et de la fin de la linéarité est plus sensible, car les différentes imperfections du montage d'essai et de l'échantillon affectent la rigidité.

La fin de la linéarité est déterminée comme la diminution irréversible de 10% du module élastique sécant moyen par rapport au module élastique sécant moyen déterminé à une valeur de référence. La valeur de référence choisie dans ce rapport est de 2 MPa, en accord avec la norme SIA 2052. Le module sécant instantané, pour un certain couple (w_i , F_i), est donné selon l'équation

[Éq. 6]. Le module moyen est considéré comme la moyenne des 10 modules sécants précédents le point à l'étude, tel que décrit par l'équation [Éq. 7].

$$E_i = \frac{F_i}{b_m h_m} \frac{l_{mes}}{w_{Uti}} \rightarrow \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \quad [\text{Éq. 6}]$$

$$E_{mi} = \frac{1}{10} \left(\sum_{i=11}^{i-1} E_i \right) \rightarrow \forall i > 12 \quad [\text{Éq. 7}]$$

Où :

- $b_m =$ Largeur moyenne de l'échantillon (mm)
- $h_m =$ Hauteur moyenne de l'échantillon (mm)
- $l_{mes} =$ Longueur de mesure du capteur de déformation (mm)
- $w_{Uti} =$ Déformation au temps i de l'essai
- $E_i =$ Module sécant instantané (MPa)
- $E_m =$ Module sécant moyen (MPa)
- $F_i =$ Force au temps i de l'essai (N)

Ce module élastique moyen est alors mis en graphique en fonction de la contrainte déterminée (σ_i) en cours d'essai. La charge atteinte à la fin de la linéarité (F_A) permet de déterminer la résistance en traction du matériau à la fin de la linéarité, selon l'équation [Éq. 8]. Le module élastique du matériau est alors choisi comme le module sécant déterminé à la charge F_A .

$$f_{Ute} = \frac{F_A}{b_m h_m} \quad [\text{Éq. 8}]$$

Le calcul de la résistance maximale en traction dépend du comportement du matériau testé :

- si le matériau présente un comportement écrouissant, la charge maximale atteinte en cours d'essai est choisie, et la contrainte maximale est déterminée selon l'équation [Éq. 9]. La déformation maximale est alors la déformation correspondant à cette charge;
- si le matériau présente un comportement adoucissant en traction, la force moyenne choisie pour le calcul de la résistance maximale est déterminée en calculant l'aire sous la courbe Force – Déplacement, jusqu'à un déplacement de 0.4 mm, puis en divisant cette valeur par le déplacement (0.4 mm) (équation [Éq. 10]). La résistance est alors calculée selon la même équation que pour un BFUP écrouissant, soit l'équation [Éq. 9];
- dans le cadre de ce projet, une catégorie « Fragile » a été considérée pour un matériau présentant une perte de résistance instantanée et totale après l'atteinte de la charge maximale. Les matériaux considérés comme « Fragile » ne présentent

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

pratiquement aucune résistance après l'atteinte de la charge maximale.

$$f_{utu} = \frac{F_B}{b_m h_m} \quad [\text{Éq. 9}]$$

$$F_B = \frac{A_{0.4}}{0.4 \text{ mm}} \quad [\text{Éq. 10}]$$

Où :

f_{utu} = Résistance à la traction, selon l'analyse inverse des résultats de flexion à 4 points sur dalles minces (MPa)

$A_{0.4}$ = Aire sous la courbe Force – Déplacement, jusqu'à un déplacement de 0.4 mm (N mm)

F_B = Charge maximale enregistrée au cours de l'essai (N)

La norme SIA ne propose pas d'équations pour le calcul de la loi de traction lorsque le point B est dépassé, soit à la charge maximale pour un BFUP écrouissant, soit à un déplacement de 0.4 mm dans le cadre d'un BFUP adoucissant. Les résultats des analyses des essais de résistance à la traction directe sont présentés au Tableau 36 ci-dessous. Les courbes contrainte-déformation des différents matériaux sont présentées à la Figure 41 et la fissuration à la rupture à la Figure 42.

Le BFUP A et D ont montré un comportement de traction écrouissant avec une contrainte maximale de 11.4 et 9.4 MPa, respectivement, et une déformation au pic d'environ 0.3% et 0.2%, respectivement. Plusieurs microfissures avec un espacement uniforme ont été observées par techniques d'analyse d'image. Le BFUP B a montré un comportement de traction plutôt adoucissant. Le BFUP C a montré un comportement de traction fragile avec une rupture soudaine après la première fissuration.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

Tableau 36 Résultats des essais de résistance à la traction directe

Fournisseur	À la fin de la linéarité		Module élastique (MPa)	Maximale		Type de comportement
	Contrainte (MPa)	Déformation ($\mu\epsilon$)		Contrainte (MPa)	Déformation ($\mu\epsilon$)	
A-1	8.98	156.37	57420	11.37	3268.73	Écrouissant
A-2	2.65	39.57	67075	10.47	3549.42	Écrouissant
B-1	2.63	58.29	45167	4.94		Adoucissant
B-2	3.53	87.50	40398	5.28		Adoucissant
C-1	2.77	37.84	73255	9.72	242.05	Fragile
C-3	3.05	39.21	77910	9.36	216.66	Fragile
D-1	3.61	79.32	45465	8.87	3124.28	Écrouissant
D-2	3.48	84.53	41211	7.72	1731.00	Écrouissant

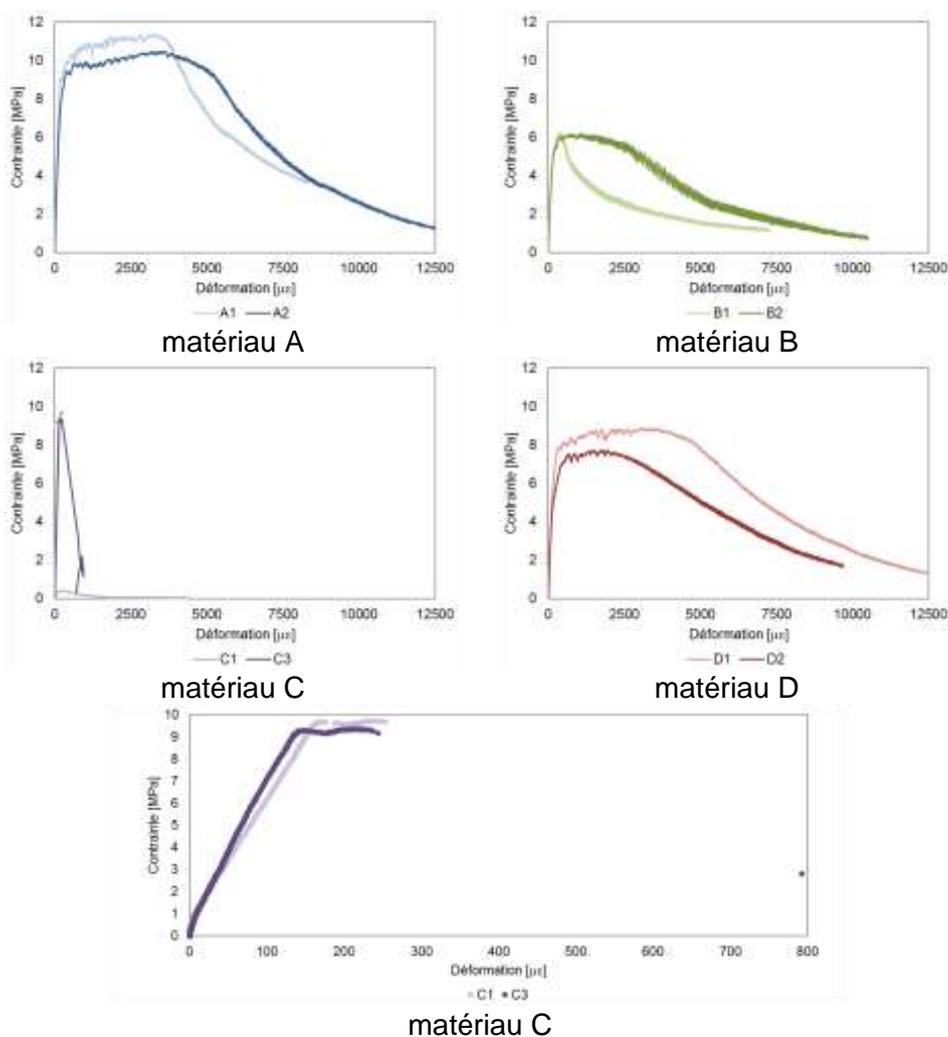


Figure 41 Courbes contrainte-déformation des essais de résistance à la traction directe



Figure 42 Résultats de divers essais de traction directe. Après la microfissuration, une large fissure visible à l'œil a localisé à la fin de l'essai dans la zone centrale.

4.1.7 Essai de mesure du retrait

Dans le cadre de cet essai, le retrait mesuré est le retrait de séchage, tel que demandé dans le mandat initial avec le Ministère. Trois échantillons prismatiques de 75 mm x 75 mm x 285 mm ont été produits par matériau. La distance interne entre les extrémités des goupilles en acier, permettant la mesure du retrait, est de 254 mm. Les mesures de retrait ont débuté après une cure de 28 jours dans une solution saturée d'eau de chaux, tel que prescrit par la norme ASTM C157. Des mesures permettant d'assurer l'évolution de la masse ont également été prises. Le retrait de séchage a été mesuré selon le calendrier suivant :

- 1 mesure par jour, pendant une période minimale de 7 jours consécutifs (1 à 7);
- 1 mesure par semaine, de 14 jours à 49 jours (14, 21, 28, 35, 42, 49), lorsque jugé nécessaire;
- 1 mesure après 2 semaines (63 jours);
- la dernière mesure a été prélevée à 117 jours pour les matériaux A, B et D et pour le matériau C à 83 jours.

Les résultats des analyses des essais de retrait de séchage sont présentés au Tableau 37. La Figure 43 présente le changement de masse dû au séchage à l'air des échantillons. Le changement de masse de la figure est rapporté à la masse de l'échantillon après le démoulage à 24 heures après

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

le coulage. Comme attendu, le retrait de séchage du BFUP curé à l'eau est pratiquement négligeable.

Tableau 37 Résultats des essais de retrait de séchage

Fournisseur	Changement de masse (%)			Changement de longueur (%)		
	Individuelle	Moyenne	Écart-type	Individuelle	Moyenne	Écart-type
A-1	0.062	0.073	0.029	-0.053	-0.033	0.017
A-2	0.052			-0.022		
A-3	0.107			-0.024		
B-1	-0.174	-0.153	0.018	-0.022	-0.028	0.005
B-2	-0.141			-0.029		
B-3	-0.144			-0.032		
C-1	-0.047	-0.047	0.010	0.289	-0.039	0.315
C-2	-0.056			-0.069		
C-3	-0.037			-0.339		
D-1	-0.016	-0.018	0.009	-0.087	-0.078	0.009
D-2	-0.010			-0.075		
D-3	-0.029			-0.070		

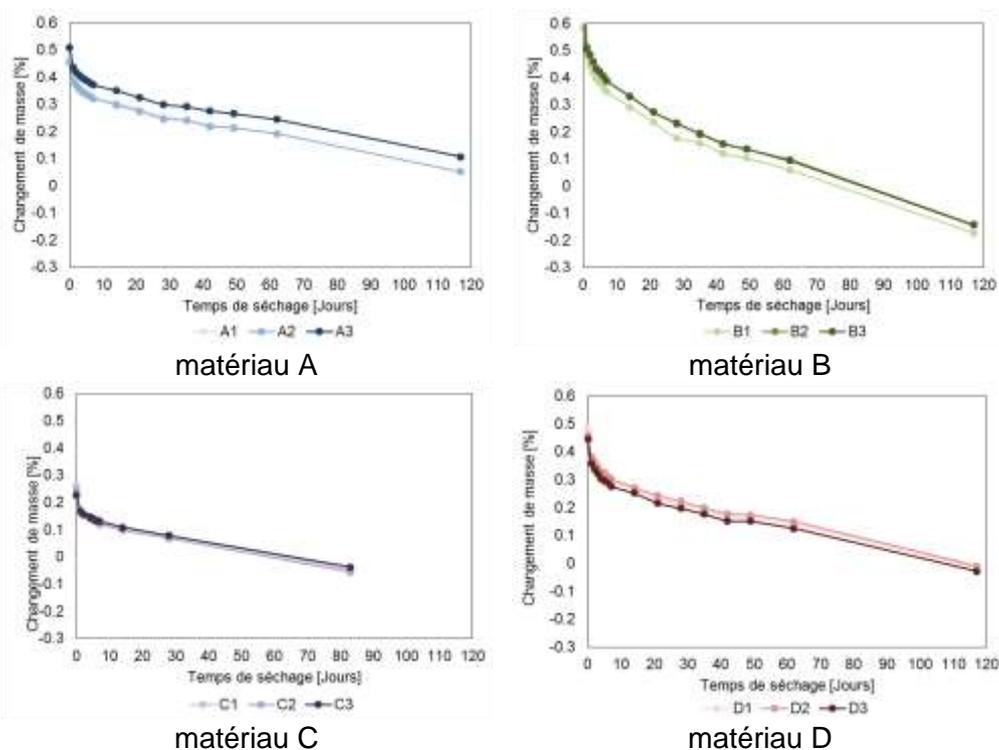


Figure 43 Changement de masse des échantillons dû au retrait de séchage

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

Les résultats présentés au Tableau 37 et à la Figure 43 permettent de faire ressortir certains points importants concernant les essais de caractérisation de retrait de séchage.

- pour le matériau A :
 - le retrait de séchage dans l'air se produit très rapidement après le début de séchage, et se concentre globalement sur les 10 à 20 premiers jours. Dès l'atteinte de 28 à 35 jours de séchage, le retrait noté est généralement constant, les fluctuations peuvent dès lors être considérées comme négligeables comparativement aux incertitudes des mesures.
 - les échantillons 2 et 3 présentent des résultats quasi identiques; la forte variation dans la mesure de l'échantillon 2 au 7^e jour est reliée à une erreur de manipulation ou une mauvaise inscription de la donnée.
 - un décalage est noté entre les résultats des échantillons (1 et 2) et 3. Il est supposé que la mesure initiale de l'échantillon 1 présente une légère erreur, ceci expliquerait alors un décalage de la courbe pour l'échantillon 1, qui présente toutefois un comportement similaire aux deux autres échantillons testés.
 - le changement de masse se produit majoritairement pendant les 10 à 20 premiers jours. Contrairement, au retrait de séchage, le changement de masse se poursuit avec la même pente.
 - le changement de masse se poursuit toujours après 117 jours de séchage. Les trois échantillons présentent un comportement très similaire.
- pour le matériau B :
 - le retrait de séchage dans l'air se produit très rapidement après le début de séchage, et se concentre globalement sur les 10 à 20 premiers jours. Dès l'atteinte de 28 à 35 jours de séchage, le retrait maximal est généralement atteint. De petites fluctuations se produisent entre le 35^e et le 62^e jour de séchage.
 - contrairement aux essais sur le matériau A, le matériau B présente beaucoup plus de fluctuations en début d'essai. Les trois essais présentent cependant des fluctuations concordantes, il n'y a toujours pas d'hypothèses satisfaisantes expliquant ces variations (un changement dans les conditions d'essai, par exemple un changement dans le taux d'humidité de la salle de conditionnement (23°C et 50 %) se serait fait ressentir sur les autres échantillons des matériaux A, C et D).
 - le changement de masse indique des résultats identiques pour les trois échantillons testés. Le changement de masse se poursuit encore après près de 120 jours, et la masse notée

est maintenant inférieure à la masse initiale, après le début de la cure à l'eau de chaux.

- pour le matériau C :
 - le matériau C présente une stabilité volumétrique très intéressante, en ce sens que le retrait noté est extrêmement stable depuis le début de l'essai.
- pour le matériau D :
 - le retrait de séchage présente une tendance plus constante pour le matériau D. Le retrait rapide noté pendant les 10 à 20 premiers jours pour les matériaux A et B est, ici, beaucoup moins marquée.
 - le retrait de séchage se poursuit très lentement après 42 jours.
 - les 3 échantillons présentent un comportement très similaire. Une légère différence est toutefois notée pour la mesure prise après 117 jours de séchage.
 - comme pour les autres matériaux, le changement de masse se poursuit toujours après 117 jours de mesure, avec la même tendance que celle observée depuis le 20^e jour de séchage. Les trois échantillons ont un changement de masse identique.

4.2 Mesures des caractéristiques de durabilité

4.2.1 Essai de la teneur en eau, de la masse volumique, de l'absorption et de la porosité

4.2.1.1 Procédure de l'essai

Dans le cadre de cette étude, la procédure de l'essai pour obtenir la teneur en eau, la masse volumique, l'absorption et la porosité des différents mélanges de BFUP est basée sur la norme CSA A23.2-11C. L'essai est effectué sur des cylindres ayant un diamètre de 100 mm et une hauteur de 50 mm. Pour chaque mélange, trois échantillons sont testés. L'essai consiste à effectuer plusieurs pesées des échantillons sous différentes conditions, soit selon les étapes suivantes :

- (1) la première masse (**I**) est prise à la fin des 28 jours de la cure humide dans une chambre à 100% d'humidité relative;
- (2) les échantillons sont ensuite placés dans une chambre à température et humidité contrôlées à $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ et $50\pm 5\%$ respectivement;
- (3) la masse des échantillons est notée après 28 jours de conditionnement, puis à tous les 7 jours jusqu'à ce que la variation entre deux masses consécutives soit inférieure à 0,5%;
- (4) la dernière masse obtenue est notée **G**;
- (5) les échantillons sont ensuite séchés dans un four à une température de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ pendant 48h, refroidis dans la chambre à température et humidité contrôlées à 23°C et 50% d'humidité

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

relative puis pesés (les étapes précédentes sont répétées jusqu'à ce que la variation entre deux masses consécutives soit inférieure à 0,5% de la plus petite masse pesée, notée **A**);

- (6) les échantillons sont alors submergés dans l'eau à une température de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant au moins 24h avant d'être pesés afin d'obtenir la masse **B**, la procédure est répétée jusqu'à stabilisation de la masse;
- (7) finalement, les échantillons sont placés dans un récipient et couverts d'eau pour être bouilli pendant 5h;
- (8) ils sont ensuite refroidis pendant au moins 14h pour atteindre une température de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$;
- (9) l'excédent d'eau à la surface des échantillons est séché (en condition saturée surface sèche SSS) avant la pesée (masse **C**);
- (10) une pesée dans l'eau est également effectuée afin d'obtenir la masse **D**.

Les calculs suivants permettent d'obtenir la teneur en eau, l'absorption après immersion, l'absorption après immersion et ébullition, la masse volumique à l'équilibre, la masse volumique à sec, la masse volumique après immersion, la masse volumique après immersion et ébullition et le volume des vides perméable à l'eau.

$$\text{Teneur en eau, \%} = \left(\frac{I - A}{A}\right) 100 \quad [\text{Éq. 11}]$$

$$\text{Absorption après immersion, \%} = \left(\frac{B - A}{A}\right) 100 \quad [\text{Éq. 12}]$$

$$\text{Absorption après immersion et ébullition, \%} = \left(\frac{C - A}{A}\right) 100 \quad [\text{Éq. 13}]$$

$$\text{Masse volumique à l'équilibre, } kg/m^3, \% = \left(\frac{G}{C - D}\right) 1000 \quad [\text{Éq. 14}]$$

$$\text{Masse volumique après immersion, } kg/m^3, \% = \left(\frac{B}{C - D}\right) 1000 \quad [\text{Éq. 15}]$$

$$\text{Masse volumique à sec } kg/m^3, \% = \left(\frac{A}{C - D}\right) 1000 \quad [\text{Éq. 16}]$$

$$\begin{aligned} \text{Masse volumique après immersion et ébullition, } kg/m^3, \% \\ = \left(\frac{C}{C - D}\right) 1000 \end{aligned} \quad [\text{Éq. 17}]$$

$$\text{Volume des vides perméables à l'eau, \%} = \left(\frac{C - A}{C - D}\right) 100 \quad [\text{Éq. 18}]$$

4.2.1.2 Résultats des essais

La Figure 44 présente l'absorption, le volume des vides perméables et la masse volumique des 4 matériaux testés. Selon les résultats obtenus en suivant la méthode prescrite par la norme, l'absorption est inférieure à 2% et le volume des vides est inférieur à 5% pour tous les matériaux. La masse volumique présente une variabilité plus grande entre 2375 et 2600 kg/m^3 , avec le matériau A le plus dense de tous et les autres matériaux sont dans le même ordre de grandeur. Peu de différences entre les matériaux sont

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

observables. La porosité à l'eau d'un BFUP selon les recommandations de l'AFGC, dont la valeur est reprise par la norme française, est limitée à 9%. Les résultats obtenus sont donc conformes avec cette limite. Cependant, la méthode d'essai ne serait pas adaptée pour un matériau tel que le BFUP en raison de sa faible porosité. Une version longue de l'AFGC de l'essai est proposée où le séchage du matériau est d'une durée de deux mois avec l'intervalle entre les prises de masses augmenté à une semaine. La porosité à l'eau du BFUP est d'abord évaluée selon la méthode Grandubé (Hornain 2007), similaire à la méthode de la norme, puis selon la version longue de l'essai. Selon les résultats suivant la méthode Grandubé, la porosité à l'eau du BFUP est d'environ 5%, tel qu'obtenu par la présente étude, tandis qu'une porosité d'environ 7% est obtenue dans une autre étude (Provete Vincler et al. 2019) selon la version longue de l'essai. Bien que les résultats obtenus par la version longue de l'essai soit conforme avec la limite proposée par l'AFGC, l'écart entre les résultats suggère que la méthode classique proposée par la norme puisse ne pas être adaptée pour le BFUP. Les résultats se trouvent en annexe 17.

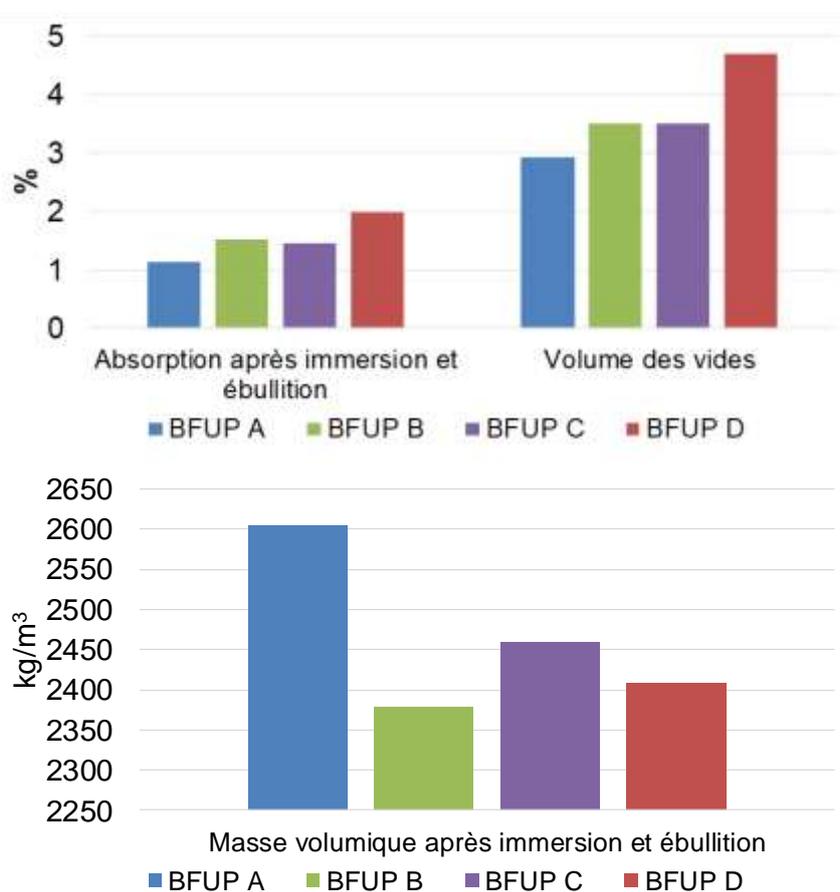


Figure 44 Absorption, volume des vides et masse volumique des 4 BFUPs testés

4.2.2 Essai de résistance à l'écaillage

4.2.2.1 Résultats des essais

Pour les essais de résistance à l'écaillage, après les 56 cycles de gel-dégel, une perte de masse de 0 kg/m³ a été notée pour les 4 BFUPs. Une légère corrosion des fibres métalliques à la surface des plaques est observée. La Figure 45 présente la surface des plaques au terme de l'essai de résistance à l'écaillage. Selon une étude de Graybeal (2007) et pour le même type d'essai, aucune dégradation du matériau n'est notée après 95 cycles. Une cote de 0 selon le barème proposé par la norme BNQ 2621-905 peut être attribuée pour tous les matériaux à l'étude.

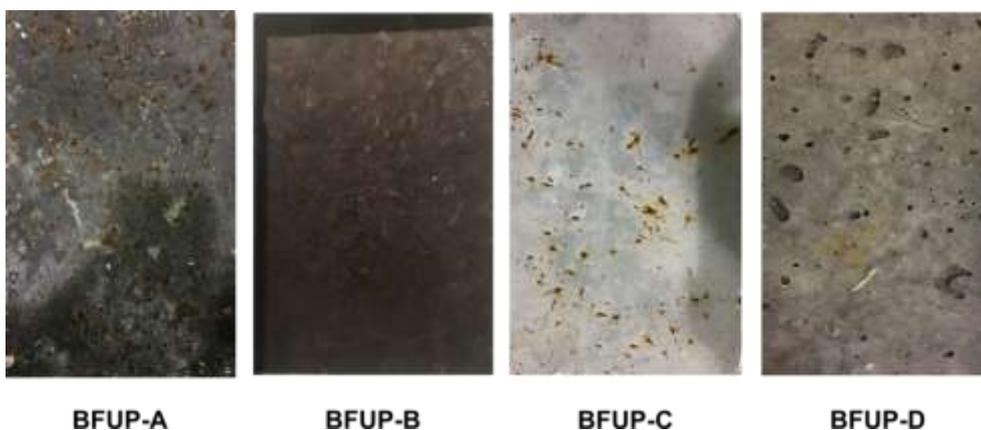


Figure 45 Surface des plaques de BFUP après l'essai de résistance à l'écaillage

4.2.3 Essai de résistance aux cycles de gel-dégel

4.2.3.1 Procédure d'essai

Dans le cadre de ce projet, la résistance aux cycles de gel-dégel a été déterminée suivant la procédure A, présentée à la norme ASTM C666. Trois éprouvettes ont été utilisées pour cet essai et pour chacun des matériaux. Afin de caractériser la résistance aux cycles de gel-dégel du béton optimisé, un facteur de durabilité a été calculé. Des échantillons de 400 mm x 100 mm x 75 mm ont été coulés, démoulés 48 heures plus tard et entreposés dans une chambre humide à 100% d'humidité relative jusqu'au début du test, alors qu'ils étaient âgés de 14 jours. Les échantillons ont par la suite été insérés dans des récipients remplis d'eau du robinet qui sont déposés dans un appareil qui effectue des cycles de gel-dégel selon la procédure normée, allant de -18 à 4°C. Des mesures sont prises à chaque 36 cycles jusqu'à ce que le nombre total de cycles dépasse 300. Ces mesures non destructives consistent à mesurer la vitesse ultrasonique de pulsations à l'aide de transducteurs qui sont rattachés à un appareil commercial de marque James Instruments V-Meter MK IV™. De plus, les masses ont été mesurées.

Le temps de transit, donnée fournie par l'appareil, est l'inverse de la fréquence. Le module d'élasticité dynamique relatif est d'abord calculé avec l'Équation 19 :

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

$$P_c = \left(\frac{n_1^2}{n^2} \right) 100 \quad [\text{Éq. 19}]$$

Où :

n_1 = Fréquence transversale fondamentale à c cycles de gel-dégel (Hz)

n = Fréquence transversale fondamentale à 0 cycle de gel-dégel (Hz)

P_c = Module d'élasticité dynamique relatif (%)

Le module d'élasticité dynamique relatif est par la suite utilisé pour calculer le facteur de durabilité (DF) avec l'Équation 20 :

$$DF = \frac{P \cdot N}{M} \quad [\text{Éq. 20}]$$

Où :

DF = Facteur de durabilité (%)

M = Nombre de cycles de gel-dégel effectués

N = Minimum entre le nombre de cycles effectués et le nombre de cycles auquel l'essai a été discontinué

P = Module d'élasticité dynamique relatif à N cycles (%)

4.2.3.2 Résultats des essais

Tous les prismes de BFUP soumis à l'essai de résistance de gel-dégel ont complété les 300 cycles avec un module dynamique relatif supérieur ou égal à 100% (Figure 46). Après 36 cycles, les BFUPs A et C ont un module dynamique relatif inférieur à 90%. Selon la norme ASTM C1856, l'essai aurait dû être arrêté. Cependant, après ces 36 cycles, le module dynamique relatif augmente et les valeurs finales obtenues pour les BFUPs A et C sont même supérieures à celle des BFUPs B et D.

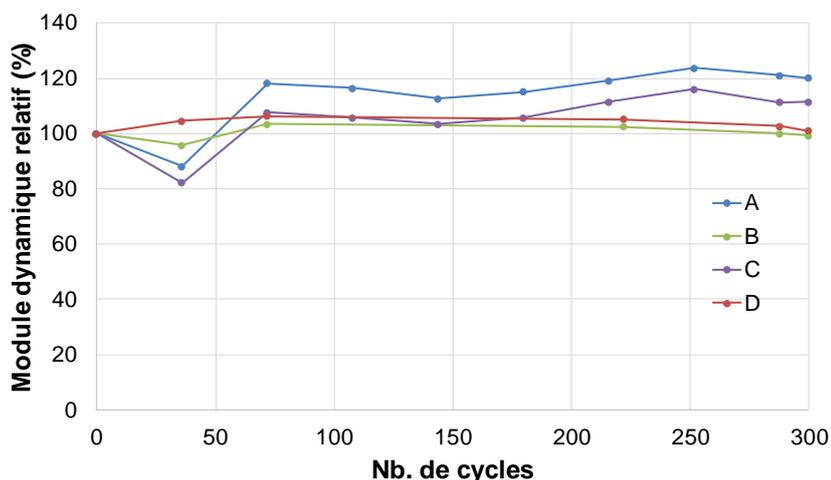


Figure 46 Résultats des essais de gel-dégel selon la procédure A de la norme ASTM C666

Le critère d'arrêt de l'essai à 90% du module dynamique relatif n'est donc peut-être pas représentatif de la durabilité du matériau, comme il est possible de le remarquer dans le cadre de cette étude. Ainsi, selon ce critère, les

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

BFUPs B et D seraient plus résistant au gel-dégel alors que, après 300 cycles, ce sont plutôt les BFUPs A et C qui performant mieux.

Les résultats de résistance au gel-dégel obtenus dans le cadre de cette étude sont cohérents avec la littérature Graybeal (2007). L'augmentation du module dynamique relatif au cours de l'essai est également observée et expliqué par l'hydratation du ciment anhydre présent dans le BFUP.

4.2.4 Essai de perméabilité aux ions chlorure

4.2.4.1 Procédure d'essai

Dans le cadre de cette étude, deux essais sont menés soit, selon la norme ASTM C1202 et un essai modifié de migration accélérée.

La procédure de l'essai de migration accélérée de perméabilité aux ions chlorure basée sur la norme ASTM C1202 consiste à tester deux cylindres de BUP (sans fibres) ayant un diamètre de 100 mm et une hauteur de 50 mm pour chaque mélange. Tel que spécifié par la norme ASTM C1856, des échantillons sans fibres sont utilisés afin d'empêcher les courts circuits ou surchauffe des appareils. Les échantillons sont laissés en cure humide pendant 28 jours puis sont saturés sous vide dans l'eau avant l'essai. Deux cellules sont placées à chaque extrémité des cylindres contenant, d'un côté, une solution à 0.5 M de NaCl et de l'autre, une solution à 0,3 M de NaOH. Une sonde de température est placée dans la cellule contenant la solution de NaOH. L'étanchéité du montage est assurée par des anneaux de caoutchouc placés de chaque côté des cylindres et d'un anneau en plastique entourant l'échantillon. Une tension électrique de 60 V est appliquée entre les deux cellules de migration pendant une durée de 6 heures. L'essai est arrêté si la température augmente au-dessus de 90°C. Le résultat de la charge passante en Coulomb s'obtient à la fin de l'essai, puis le matériau est classé selon le Tableau 38.

Tableau 38 Perméabilité aux ions chlorure selon la charge passante

Charge passante (Coulombs)	Perméabilité aux ions chlorure
>4000	Élevée
2000-4000	Modérée
1000-2000	Faible
100-1000	Très faible
<100	Négligeable

Source : (ASTM 2017b)

Pour l'essai modifié de migration accélérée (selon un protocole adapté de l'ASTM C1202), la procédure de l'essai est similaire à la procédure décrite par (Samson et al. 2008). Cette procédure modifiée utilise des cellules de migrations contenant un plus grand volume de solution ce qui permet de limiter les risques de court-circuit ou l'augmentation de la température au-delà d'un seuil indésirable dû à la présence des fibres métalliques dans le matériau. Des cylindres ayant un diamètre de 100 mm et une hauteur de 50 mm sont testés et pour chaque mélange, deux échantillons de BFUP et deux échantillons de BUP.

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

Les cylindres sont laissés en cure humide pendant 28 jours puis sont saturés durant au moins 18 heures sous vide dans une solution de 0,3 M de NaOH avant l'essai. Deux cellules, d'environ 2.7 l, sont placées à chaque extrémité des cylindres contenant, d'un côté, une solution à 0,3 M de NaOH et 0,5M de NaCl et de l'autre, une solution à 0,3M de NaOH (Figure 47). L'étanchéité du montage est assurée par la même méthode que pour l'essai de migration accélérée selon la norme ASTM C1202. Une tension électrique de 70 V est appliquée entre les deux cellules de migration pendant une durée de 28 jours. La température des solutions et l'intensité électrique sont notées à intervalle régulier. L'essai est arrêté si la température des solutions augmente au-delà de 90°C ou si l'intensité du courant est supérieure à 80 mA.

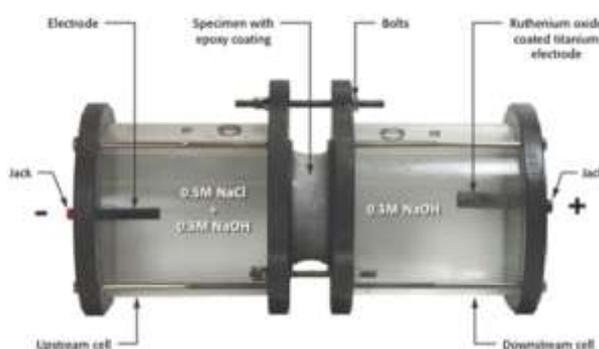


Figure 47 Montage de l'essai modifié de migration accélérée des ions chlorure

Source : (Conciatori et al. 2014)

Deux méthodes pour l'analyse des résultats sont considérées. La première permet d'obtenir le profil de chlore et le coefficient de diffusion par le broyage des échantillons, l'extraction des ions chlorure et leur titrage. La seconde méthode permet d'obtenir la profondeur de pénétration des ions chlorure et le coefficient de diffusion en vaporisant une solution de nitrate d'argent sur un cylindre fendu en deux.

La procédure pour le broyage, l'extraction des ions chlorure et le titrage est inspiré de la norme ASTM C1152. De la poudre de BFUP est récoltée, provenant de couches successives des cylindres testés, à l'aide d'une carotteuse à colonne. La mèche utilisée a un diamètre de 76,2 mm (3 po), afin de récolter le maximum de poudre pour un minimum de profondeur de couche. Un minimum de 7 g de poudre est nécessaire pour le reste de la procédure. La poudre récoltée est ensuite utilisée pour l'extraction des ions chlorure. La poudre est ajoutée à une solution de HNO₃, afin de séparer les ions chlorure du NaCl sous forme de HCl. La partie solide est séparée de la partie liquide. La solution, contenant les ions chlorure sous forme de HCl, est utilisé pour le titrage. Un appareil de titrage, utilisant du nitrate d'argent comme titrant, est utilisé afin de déterminer la concentration en chlorure des solutions. Avec la concentration en chlorure de chaque couche d'un échantillon, le profil de chlorure peut alors être obtenu. Le coefficient de diffusion apparent des chlorures ($D_{cl,acc}$) est calculé selon les équations proposées par la norme NT Build 492, présentées ci-dessous.

$$D_{cl,acc} = \frac{RTL x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{zFU t} \quad [\text{Éq. 20}]$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RTL}{zFU} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right)} \quad [\text{Éq. 21}]$$

Où :

- t = Durée de l'essai (s)
- c₀ = Concentration en chlorure de la solution en amont (mol/L)
- c_d = Concentration en chlorure mesurée par l'essai de titrage (mol/L)
- x_d = Profondeur du front de chlorure (m)
- F = Constante de Faraday (F=9.648x10⁴ J/(V·mol))
- L = Épaisseur de l'échantillon (m)
- R = Constante des gaz parfaits (R=8,314 kPa·L/mol·K)
- T = Valeur moyenne de la température initiale et finale de la solution anolyte (K)
- U = Valeur absolue de la tension appliquée (V)
- z = Valeur absolue de la valence ionique, pour le chlorure, z=1
- α = Paramètre de simplification des équations
- D_{cl,acc} = Coefficient de diffusion apparent d'un essai accéléré de migration des ions chlorure
- erf⁻¹ = Inverse de la fonction d'erreur

La procédure pour la vaporisation au nitrate d'argent est aussi inspirée de la norme NT Build 492. L'essai consiste à fendre les cylindres en deux afin d'exposer le centre de l'échantillon, puis à vaporiser les faces exposées d'une solution de nitrate d'argent à 0,1 mol/L. Le nitrate d'argent réagit avec les ions chlorure présents dans le béton et forme un précipité de couleur blanche. La mesure de la profondeur du front de chlore est prise à 7 endroits afin d'obtenir la profondeur moyenne de pénétration des ions chlorure (x_d). Le coefficient de diffusion est calculé selon les équations 3.9 et 3.10. Une valeur de 0,07 mol/L est utilisée pour c_d (NT Build 492).

4.2.4.2 Résultats des essais

4.2.4.2.1 Essai de migration accélérée

Les résultats de l'essai de migration accélérée selon la norme ASTM C1202 sont présentés à la Figure 48. La charge moyenne en Coulombs des deux échantillons testés à 28 jours par matériau est présentée. Les résultats, tous inférieurs à 250 Coulombs, se divisent en deux catégories. Selon le barème proposé par la norme, une cote de perméabilité aux ions chlorure, négligeable dans ce cas, est attribuée aux matériaux A, B et C tandis que le matériau D se trouve dans la catégorie de perméabilité très faible. Les résultats obtenus sont similaires aux résultats de Graybeal (2007) et (T. M. Ahlborn et al. 2008) pour le même essai.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

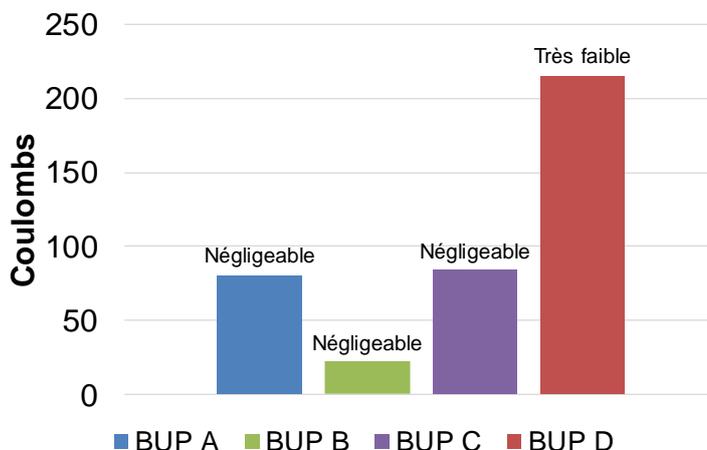


Figure 48 Résultats de l'essai de migration accélérée selon la norme ASTM C1202

Selon la clause U.4.1.8.1 de la norme CSA A23.1 les matériaux A, B, C sont classifiable DL200 (coulomb passé < 100) et le matériau D est DL100 (coulomb passé < 300).

4.2.4.2.2 Essai modifié de migration accélérée

L'essai modifié de migration accélérée est mené pour deux séries d'échantillons. Pour tous les matériaux, deux échantillons avec et sans fibres sont testés, respectivement identifiés BFUP et BUP. Pour le BUP, un échantillon de chaque matériau sur les deux testés est analysé par broyage du matériau, extraction des ions chlorure et titrage tandis que le second est analysé par la vaporisation au nitrate d'argent. Les mêmes analyses ont été considérées pour les échantillons de BFUP mais le fendage du matériau pour la vaporisation au nitrate d'argent s'est révélé impossible par la présence des fibres. Tous les échantillons de BFUP sont donc analysés par broyage du matériau, extraction des ions chlorure et titrage.

En raison de la présence de fibres métalliques pour les échantillons de BFUP, l'essai modifié de migration accéléré a été arrêté avant la fin des 28 jours d'essai puisque le courant a augmenté au-delà de 80 mA, limite maximale acceptée pour la tenue de l'essai. Aucune perturbation du courant n'est notée pour les échantillons de BUP et aucun échantillon n'est arrêté avant la fin de l'essai. La durée de l'essai pour chaque échantillon est présentée au Tableau 39.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

**Tableau 39 Durée de l'essai modifié de migration accélérée
pour chaque échantillon**

Fournisseur	Échantillon	Durée de l'essai (jours)
BUP-A	1	28
	2	28
BUP-B	1	28
	2	28
BUP-C	1	28
	2	28
BUP-D	1	28
	2	28
BFUP-A	1	11
	2	10
BFUP-B	1	13
	2	6
BFUP-C	1	22
	2	9
BFUP-D	1	2
	2	3

Les profils de chlore obtenus après le broyage du matériau, l'extraction des ions chlorure et le titrage sont présentés à la Figure 49. Les concentrations en ions chlorure obtenus sont présentées en fonction du point milieu de chaque couche, c'est-à-dire la profondeur moyenne mesurée lors du broyage (des résultats plus précis se trouvent en annexe 18). Différentes tendances pour chaque matériau de BUP peuvent être observées en ce qui a trait à la concentration en ions chlorure de la première couche et la profondeur de pénétration. Une concentration théorique maximale (C_{max}) prenant en considération la porosité du matériau et la concentration en chlore de la solution amont est calculée. La concentration de chlorure dans la cellule en amont étant de $C_0=500 \text{ mol/m}^3$, la concentration massique maximale de chlorure qui pourrait pénétrer dans la solution des pores du béton, notée C_{max} (kg/m^3), est :

$$C_{max} = C_0 \cdot M_{Cl} \cdot V_{w/c} \quad [\text{Éq. 22}]$$

Où :

C_0 = Concentration de chlorure dans la cellule en amont (mol/m^3)

C_{max} = Concentration massique maximale de chlorure (kg/m^3)

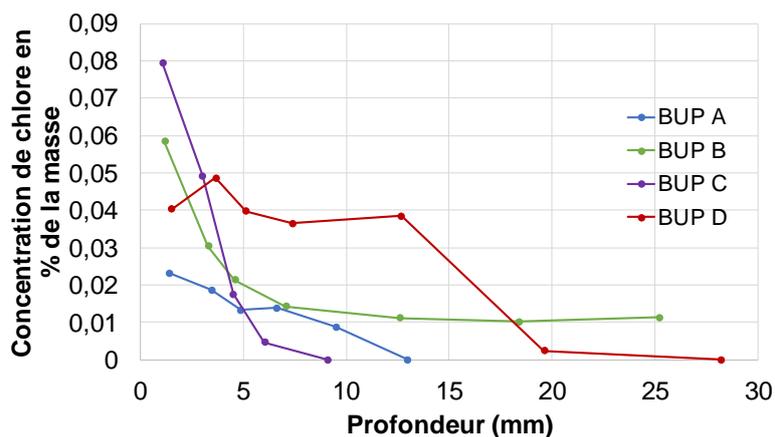
M_{Cl} = Masse molaire du chlorure ($M_{Cl} = 35,453 \text{ g/mol}$)

$V_{w/c}$ = Portion volumique d'eau rapporté au volume du béton (m^3/m^3 béton)

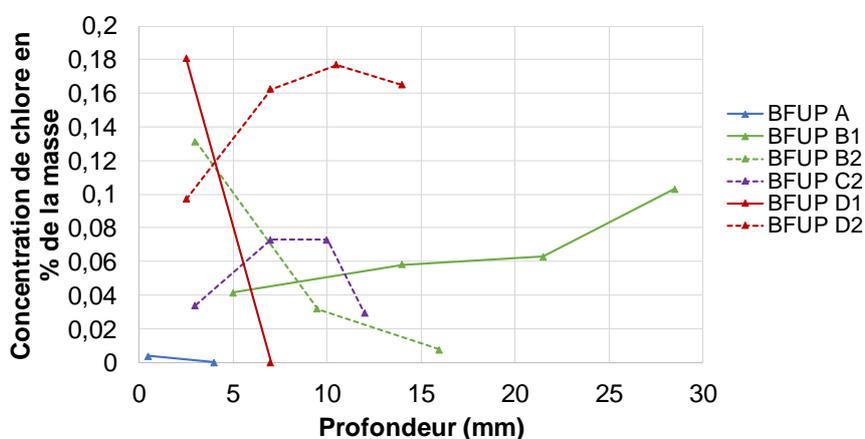
La C_{max} ne tient pas compte des réactions d'hydratation pendant la cure du béton. Cette limite supérieure calculée permet de vérifier la cohérence des résultats et une éventuelle fissuration de l'échantillon pendant le test de migration. La concentration maximale calculée est de 0,105%. La concentration, la plus élevée en ions chlorure, est de 0,08% ce qui est bien

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

inférieur à la concentration C_{max} calculée. Cette observation confirme la faible perméabilité du matériau aux ions chlorure. Il est également possible de remarquer que la concentration initiale dans le matériau n'est pas représentative de la profondeur de chlore obtenu. Pour le BUP-C par exemple, la concentration en ions chlorure de la première couche est la plus élevée des 4 matériaux alors que la profondeur de chlore est la plus faible.



a)



b)

Figure 49 Profils de chlore de chaque échantillon de (a) BUP et (b) BFUP

Pour les échantillons de BFUP, certains profils de chlore présentent une augmentation de la concentration en ions chlorure en fonction de la profondeur plutôt que le contraire. Les échantillons concernés sont les suivants : BFUP-B1, BFUP-C1, BFUP-C2 et BFUP-D2. Une inspection visuelle de ces échantillons a permis d'identifier que la fissuration serait une cause possible de ce résultat (Figure 50). Ces résultats corroborent les résultats d'essai d'un travail connexe (Provete Vincler et al. 2019). La surface amont de ces échantillons après broyage est présentée. De plus, la surface aval de l'échantillon BFUP-B1 est présentée avec une structure de fissuration sur la même figure. Tout d'abord, une fissure traversante est

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

observée sur les surfaces amont et aval de l'échantillon BFUP-B1. La présence de cette fissure accélère le transit des ions chlorure au travers du matériau, relevé par des profils de concentration d'ions chlorure constants dans l'épaisseur de l'éprouvette. Pour les autres échantillons, aucune fissure dominante n'est observée, mais plutôt plusieurs petites fissures réparties sur toute la surface. Les profils d'ions chlorure pour ces échantillons ne présentent pas une augmentation de la concentration en chlorure aussi marquée que pour l'échantillon BFUP-B1, ce qui peut être attribué à la nature des fissures plus fines observées à la surface. Enfin, tous les échantillons de BFUP présentent des signes de corrosion des fibres métalliques, également observée avec les plaques de l'essai de résistance à l'écaillage (Figure 45). Contrairement aux plaques de l'essai de résistance à l'écaillage, l'application d'une tension électrique pour les essais de migration semble accélérer la réaction entre les ions chlorure et les fibres et donc la corrosion. Ainsi, l'expansion de la corrosion des fibres au travers de l'échantillon crée de multiples fissures permettant aux ions chlorure de pénétrer dans le matériau en plus grande quantité.

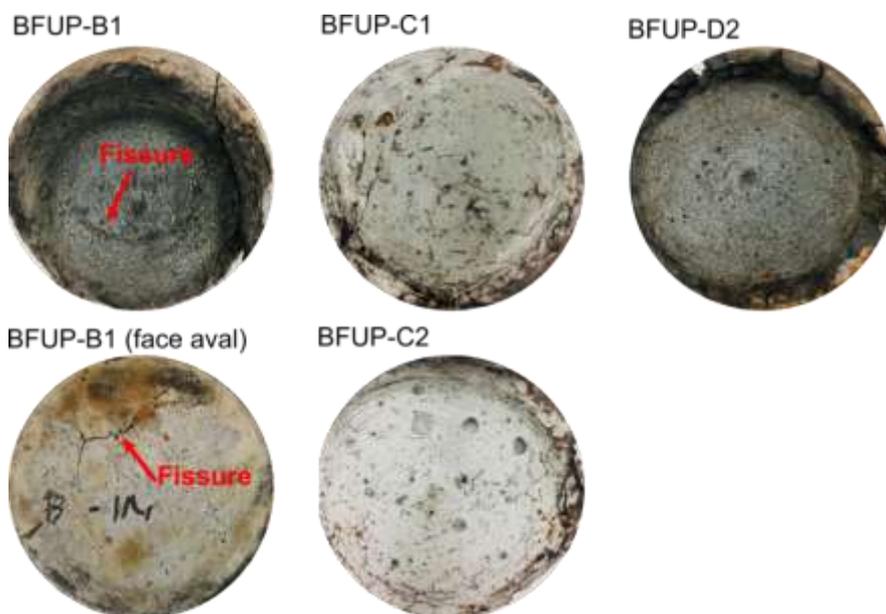
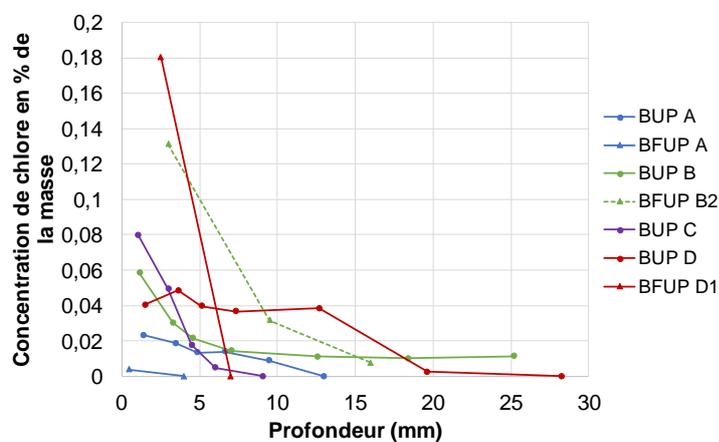


Figure 50 Surface après broyage des échantillons ayant fissurés lors de l'essai modifié de migration accélérée

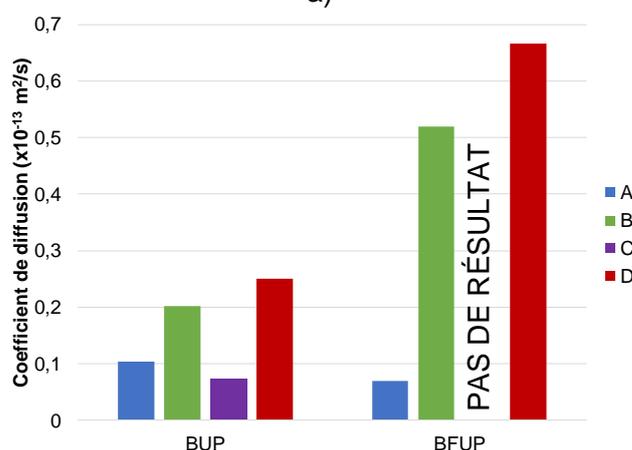
En excluant les profils d'ions chlorure des échantillons présentant des fissures visibles, les profils d'ion chlorure des échantillons de BFUP et de BUP ainsi que les coefficients de diffusion associés sont comparés à la Figure 51. Les profils d'ions chlorure des échantillons de BFUP présentent majoritairement une concentration en ions chlorure de la première couche plus élevée que les échantillons de BUP, alors que la profondeur de pénétration est plus élevée pour les échantillons de BUP. Les coefficients de diffusion des échantillons de BUP sont similaires d'un matériau à l'autre, avec la plus faible valeur pour le BUP-C et la plus élevée pour le BUP-D, soit $0,0734 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ et $0,25 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivement alors que la moyenne pour tous les BUP est de $0,125 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$. Ces coefficients de diffusion sont

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

du même ordre de grandeur que les résultats trouvés dans la littérature (Thomas et al. 2012; Piérard, Dooms, et Cauberg 2012). Cependant, une plus grande variabilité est observée pour les échantillons de BFUP. En effet, le coefficient de diffusion du BFUP-A est du même ordre de grandeur que les échantillons de BUP, mais les résultats pour les BFUPs B et D sont beaucoup plus élevés. Une hypothèse pour ces coefficients élevés serait que les éprouvettes aient subies une microfissuration, non visible à l'œil, due à la corrosion des fibres. Afin de mettre en évidence cette microfissuration, la concentration maximale de ions chlorure possible est calculée en fonction de la porosité dans un BFUP sain, valant 0.105% (C_{max}). En comparant la concentration maximale aux profils des ions chlorure obtenus, seule la concentration de la première couche du BFUP-B2 et du BFUP-D1 se trouve au-dessus de cette limite, ce qui permet de confirmer l'hypothèse des microfissures dans les échantillons de BFUP.



a)



b)

Figure 51 Résultats de l'essai modifié de migration accélérée des échantillons de BUP et de BFUP. a) Comparaison des profils de chlore (b) Coefficients de diffusion apparent

Tel que mentionné précédemment, le deuxième échantillon de BUP de chaque matériau a été fendu en deux, puis la surface rompue a été vaporisée au nitrate d'argent. Une photo de la surface rompue de chaque échantillon

vaporisé est présentée à la Figure 52. Le nitrate d'argent, au contact des ions chlorure, forme un précipité blanc ce qui permet d'identifier la profondeur de pénétration du front de chlore. Cependant, aucune zone blanche n'est visible. La norme NT Build 492 correspondant à cet essai précise que la limite de détection du nitrate d'argent, où la solution change de couleur, est de 0,07 M. Or, de tous les essais modifiés de migration accélérée, la concentration maximale obtenue est de 0,005 M ce qui est plus de 10 fois inférieur à la limite de détection du nitrate d'argent. Ainsi, pour des matériaux tels que le BFUP où très peu d'ions chlorure pénètrent dans le matériau, l'analyse par vaporisation au nitrate d'argent n'est pas adaptée selon la méthode proposée par la norme. L'utilisation d'une solution diluée de nitrate d'argent pourrait permettre d'obtenir de meilleurs résultats par cette méthode.

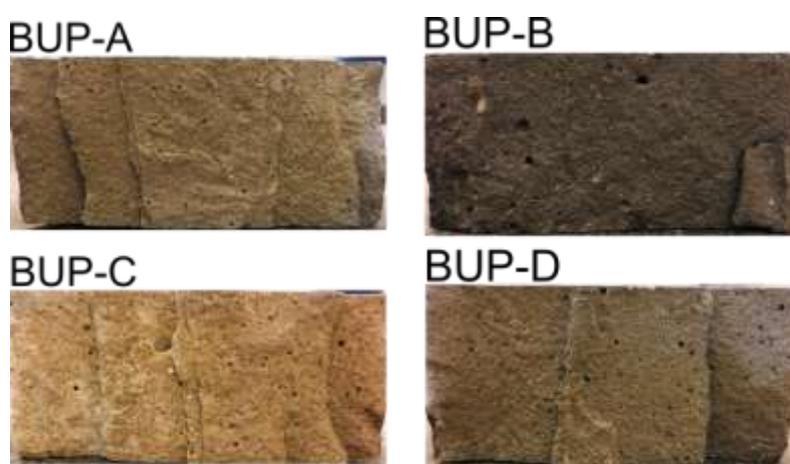


Figure 52 Surface intérieure des échantillons de BUP vaporisées au nitrate d'argent

4.2.5 Essai de caractérisation du réseau de bulles d'air

4.2.5.1 Procédure d'essai

La caractérisation du réseau de bulles d'air, présentes à l'intérieur de la matrice cimentaire, permet d'estimer de façon assez adéquate les performances en durabilité du matériau, principalement relativement en termes de durabilité face aux cycles de gel-dégel. En effet, pour un béton conventionnel, un réseau de bulles d'air suffisamment développé est nécessaire afin de maintenir une bonne résistance, afin de permettre suffisamment d'espace pour le volume supplémentaire engendré par le passage de l'eau liquide à la glace.

Dans le cas du BFUP, puisqu'il est jugé que la matrice cimentaire est suffisamment imperméable pour prévenir l'infiltration d'eau de façon importante, l'importance d'un réseau de bulles d'air est beaucoup moindre. De fait, dans le cadre du BFUP, la matrice la plus dense possible est à privilégier ; le réseau de bulle d'air devrait donc être le plus faible possible.

La norme ASTM C457 permet de déterminer plusieurs paramètres relatifs à la distribution du réseau de bulles d'air à l'intérieur de la matrice cimentaire.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

Diverses techniques existent afin de procéder à l'essai, soit la méthode transverse linéaire (A), la méthode modifiée par comptage (B) et la méthode par contraste augmenté (C). La surface totale d'analyse varie en fonction de la taille maximale des granulats utilisés dans le mélange ; ceci évite d'avoir une analyse faussée de la distribution des bulles d'air par la présence de gros granulats sur une petite zone d'étude. Le Tableau 40 indique les différentes tailles d'étude, en fonction de la grosseur maximale des granulats. Pour les différents matériaux utilisés (BFUP A, B, C et D), les granulats inclus dans la matrice sont de dimensions maximales inférieures à 2 mm. Les fibres ont une longueur comprise entre 12.5 mm (BFUP A, B et D) et 19 mm (BFUP C) ; la présence des fibres est jugée insuffisante pour influencer la formation du réseau de bulles d'air et donc, les fibres ne sont pas considérées avec la taille maximale du granulats.

Tableau 40 Dimension de la zone d'étude du réseau de bulles d'air, selon la dimension maximale des granulats

Dimensions maximales des granulats (mm)	Aire totale nécessaire d'analyse (cm ²), selon la méthode directe, pour obtenir :	
	La teneur totale en vide	Le rapport Pâte/Air
150	1613	645
75	419	194
37.5	155	97
25	77	77
19	71	71
12.5	65	65
9.5	58	58
4.75	45	45

Source : (ASTM 2016)

De plus, l'utilisation de la méthode transverse linéaire (A) requiert une longueur dépendante de la taille maximale des granulats. Le Tableau 41 présente la longueur minimale d'analyse en fonction des granulats utilisés.

Dans le cadre de ce projet de recherche, le réseau de bulles d'air a été caractérisé avec une surface maximale de 56,25 cm², suivant la procédure B. Les échantillons utilisés pour la caractérisation du réseau de bulles d'air ont eu une cure humide d'au moins 28 jours, afin d'assurer une hydratation suffisante du ciment et la formation de la microstructure complète.

4.2.5.1 Résultats des essais

Les résultats des analyses des essais de caractérisation du réseau de bulles d'air sont présentés au Tableau 42 ci-dessous. La surface des échantillons utilisés pour l'essai de réseau de bulles d'air est de 56,25 cm².

Les équations utilisées afin de déterminer le facteur d'espacement et les résultats intermédiaires sont présentés dans l'annexe 19.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

Tableau 41 Longueur minimale d'analyse et nombre de points minimums pour l'utilisation de la méthode modifiée par comptage, en fonction de la taille maximale des granulats utilisés

Dimensions maximales des granulats (mm)	Longueur minimale (mm)	Nombre minimum de points requis
150	4064	2400
75	3048	1800
37.5	2540	1500
25	2413	1425
19	2286	1350
12.5	2032	1200
9.5	1905	1125
4.75	1397	1000

Source : (ASTM 2016)

Tableau 42 Facteur d'espacement des essais de caractérisation du réseau de bulles d'air

Matériau	\bar{L} (mm)
BFUP A	0,204
BFUP B	0,140
BFUP C	0,109
BFUP D	0,181

Un béton conventionnel est considéré non gélif, lorsque le facteur d'espacement est en-dessous de 0.23 mm, ce qui est le cas sur ces mesures.

5. ANALYSE COMPARATIVE DES RÉSULTATS

Les sous-sections suivantes présentent, pour chacun des essais effectués, une analyse comparative détaillée des résultats obtenus et présentés à la section 3. Lorsqu'applicable, les différents matériaux sont également catégorisés selon leur performance, selon les critères en vigueur.

5.1 Mesure des propriétés mécaniques

5.1.1 Essai de résistance à la compression

La Figure 53 présente les résultats moyens des différents essais de compression, effectués selon différentes cures. La norme canadienne CSA A23.1 impose une résistance caractéristique minimale en compression de 120 MPa afin de pouvoir catégoriser un matériau cimentaire comme un BFUP. De plus, afin d'assurer une résistance suffisante des éléments lors du décoffrage, une résistance de 80 MPa après 4 jours était une exigence du MTQ. Actuellement, la norme CSA A23.1 recommande une résistance de 100 MPa selon la clause U.7.3.2 et la S6-19, recommande également une résistance de 100 MPa selon l'article A8.1.20.2.1. Ces critères de résistances spécifiques sont représentés à la Figure 53 par les traits gris hachurés. Il est à noter que les résultats présentés pour chacun des différents matériaux sont les résistances en compression moyennes obtenues sur la presse; les résistances caractéristiques sont donc inférieures à celles présentées dans ce rapport. Les résistances caractéristiques sont définies, selon la clause U.4.5.4.5 de l'annexe U de la norme CSA A23.1, comme étant la valeur moyenne diminuée de 1,4 fois l'écart-type obtenu par au moins 30 essais provenant de 3 coulées différentes d'une même composition. Cette valeur caractéristique doit apparaître sur la carte d'identité du matériau, selon la clause 4.2.2.4 et le tableau 4.5.

Le matériau A est le seul à présenter pour tous les échantillons testés une résistance suffisante en compression afin de pouvoir être catégorisé comme un BFUP de catégorie 120 (bien que le nombre d'échantillons testés soit inférieur au critère posé par la CSA, les résultats présentés au Tableau 29 permettent de conclure que la résistance caractéristique serait supérieure au critère de 120 MPa). Les matériaux B et C présentent une résistance moyenne tout juste à la limite de l'acceptable; la résistance moyenne est inférieure au critère de 120 MPa mais la limite est comprise dans l'écart-type des résultats. Compte tenu que la valeur caractéristique doit être supérieure à la limite minimale de 120 MPa et en se référant aux résultats présentés au Tableau 29, il apparaît irréaliste que ces matériaux puissent être catégorisés comme BFUP. Pour ce qui est du matériau D, la résistance moyenne en compression à 28 jours est environ 20 MPa inférieure à la résistance caractéristique minimale requise. Ce matériau n'est donc pas catégorisé comme un BFUP selon l'annexe U de la norme CSA A23.1.

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

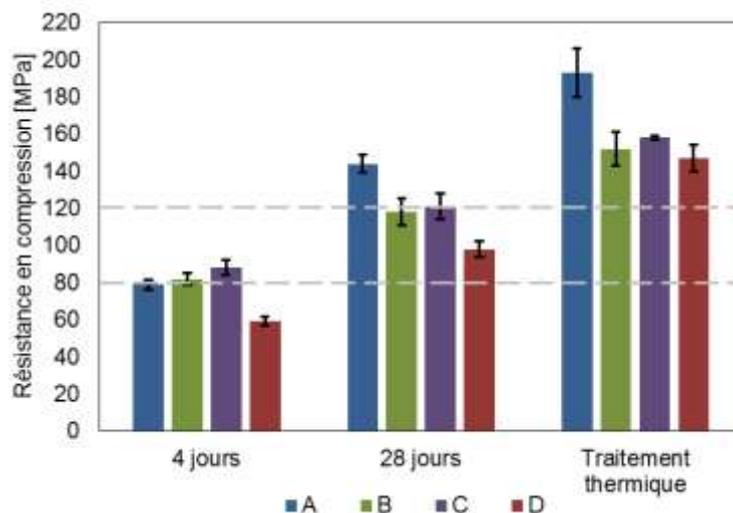


Figure 53 Comparatif des résultats des essais de compression moyenne avec indication de l'écart type

5.1.2 Essai de module élastique

La Figure 54 présente le module élastique moyen obtenu en compression pour chacun des matériaux. Tel qu'indiqué à la section 4.1.2, les modules élastiques présentent un écart-type assez faible, excepté pour le matériau C, où l'écart est important. Les modules élastiques sont compris entre 36 et 52 GPa, ce qui correspond bien aux modules élastiques anticipés pour un BFUP, qui devraient se trouver entre 40 et 70 GPa, selon les informations présentées au Tableau 2. Puisque la valeur du module élastique ne sert pas pour la classification du BFUP, l'analyse des résultats est limitée pour cette propriété mécanique.

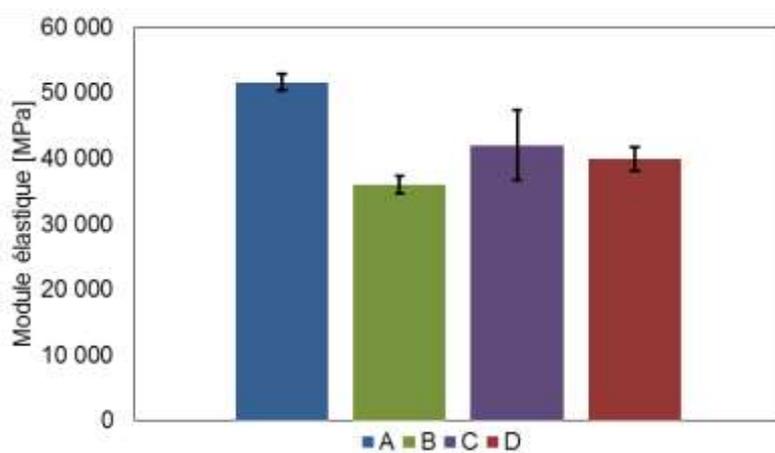


Figure 54 Comparatif des essais de module élastique moyen avec indication de l'écart type.

Considérant les résultats présentés à la Figure 54, les modules élastiques des matériaux B, C et D peuvent être considérés comme similaires (compte

tenu des valeurs moyennes et des écart-types sur ces valeurs), alors que le module élastique du matériau A est supérieur.

5.1.3 Essai de résistance à la flexion à 3 points sur prismes entaillés (3PBT)

La norme canadienne CSA A23.1 ne propose pas l'essai de flexion à 3 points sur prismes entaillés; les résultats présentés à cette section ne permettent donc pas de catégoriser les différents matériaux selon cette norme. Cependant, l'essai permet d'évaluer la contribution des fibres comme renfort d'une section fissurée, et les résultats obtenus peuvent être utilisés par analyse inverse afin de faire ressortir divers paramètres d'intérêt sur la loi de traction du matériau.

La Figure 55 présente divers résultats obtenus avec les essais de flexion à 3 points sur prismes entaillés. Pour l'analyse des charges moyennes obtenues à la fin de la linéarité et à la charge maximale, il est possible de remarquer que le matériau A surpasse les trois autres matériaux testés.

À la fin de la linéarité, les charges moyennes obtenues pour les matériaux C et D sont considérées comme identiques, et légèrement supérieures à la charge moyenne du matériau B. Les écarts-types calculés sont globalement faibles, démontrant une bonne répétabilité pour ce paramètre et une bonne homogénéité de la matrice cimentaire en condition non fissurée.

À la charge maximale, les différences entre les différents matériaux sont accentuées, de même que la variabilité. Le matériau C présente la deuxième résistance la plus élevée, après le matériau A. Considérant les écarts-types élevés, les charges maximales des matériaux B et D peuvent être considérées comme similaires. La haute variabilité obtenue dans ces résultats, malgré 5 à 6 répétitions de l'essai par matériau, indique une contribution plus variable des fibres en condition de fissuration.

Les ouvertures de fissures moyennes, pour les deux cas de chargement considérés précédemment (à la fin de la linéarité et à la charge maximale) sont également présentées. Il est à noter la très faible valeur de l'ouverture de fissure, lorsque la fin de la linéarité est atteinte; ceci était à prévoir puisque la fin de la linéarité est, par définition, considérée comme l'instant de la première fissuration. En ce sens, il est logique de trouver ici une valeur très faible de l'ouverture de fissure.

À la charge maximale, il est possible de noter encore une fois une variabilité très importante dans les résultats. Le matériau C présente une ouverture de fissure très faible; ceci corrobore les observations faites en cours d'essai, à savoir que les fibres présentes dans ce matériau ne contribuent que très peu à la résistance en flexion. Les ouvertures de fissures moyennes notées pour les matériaux A et D peuvent être considérées comme identiques, malgré la très grande variabilité notée pour le matériau D. Le matériau B présente l'ouverture de fissure la plus importante lorsque la charge maximale est atteinte.

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

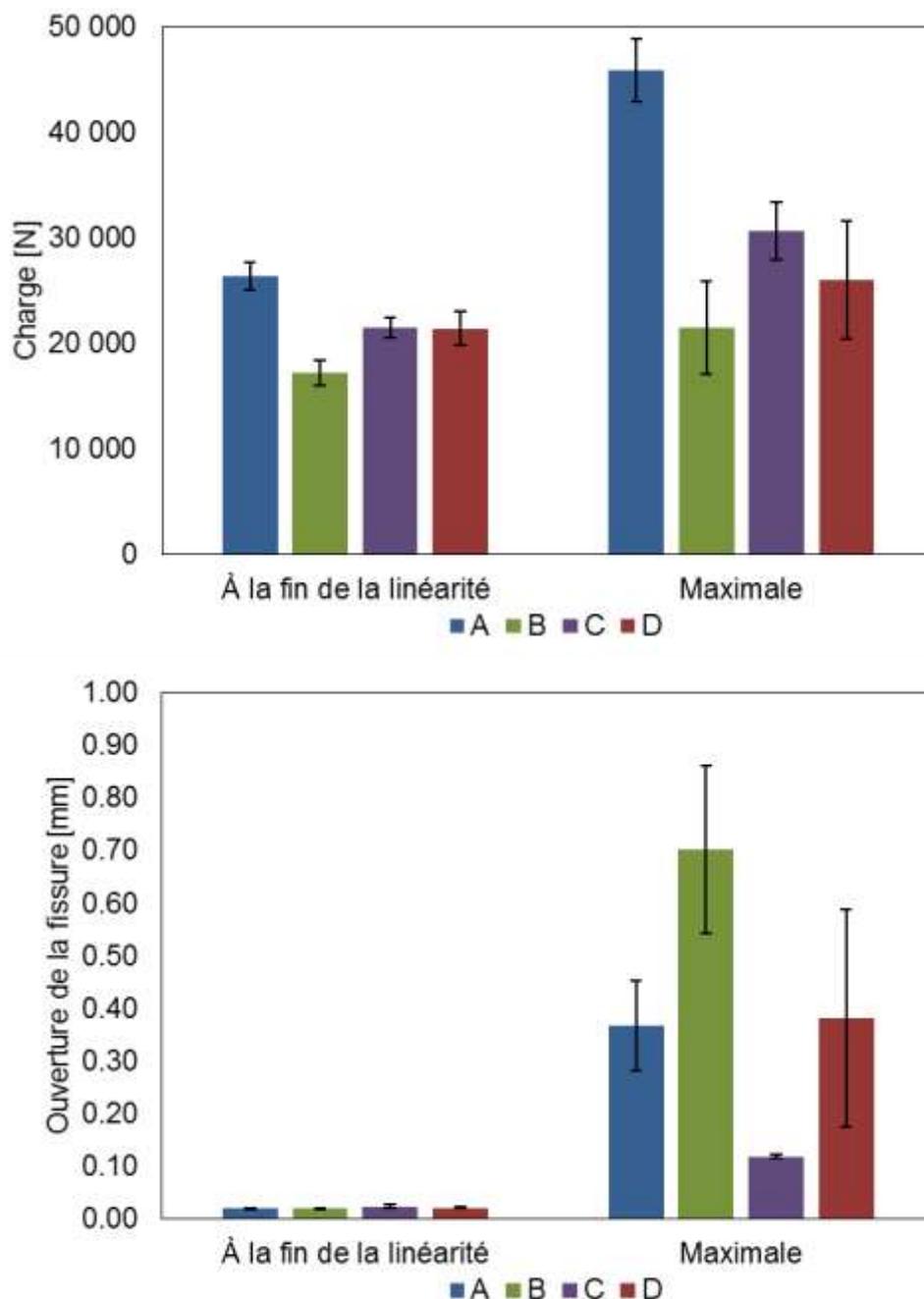


Figure 55 Comparatif des essais de flexion à 3 points sur prismes entaillés (3PBT). Note que le matériau C a cassé prématurément avec une rupture fragile.

5.1.4 Essai de résistance à la flexion à 4 points sur prismes non entaillés (4PBT)

Les lois de traction des BFUPs sont déterminées par analyse inverse à partir de l'essai de flexion à 4 points sur prismes non entaillés. La clause U.4.1.2.2.1 de la norme CSA A23.1 exige l'analyse inverse des résultats

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

selon la procédure décrite par la norme NF P18-470 Annexe D ou selon le cahier technique SIA 2052 Annexe E. Le matériau est alors catégorisé selon son comportement adoucissant (S – *tension softening*) ou écrouissant (H – *tension hardening*), selon le tableau U3. L'annexe 8 de la norme CSA S6 propose également une classification selon un comportement adoucissant (TSFRC) ou écrouissant (THFRC). L'analyse inverse exigée par la norme CSA S6 dépend du comportement du matériau en question : pour un matériau adoucissant, la clause A.8.1.4.5.4 propose une analyse inverse particulière alors que pour un matériau jugé écrouissant, l'analyse inverse proposée à la clause A.8.1.4.5.3 est une version simplifiée de la méthode simplifiée à 5 points proposées par Lopez et présentée à la section 2.7.1 et à la Figure 8. Pour les deux normes (CSA A23.1 annexe U et CSA S6 Annexe 8), les résistances caractéristiques sont nécessaires afin de catégoriser les matériaux (pour rappel, la résistance caractéristique est déterminée comme la résistance moyenne diminuée de 1,4 fois l'écart-type, après au moins 30 essais provenant d'un minimum de 3 coulées distinctes). L'analyse des résultats présentés à cette section est faite selon l'approche de la norme ASTM C1609; les analyses inverses des résultats sont présentées à la section 6.

La Figure 56 présente un comparatif des contraintes flexionnelles déterminées à différents taux de chargement. Il est à noter l'absence de résultats pour le matériau C pour la résistance post-fissuration, c'est-à-dire à des flèches de L/600 (0.5 mm) et L/150 (2 mm). De ce fait, ce matériau ne possède aucune résistance post-fissuration, et les fibres ne sont pas à même de reprendre les efforts. De plus, ce matériau utilise des fibres différentes (dimension, forme et type d'acier) des 3 autres matériaux.

Pour les matériaux B et D, les résultats obtenus sont jugés très similaires pour chacune des contraintes déterminées dans cette analyse, autant en considérant les valeurs moyennes que les écarts-types de ces valeurs (le matériau B présentent des résultats très légèrement supérieurs au matériau D pour chacun des points d'intérêt). De plus, la très faible différence notée entre les résultats à la fin de la linéarité et à la charge maximale indique que ces matériaux ne présentent que très peu d'écrouissage, puisque le gain en résistance est minime.

Pour le matériau A, les contraintes flexionnelles déterminées sont supérieures à celles obtenues pour les trois autres matériaux et ce, pour chacune des contraintes considérées dans l'analyse (au premier pic, maximale, à L/600 et L/150). L'écart-type mesuré est toutefois important, surtout à la contrainte maximale et en post-fissuration. Cet écart-type important est expliqué principalement par la variabilité de l'effet des fibres métalliques sur les propriétés en flexion. Malgré l'écart-type important, le matériau A affiche une contrainte maximale globalement plus élevée que la contrainte à la fin de la linéarité, faisant en sorte que le matériau peut être considéré comme écrouissant en flexion.

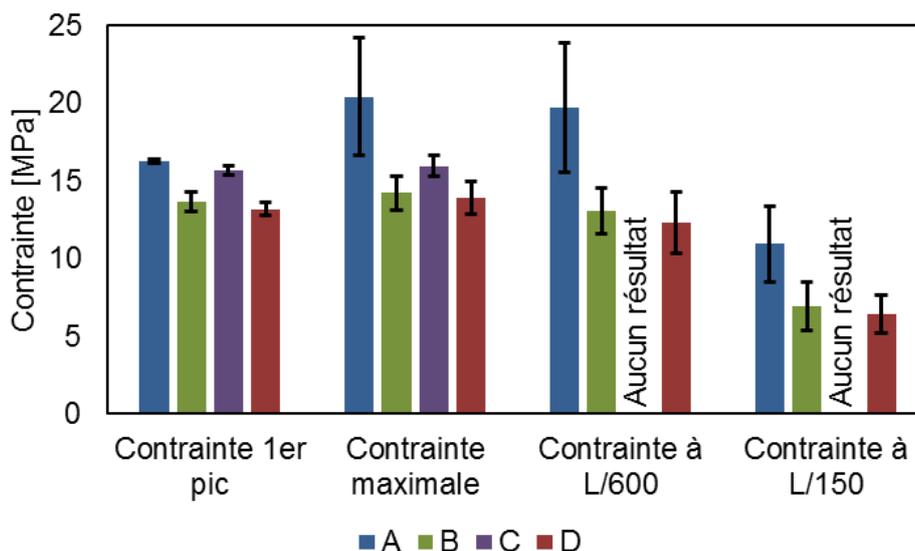


Figure 56 Comparatif des essais de flexion à 4 points sur prismes non entaillés (4PBT)

5.1.5 Essai de résistance à la flexion à 4 points sur dalles minces (4PBT-DM)

L'essai de flexion à 4 points sur dalles minces ne figure pas dans les essais de caractérisation du BFUP des normes CSA A23.1 et CSA S6. Les résultats obtenus à la suite de ces essais peuvent cependant donner des indications supplémentaires sur le comportement de pièces minces en BFUP soumises à des efforts de flexion. De plus, une analyse inverse des résultats est possible, suivant les normes NF P18-470 et SIA 2052.

La Figure 57 présente un comparatif de divers résultats d'intérêts, obtenus à la suite des essais de flexion à 4 points réalisés sur dalles minces, soit les charges obtenues à la fin de la linéarité et maximales, de même que les flèches correspondantes.

À la fin de la linéarité, il est possible de constater que les matériaux B et D présentent une résistance similaire, avec le matériau B très légèrement supérieur au matériau D (la différence est toutefois comprise dans l'écart-type de ces deux matériaux). Le matériau C présente une charge très supérieure aux matériaux B et D. Les résultats du matériau A n'ont pas été inclus dans cette analyse, car l'acquisition des données de l'échantillon A1 s'est interrompue en début d'essai et la fin de la linéarité de l'échantillon A3 est trop graduelle pour être clairement définie (le jugement lors de l'analyse des données risque donc d'avoir un effet important sur la charge trouvée à cet instant). L'échantillon A2 présente une charge à la fin de la linéarité de 4085 N; le matériau A se situerait donc entre les matériaux B et D et le matériau C.

À la charge maximale, il est encore possible de constater une très bonne correspondance entre les résultats des matériaux B et D; la charge maximale

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

moyenne atteinte est pratiquement la même (à 1% près) et les écarts-types sont faibles. Les matériaux A et C présentent aussi des similitudes quant à la charge maximale atteinte en cours d'essai (environ 3% de différence). Le matériau A présente cependant une variabilité plus importante.

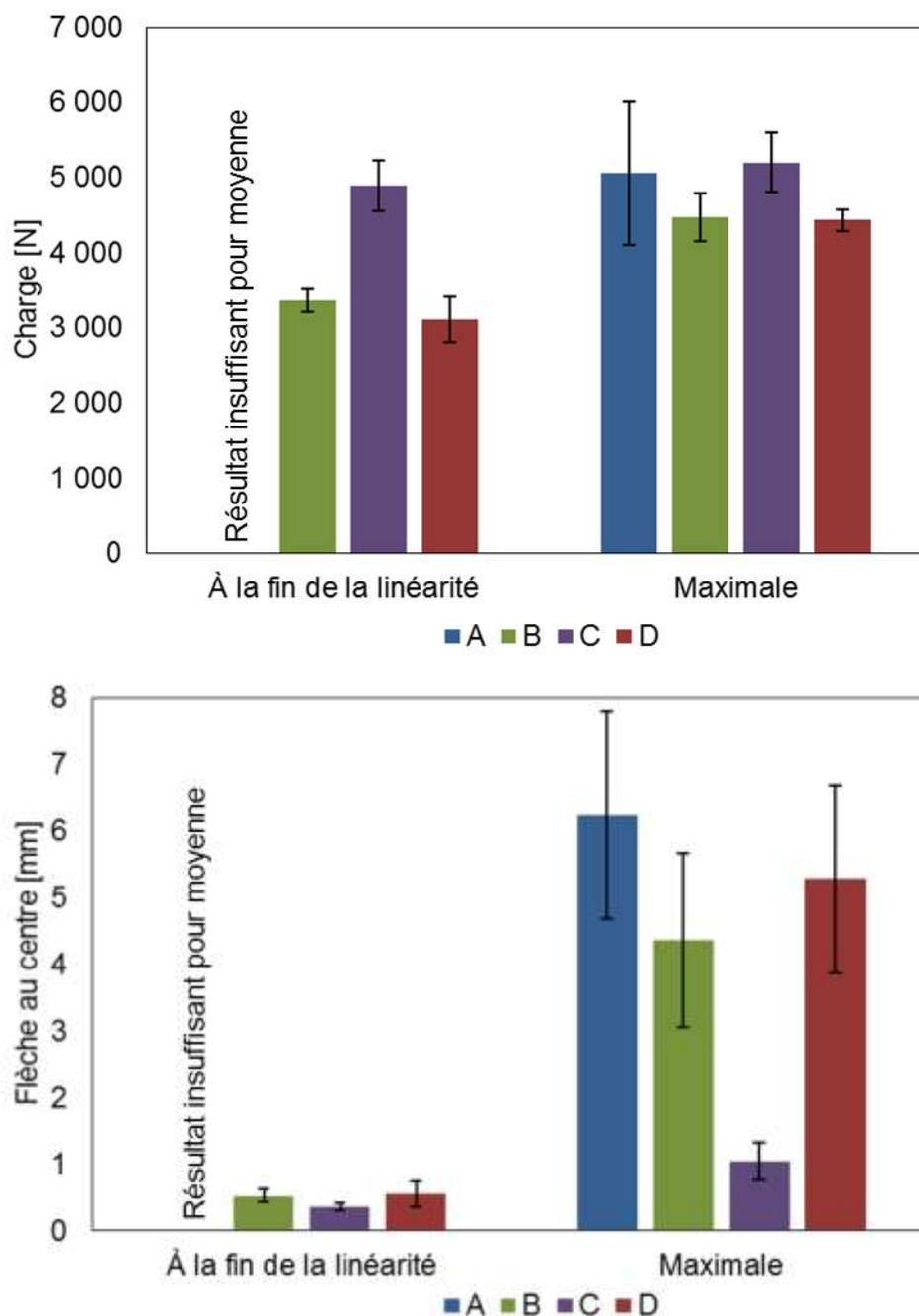


Figure 57 Comparatif des essais de flexion à 4 points sur dalles minces (4PBT-DM)

Globalement, les matériaux A, B et D présentent un gain de charge notable entre la fin de la linéarité et l'atteinte de la charge maximale, alors que le

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

matériau C présente un gain de résistance très faible, compris dans la marge d'incertitude des résultats.

Tout comme pour les essais de flexion à 3 points, les flèches notées à la fin de la linéarité sont très similaires pour les différents matériaux et les écarts-types sont globalement assez faibles. Ceci est logique et attendu puisque la fin de la linéarité est généralement gouvernée par la résistance de la matrice et le lien entre cette dernière et les fibres; la variabilité est dès lors moindre qu'à la charge maximale, où l'orientation et l'efficacité des fibres contribuent davantage.

Les flèches moyennes au centre à la charge maximale présentent une forte variabilité, autant entre les différents matériaux qu'entre les échantillons d'un même matériau.

5.1.6 Essai de résistance à la traction directe

L'essai de traction directe n'est pas un essai présent dans les normes canadiennes, et le développement et l'amélioration de ce type d'essais font toujours débat dans la littérature scientifique. Les résultats moyens obtenus lors des essais de traction directe sont présentés au Tableau 43. Puisque 2 essais seulement ont été réalisés pour chacun des matériaux, l'écart-type n'est pas présenté.

Il est à noter que l'analyse et la comparaison des lois de tractions obtenues à la suite des essais de traction directe et celles obtenues par analyse inverse des essais de flexion à 4 points (4PBT) sont présentées à la section 6 de ce rapport. L'analyse présentée à cette section concerne les résultats obtenus pour les essais de traction directe sur os tel que décrits précédemment à la section 4.1.6.

Tableau 43 Paramètres moyens de la loi comportement de la résistance en traction obtenus selon les essais de traction directe

Fournisseur	À la fin de la linéarité		Module élastique	Maximale	
	Contrainte (MPa)	Déformation ($\mu\epsilon$)		Contrainte (MPa)	Déformation ($\mu\epsilon$)
A	5.82	97.97	62248	10.92	3409.08
B	3.08	72.90	42782	5.11	
C	2.91	38.52	75583	9.54	229.36
D	3.54	81.92	43338	8.30	2427.64

Selon le tableau U.3 de la norme canadienne CSA A23.1 Annexe U (voir Tableau 4 du présent rapport), les matériaux testés peuvent être classés comme suit :

- matériau A : Écrouissant
 - $f_{cr} = 5.82 > 5.0$
 - $f_{fu} / f_{cr} = 1.88 > 1.1$
 - $\epsilon_{fu} = 0.341 > 0.1$

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

- matériaux B, C, D : Non catégorisé
 - résistance en traction à la fin de la linéarité inférieure à la limite minimale de 4.0 MPa

Où :

f_{cr} = Résistance en traction directe de la matrice cimentaire à la première fissuration (MPa)

f_{fu} = Résistance maximale en traction directe (MPa)

ε_{fu} = Déformation en traction correspondant à la contrainte maximale

La clause U.4.1.2.2.9 précise que les critères permettant de qualifier un matériau comme étant écrouissant (H), adoucissant (S) ou sans fibres (N), présentés au tableau U.3, doivent correspondre soit aux résultats provenant d'une analyse inverse (réalisée en accord avec la clause U.4.1.2.2.1) soit aux résultats d'un essai de traction directe. Si les résultats proviennent d'un essai de traction, la méthode d'essai utilisée se doit d'être spécifiée dans la carte d'identité du matériau. De plus, la clause U.4.1.2.2.1 stipule que les essais de traction directe ne devraient être effectués que sur des matériaux écrouissants. Dans le cas présent (section 5.1.6), l'analyse est réalisée sur les résultats provenant de l'essai de traction directe et pourrait donc ne pas correspondre aux conclusions retenues lorsqu'une analyse inverse est appliquée aux résultats de flexion.

Comme la norme CSA A23.1 Annexe U ne spécifie aucune procédure particulière pour l'analyse des résultats de traction directe, le critère permettant de déterminer la fin de la linéarité, et par le fait même la résistance maximale à la première fissuration, est basé sur l'approche proposée la norme SIA. Cette méthode est décrite en détails à la section 4.1.6 et repose sur le changement du module élastique sécant moyen. Tel que mentionné à la section 4.1.6, l'essai de traction directe a été réalisé de façon monotone, sans procéder préalablement à des chargements cycliques. Considérant cela, un changement dans le module élastique pourrait être imputable à divers facteurs autres que la réponse de la matrice cimentaire face au chargement appliqué. De ce fait, les résistances présentées au Tableau 43 pourraient être négativement affectées par ce critère. Dans le cas du BFUP D par exemple, le comportement présenté à la Figure 41 est typique d'un matériau écrouissant. Cependant, la résistance notée correspondant à la fin de la linéarité est inférieure à la limite minimale de 5 MPa pour un matériau écrouissant et de 4 MPa pour un matériau adoucissant. Pour un critère de fin de linéarité différent, il pourrait être possible que le matériau D soit catégorisé comme écrouissant considérant les résultats de traction directe.

5.1.7 Essai de mesure du retrait

La Figure 58 présente un comparatif de divers résultats d'intérêts, obtenus à la suite des essais de retrait de séchage à l'air libre. Il est possible de constater à cette figure que la masse moyenne des échantillons continue de diminuer même après près de 120 jours de séchage à 50% d'humidité. Le changement de masse demeure cependant très faible.

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

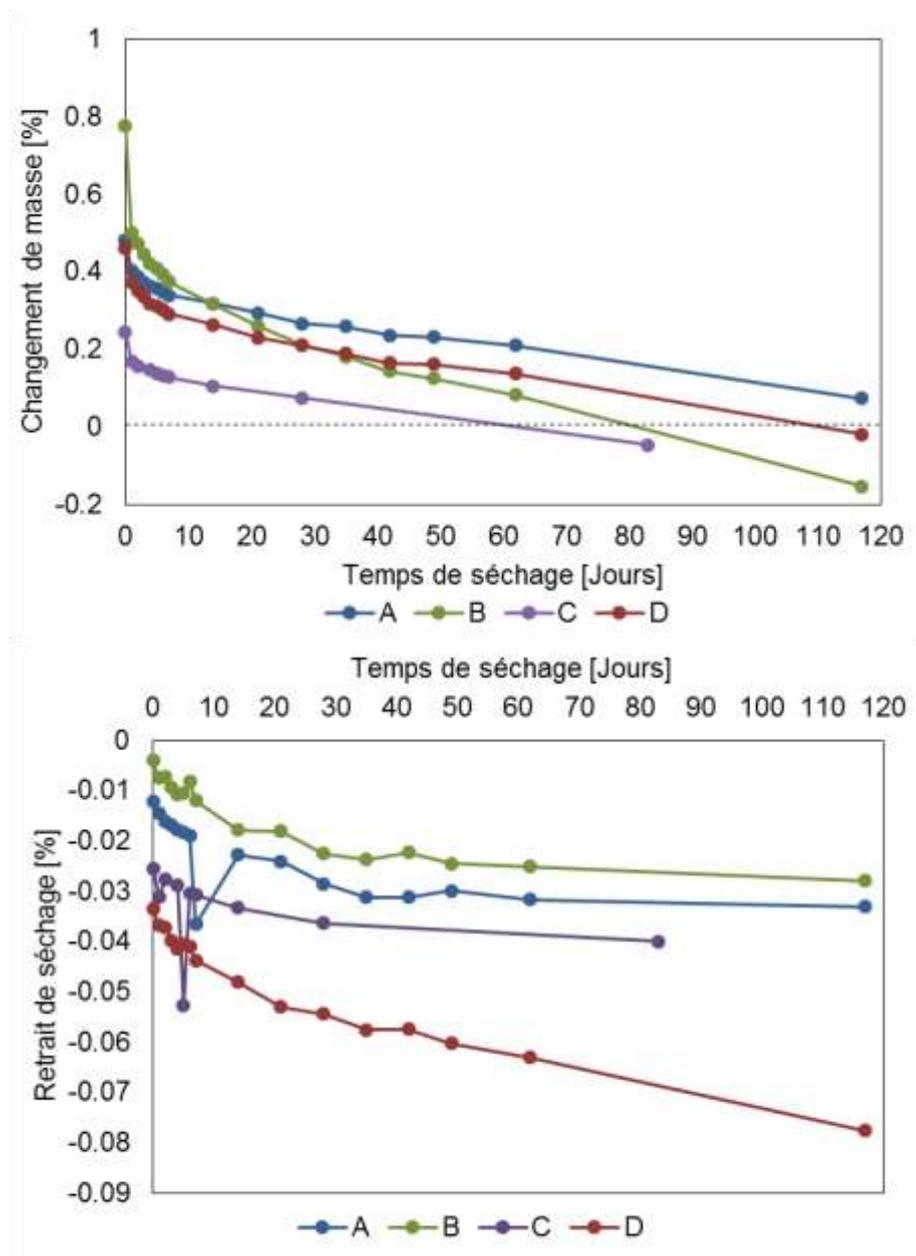


Figure 58 Comparatif des essais de retrait de séchage à l'air

Pour le retrait de séchage, les matériaux A, B et C possèdent des valeurs finales plutôt similaires, de l'ordre de 0.02 à 0.035% de retrait. Les valeurs notées sont très stables et n'ont que peu changés depuis le 35^e jour. Il est à noter que le BFUP B est le seul qui incorpore un adjuvant réducteur de retrait dans sa composition, et présente également le retrait de séchage le plus faible. Pour le BFUP D, le retrait se poursuit toujours, mais la tendance est sensiblement ralentie et l'augmentation du retrait de séchage est suffisamment faible pour considérer la fin de l'essai.

5.2 Mesure des caractéristiques de durabilité

5.2.1 Essai d'absorption

La Figure 59 présente un comparatif de divers résultats d'intérêts, obtenus à la suite des essais d'absorption. À l'exception du volume des vides du BFUP B, peu de différences pour un même matériau est remarquable d'après l'écart-type. La variabilité du BFUP B quant au volume des vides ne permet pas de le classer par rapport aux autres matériaux. Pour une meilleure représentativité, plus de trois échantillons auraient été nécessaires dans ce cas. Il est possible que le séchage par chauffage durant le processus d'essai a continué la réaction de durcissement, dans ce cas, lors de l'immersion après séchage, la porosité a diminué et donc l'absorption après immersion est plus petite. Ainsi, les résultats de la teneur en eau sont supérieurs à ceux d'absorption.

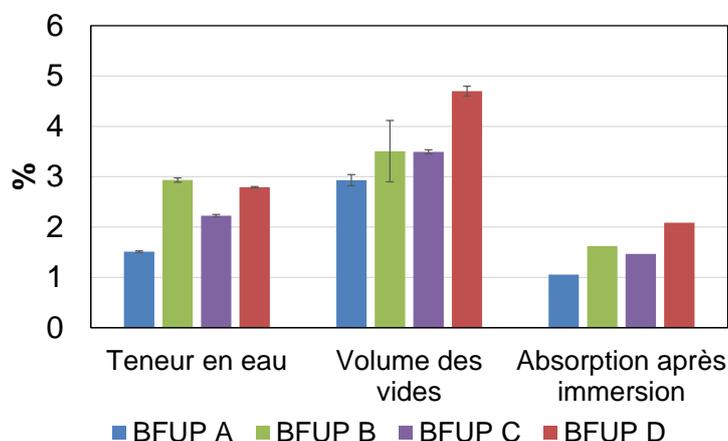


Figure 59 Comparatif des essais d'absorption

5.2.2 Essai de résistance à l'écaillage

Pour l'essai de résistance à l'écaillage, une comparaison détaillée des matériaux entre eux n'est pas possible puisque qu'aucune perte de masse n'est notée. L'essai en lui-même n'est pas suffisant pour distinguer la performance d'un BFUP par rapport à un autre. Pour ce faire, une modification de l'essai doit être élaborée.

5.2.3 Essai de résistance aux cycles de gel-dégel

La Figure 60 présente un comparatif des facteurs de durabilité, obtenus à la suite de l'essai de résistance aux cycles de gel-dégel. Les facteurs de durabilité présentés sont ceux calculés au terme des 300 cycles. Pour tous les matériaux, ce facteur est d'au moins 100. Selon ces résultats, le BFUP A serait le plus résistant aux cycles de gel-dégel et le BFUP B, le moins résistant.

Il est important de ne pas suivre le critère de l'arrêt de l'essai du code ASTM-C666, car une perte du module dynamique supérieure à 10% n'est pas

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

représentatif de la résistance du matériau au cycle du gel-dégel après 36 cycles (Figure 46).

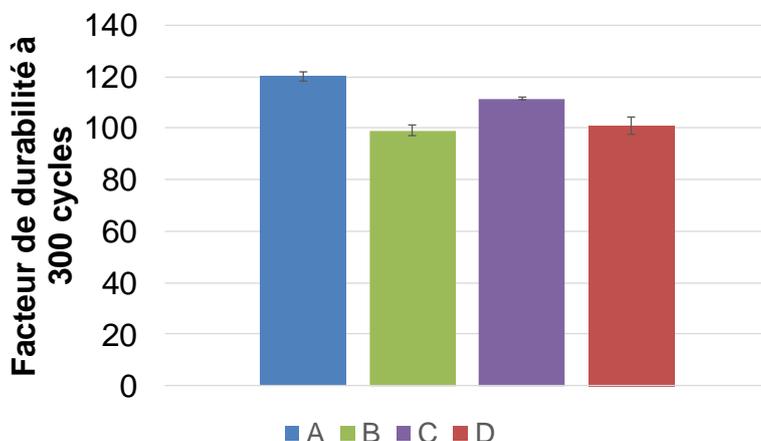


Figure 60 Comparatif des essais de résistances aux cycles de gel-dégel

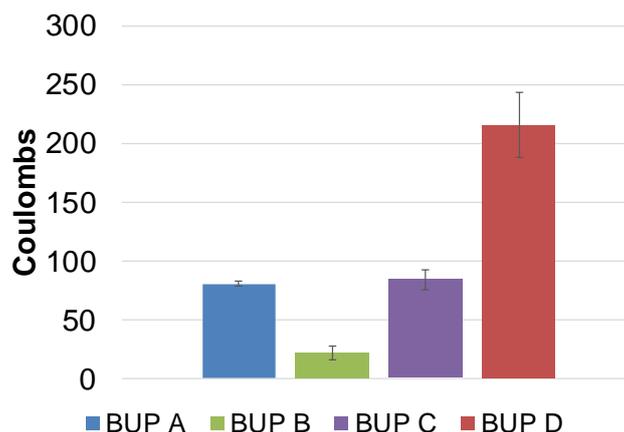


Figure 61 Comparatif des essais de résistance à la pénétration des ions de chlore.

5.2.4 Essai de perméabilité aux ions chlorure

La Figure 61 Comparatif des essais de résistance à la pénétration des ions de chlore présente un comparatif de divers résultats d'intérêts, obtenus à la suite des essais de résistance à la pénétration des ions de chlore. Pour les deux procédures d'essais suivies, les résultats semblent cohérents entre eux. En effet, à l'exception du BFUP B, le BFUP A est le plus imperméable aux ions chlorure tandis que le BFUP D est le plus perméable. Tel qu'expliqué à la section 4.2.4.2, les résultats de certains échantillons ne peuvent pas être considérés puisque des fissures ont été observées à la surface des disques. Ainsi, les résultats obtenus de la procédure modifiée de migration accélérée proviennent d'un seul échantillon et BUP et de BFUP pour chaque matériau. De ce fait, il est possible que les résultats du BFUP B ne soit pas représentatifs de la perméabilité de ce matériau. Pour les essais modifiés de migration accélérée, l'utilisation de fibres en acier

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

inoxydable permettrait de mener l'essai à terme et de prévenir la corrosion des fibres et donc la fissuration du matériau.

5.2.5 Essai de caractérisation du réseau de bulles d'air

La Figure 62 compare les résultats de facteur d'espacement entre les bulles d'air, obtenus à la suite des essais de caractérisation du réseau de bulles d'air. En effet, le BFUP C a un facteur d'espacement plus faible que les autres. De ce fait, il a un réseau de bulles d'air plus importants et donc une matrice moins dense que les BFUPs A, B et D.

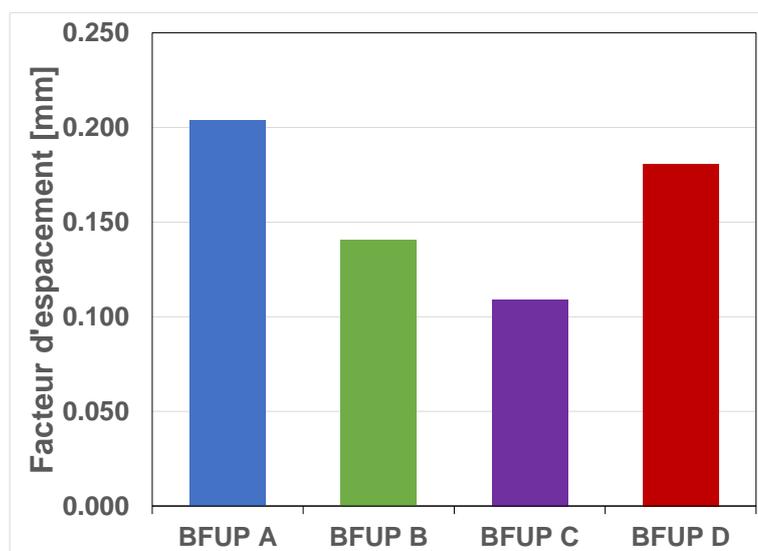


Figure 62 Comparatif des facteurs d'espacement

6. IDENTIFICATION DE LA LOI DE TRACTION PAR TECHNIQUE D'ANALYSE INVERSE DES ESSAIS DE FLEXION

Cette section présente l'analyse inverse selon la très récente norme CSA S6 Annexe 8 qui est basée sur le travail de López pour les BFUPs de type TH-FRC (tension hardening fiber reinforce concrete) avec une loi de traction écrouissante (López et al. 2016). L'analyse inverse est une procédure permettant de déterminer une loi de traction du BFUP à partir des résultats de flexion. Cette procédure est utilisée couramment déterminer la loi de traction des BFUPs, car les essais de traction développés jusqu'à aujourd'hui présentent encore beaucoup de défis techniques et de variabilité, et demandent une réalisation de haute précision autant des échantillons que des bancs d'essais. Les essais de flexion, sont, d'un autre côté, réalisable plus aisément par tous types de laboratoire, ce qui favorise la reproductibilité de résultats entre différents laboratoires.

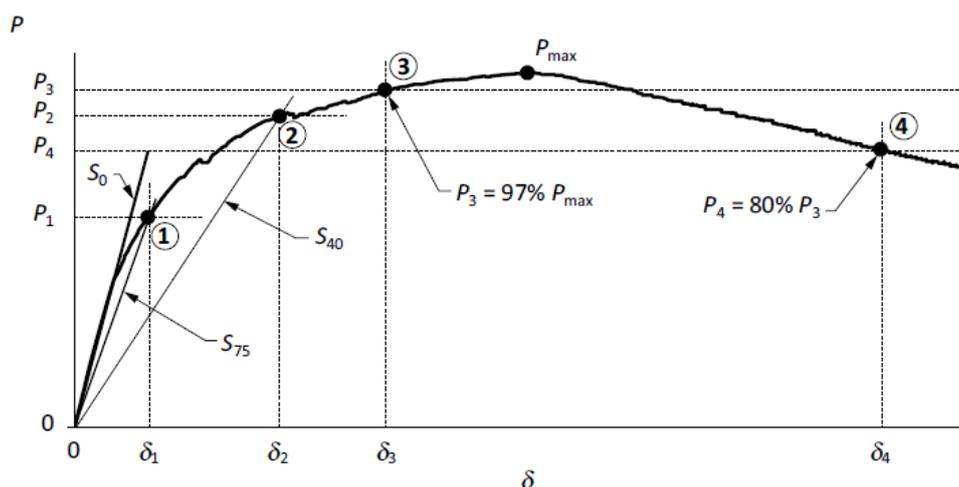


Figure 63 Localisation des points d'intérêt pour l'analyse inverse des essais de flexion à 4 points selon la norme CSA S6, pour des matériaux écrouissants

Source : (Canadian Standards Association 2019b)

6.1 Analyse inverse selon CSA S6 Annexe 8

6.1.1 Analyse inverse pour un BFUP de type TH-FRC (écrouissant)

L'analyse inverse est basée sur le tableau A8.1.1 qui permet de calculer les différents points « contrainte-déformation » correspondant à la fin de la linéarité et au pic directement à partir de 4 points de la courbe « charge-déflexion » provenant de l'essai de flexion à 4 points sur prismes non entaillés (4PBT). L'hypothèse d'applicabilité de la méthode doit être vérifiée pour chaque courbe de flexion (c-à-d, $P_3 > P_2$ avec les points P_2 et P_3 identifiés selon CSA S6 (A8.1.4.5.4.3.2)). La figure 63 présente le positionnement des différents points (P_1 à P_4), selon l'adaptation faite par la norme CSA S6 de la méthode proposée par Lopez.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

Les tableaux 44 à 47 présentent les résultats des analyses inverses réalisées conformément à la procédure décrite à la norme CSA S6 pour des BFUPs écrouissants. Les résultats du Tableau 45 présentent les valeurs de P_1 à P_4 pour les matériaux où l'analyse est applicable. La comparaison des valeurs de P_3 et P_2 permet de confirmer que le critère d'applicabilité de l'analyse inverse est respecté (A8.1.4.5.4.3.2). La localisation des différents points est donnée à l'annexe 20 pour les matériaux à l'étude.

Le Tableau 44 indique les différents paramètres retenus pour établir la loi de traction par analyse inverse des différents matériaux (f_{crm} , ε_{cr} , f_{Fu} , ε_{tu} , E_{c0}). La clause A8.1.4.5.1 stipule que la valeur de f_{crm} (valeur moyenne de fissuration de la matrice) doit être la plus grande valeur possible entre :

- la valeur obtenue par analyse inverse selon le tableau A8.1.1;

$$f_{crm} = K_1 \frac{P_1 L}{bh^2}$$

$$K_1 = \frac{\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{0.19}}{1.63}$$

- la valeur théorique basée sur la résistance à la compression, selon l'équation A8.1.4.5;

$$f_{crm} = 0.6\sqrt{f'_c}$$

Considérant les valeurs moyennes de résistance à la compression pour les BFUPs A, B, C et D, présentées au Tableau 29 de la section 4.1.1, les valeurs théoriques déterminées selon l'équation A8.1.4.5 sont respectivement de 7.19, 6.51, 6.45, 5.93 MPa. Par comparaison entre ces valeurs et celles présentées au Tableau 44, il convient de remarquer que les valeurs de f_{crm} retenues sont toutes supérieures aux valeurs théoriques selon l'équation A8.1.4.5. Les valeurs du Tableau 44 correspondent donc à celles déterminées selon l'équation présentée au tableau A.8.1.1 et respectent la clause A8.1.4.5.1 (retenir la plus grande des deux valeurs).

Les valeurs manquantes nécessaires pour établir la loi de traction par analyse inverse sont directement déterminées avec les équations présentes dans le tableau A.8.1.1. Les résultats finaux d'analyse inverse, présentés à la Figure 64 et au Tableau 44 semblent contradictoires avec un comportement écrouissant ($f_{crm} > f_{Fu}$) pour tous les cas analysés sauf l'échantillon A3 et ce, malgré le fait que l'hypothèse d'applicabilité est respectée dans tous les cas.

Parmi les hypothèses possibles permettant d'expliquer ces résultats, il convient de réaliser que les points P_1 et P_2 sont déterminés par l'intersection de droites correspondant à 75 et 40% de la pente instantanée force-flèche de l'essai de flexion (droites S_{75} et S_{40} présentées à la figure A8.1.4 de la norme CSA S6 et à la Figure 63 de ce rapport). La position de ces points vient directement influencer le calcul des paramètres de la loi de traction (f_{crm} , ε_{cr} , f_{Fu} , ε_{tu} , E_{c0}), particulièrement la valeur de f_{crm} qui est définie uniquement que par la géométrie de l'échantillon (b , h , L) et les points P_1 et P_2 .

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

De plus, la réponse « Force-flèche » d'un échantillon soumis à un essai de flexion 4PBT pourrait être influencée par la procédure d'essai suivie et par la configuration du montage. La clause A8.1.4.5.4.1 spécifie que la caractérisation des propriétés de traction doit être réalisée en accord avec la norme CSA A23.1 Annexe U. La norme CSA A23.1 Annexe U spécifie quant à elle que l'essai mécanique doit être réalisé selon la norme ASTM C1609 (U.4.1.2.2.2) et que les analyses inverses doivent être réalisées en accord avec la norme AFNOR NF P18-470 Annexe D ou encore selon la SIA 2052, Annexe E (U.4.1.2.2.1). La norme ASTM C1609 spécifie que le chargement doit être appliqué de façon monotone sur l'échantillon (aucun cycle de charge-décharge n'est spécifié). Dans le cas du cahier technique SIA 2052, l'annexe E (E.6.1 et E.6.2) spécifie que 3 échantillons doivent préalablement être testés de façon monotone (chargement unique) pour déterminer la charge maximale alors que 3 autres échantillons doivent être testés en procédant d'abord à 3 cycles de charge-décharge jusqu'au tiers de la force maximale enregistrée pour les trois premiers essais. L'analyse inverse simplifiée (E.8) stipule que l'analyse des résultats afin de déterminer la loi de traction doit être réalisée sur les essais ayant été testés de façon cyclique (E.8). Il y a donc ici une possible incohérence entre la procédure d'essai spécifiée à la norme ASTM C1609 (échantillon subissant un chargement monotone) et la procédure d'analyse inverse utilisée (échantillon subissant un chargement cyclique). Le recours à des cycles de charge-décharge pourrait permettre une représentation plus réelle du comportement linéaire « force-flèche » en début d'essai et ainsi une meilleure interprétation des points P_1 et P_2 .

Dans le cas de la norme NF P18-470, l'annexe D stipule que les résultats des essais de flexion à 4 points (4PBT) ne sont utilisés que pour déterminer la limite d'élasticité en traction (D.4.1) alors que les essais de flexion à 3 points (3PBT) servent à déterminer la loi de traction par analyse inverse (D.5). Dans ce cas, le recours à la norme ASTM C1609 (essai de flexion 4PBT) pour régler la méthode expérimentale (U.4.1.2.2.2) à suivre est incohérent avec la méthode d'analyse inverse recommandée (essai de flexion 3PBT). La clause D.4.2 indique qu'il est possible, dans certains cas précis, d'utiliser les résultats d'essais de flexion à 4 points (4PBT) pour déterminer la loi de traction par analyse inverse en utilisant la procédure décrite à l'annexe E de la norme NF P18-470. La condition préalable pour pouvoir utiliser cette analyse inverse implique que le BFUP soit de classe T3, selon la classification décrite à la clause 4.4.3. Un BFUP de classe T3 est catégorisé comme étant très écrouissant, s'il démontre les propriétés suivantes :

$$\frac{f_{ctfm}}{1.25} \geq f_{ctm,el}$$

$$\frac{f_{ctfk}}{1.25} \geq f_{ctk,el}$$

Dans ce cas précis, l'annexe E décrit la procédure d'analyse inverse à appliquer. La procédure d'essai à l'annexe E ne prescrit pas l'utilisation de cycles de charge-décharge pour l'analyse des résultats. Cependant, aucun des matériaux utilisés (à l'exception possible de l'échantillon A3) ne présente un comportement très écrouissant en flexion.

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

Le recours à la procédure d'analyse inverse de la norme NF P18-470 annexe D est donc invalide pour les matériaux testés dans le cadre de ce projet de recherche et le recours à la procédure décrite dans le cahier technique SIA 2052 Annexe E est incohérent avec la méthode expérimentale exigée (ASTM C1609) par la norme CSA A23.1 Annexe U.

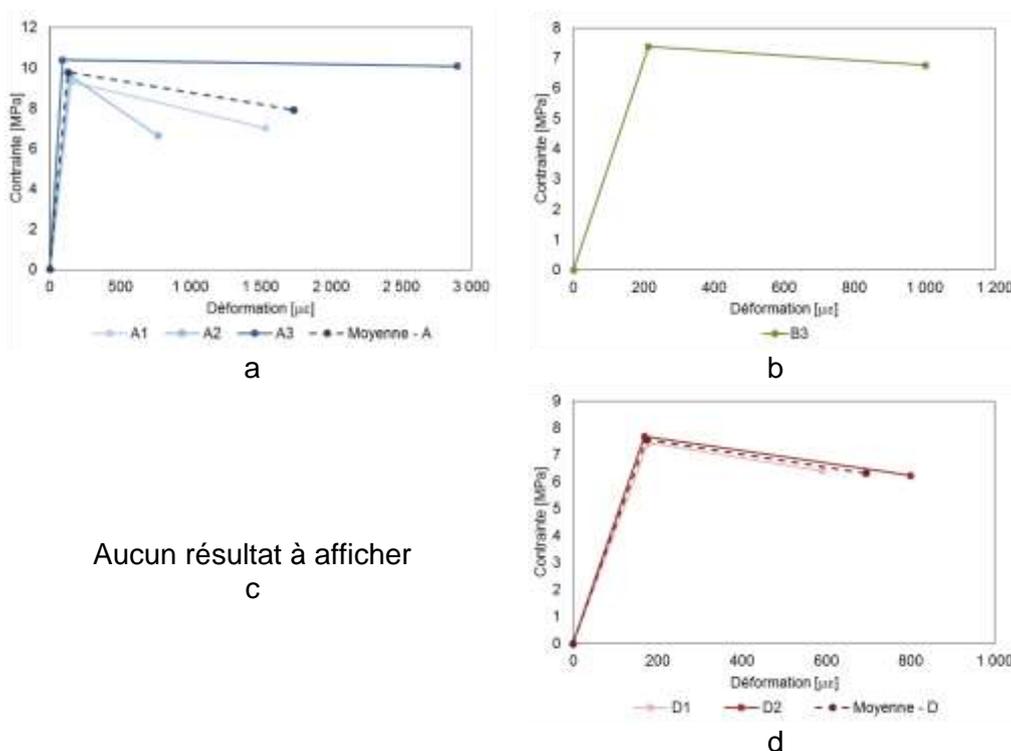


Figure 64 Loïs de traction selon la norme CSA S6 Annexe 8 pour un BFUP de type TH-FRC

6.1.2 Analyse inverse pour un BFUP de type TS-FRC (adoucissant)

La norme CSA S6 propose aussi une méthode d'analyse inverse pour les BFUPs avec une loi de traction adoucissante (c-à-d, TS-FRC Tension Softening Fiber Reinforced Concrete) qui est inspirée par les travaux de Vandervalle et les normes RILEM. En considérant que certains matériaux étudiés dans ces études montrant un comportement à la limite entre écrouissant et adoucissant, l'analyse inverse pour TS-FRC selon CSA S6 Annexe 8 est appliquée. La Figure 65 illustre les lois de traction identifiées à partir des courbes de flexion pour les matériaux en étude. Le résultat de l'analyse inverse est une courbe linéaire contrainte-déformation, suivie par une courbe contrainte-ouverture de fissures. Le Tableau 47 résume les différents points nécessaires aux lois de traction considérant un comportement adoucissant.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

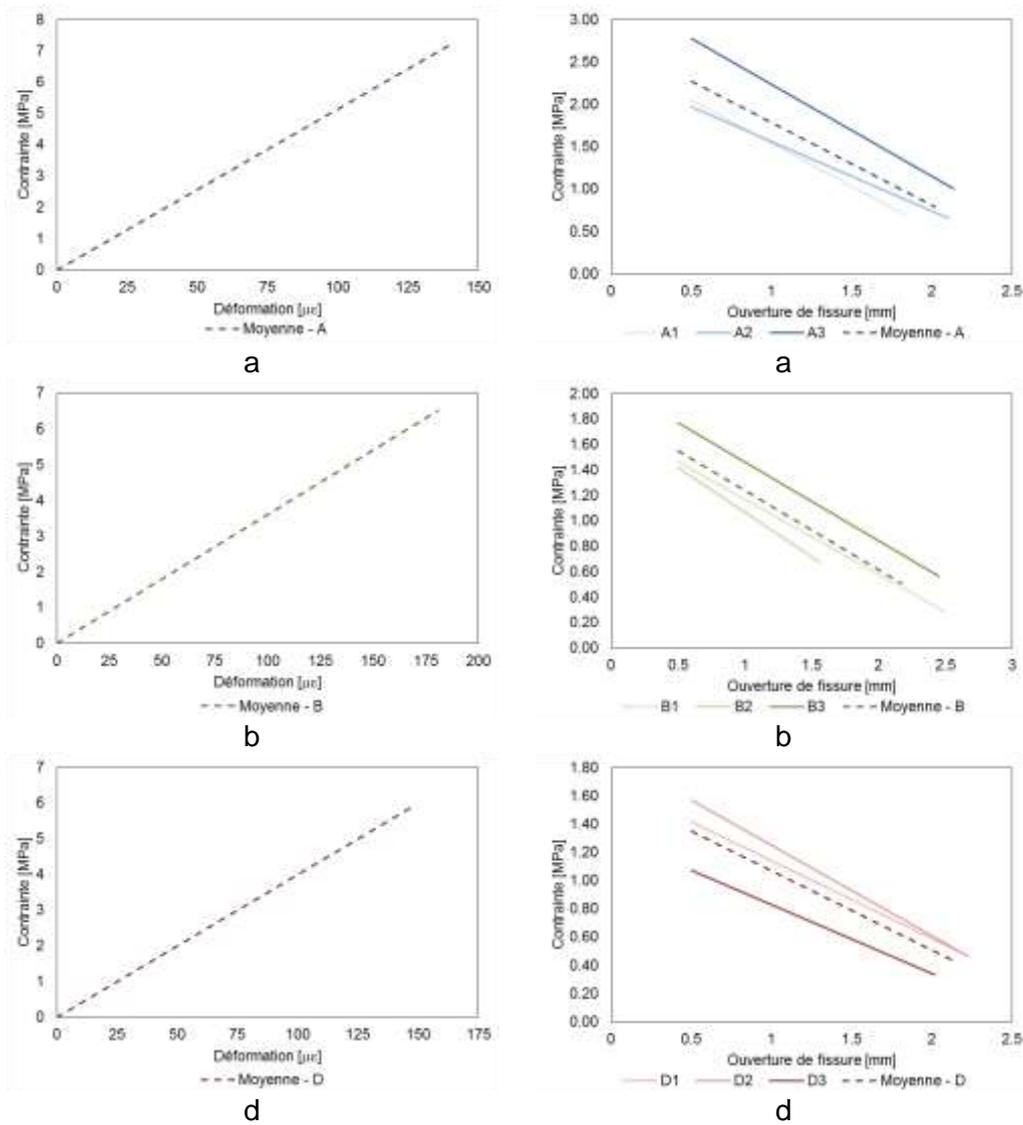


Figure 65 Lois de traction selon la norme CSA S6 Annexe 8 pour un BFUP de type TS-FRC (gauche Conainte-Déformation, droite Conainte-Ouverture de fissure)

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

Tableau 44 Résultats selon l'approche de la norme CSA S6 pour un BFUP de type TH-FRC

Identifiant	f _{orm} (MPa)			ε _{cr} (με)			f _{Fu} (MPa)			ε _{tu} (με)			E _{c0} (MPa)			
	Indiv.	Moy.	É-T	Indiv.	Moy.	É-T	Indiv.	Moy.	É-T	Indiv.	Moy.	É-T	Indiv.	Moy.	É-T	
A	1	9.32			151			7.02			1537			61920		
	2	9.65	9.78	0.54	143	128	33	6.62	7.91	1.90	769	1736	1081	67680	81600	29241
	3	10.38			90			10.09			2903			115200		
B	1															
	2		7.38			213			6.76			1003			34560	
	3	7.38			213			6.76			1003			34560		
C	1															
	2															
	3															
D	1	7.44			178			6.40			591			41760		
	2	7.68	7.56	0.17	169	174	6	6.22	6.31	0.13	800	695	148	45360	43560	2546
	3															

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

Tableau 45 Localisation des différents points (Charges) pour l'application de l'approche de la norme CSA S6 pour un BFUP de type TH-FRC

Identifiant		P ₁ (N)			P ₂ (N)			P ₃ (N)			P ₄ (N)			P _{max} (N)		
		Indiv.	Moy.	É-T	Indiv.	Moy.	É-T	Indiv.	Moy.	É-T	Indiv.	Moy.	É-T	Indiv.	Moy.	É-T
A	1	51840			58591			61191			48813			63069		
	2	52716	54613	4069	54275	63310	12105	57637	68338	15559	45922	54528	12486	59345	70415	16056
	3	59284			77064			86187			68849			88830		
B	1															
	2		40833			44995			49319			38964			50831	
	3	40833			44995			49319			38964			50831		
C	1															
	2															
	3															
D	1	40836			43207			46953			37377			48391		
	2	42466	41651	1153	46551	44879	2365	48879	47916	1361	38906	38141	1081	50363	49377	1395
	3															

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

Tableau 46 Localisation des différents points (Flèches) pour l'application de l'approche de la norme CSA S6 pour un BFUP de type TH-FRC

Identifiant	d ₁ (mm)			d ₂ (mm)			d ₃ (mm)			d ₄ (mm)			
	Indiv.	Moy.	É-T										
A	1	0.088		0.171			0.240			1.091			
	2	0.086	0.075	0.022	0.144	0.146	0.025	0.179	0.232	0.049	1.141	1.081	0.065
	3	0.050			0.121			0.277			1.012		
B	1												
	2		0.175			0.239		0.348			1.105		
	3	0.175			0.239			0.348			1.105		
C	1												
	2												
	3												
D	1	0.142			0.195			0.256			0.769		
	2	0.106	0.124	0.025	0.185	0.190	0.007	0.211	0.234	0.032	1.000	0.885	0.163
	3												

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

Tableau 47 Résultats selon l'approche de la norme CSA S6 pour un BFUP de type TS-FRC

Identifiant	f _{cm} (MPa)	f _{Fs} (MPa)			f _{Fm} (MPa)			f _{Fp} (MPa)			w _m (mm)			
	Indiv.	Indiv.	Moy.	É-T	Indiv.	Moy.	É-T	Indiv.	Moy.	É-T	Indiv.	Moy.	É-T	
A	1		2.05			0.70			2.52			1.83		
	2	7.22	1.97	2.27	0.44	0.66	0.79	0.19	2.37	2.82	0.64	2.10	2.02	0.17
	3		2.78			1.00			3.55			2.14		
B	1		1.46			0.29			1.77			2.49		
	2	6.52	1.42	1.55	0.19	0.67	0.51	0.20	1.94	1.91	0.13	1.56	2.17	0.53
	3		1.77			0.56			2.03			2.45		
C	1													
	2													
	3													
D	1		1.42			0.49			1.94			2.17		
	2	5.94	1.57	1.35	0.25	0.47	0.43	0.09	2.01	1.89	0.16	2.23	2.14	0.11
	3		1.07			0.33			1.71			2.02		

6.2 Comparaison entre les résultats de traction directe et les lois de traction déterminées selon la norme CSA S6 Annexe 8

La Figure 66 compare les lois de traction mesurées grâce à l'essai de traction directe et celles identifiées par les techniques d'analyse inverse selon la norme CSA S6 Annexe 8, pour les quatre matériaux. La figure présente des écarts significatifs entre les lois de traction déterminées par analyse inverse, pour des comportements écrouissant et adoucissant, et les lois de traction expérimentales. Ces écarts peuvent être expliqués par diverses hypothèses, notamment (et sans s'y limiter):

- le nombre réduit de répétitions des divers essais, autant ceux de flexion à 4 points que de ceux en traction directe;
- le raffinement nécessaire des essais de traction directe;
- la variabilité inhérente dans le comportement du BFUP;
- la variabilité de l'effet de l'orientation des fibres sur le comportement en flexion (où l'orientation est critique principalement à la section tendue, c'est-à-dire au bas de l'échantillon) par rapport à celui en traction directe (où l'orientation des fibres est importante sur toute la section transversale);
- la simplification excessive du comportement en traction directe engendrée par l'utilisation des procédures d'analyse inverse;

Afin de déterminer les possibles causes d'erreur et la précision de la méthode inverse proposée par la norme CSA S6, on recommande de conduire une étude statistique avec un nombre d'échantillons testés plus important. Comme indiqué dans la norme CSA S6 les méthodes d'analyse inverse n'ont pas été validées sur une large campagne d'essais. Cette étude est particulièrement critique pour améliorer les méthodes courantes basées sur l'analyse inverse des essais de flexion afin d'identifier la ductilité de BFUP qui est important pour la vérification des fissures à l'état de service et le moment ultime calculé à l'état limite ultime. L'utilisation de la technique par analyse d'images pour le calcul de la loi de traction pourraient être deux techniques possibles afin d'améliorer la corrélation entre les résultats obtenus par essais de traction directe et ceux obtenus par flexion.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

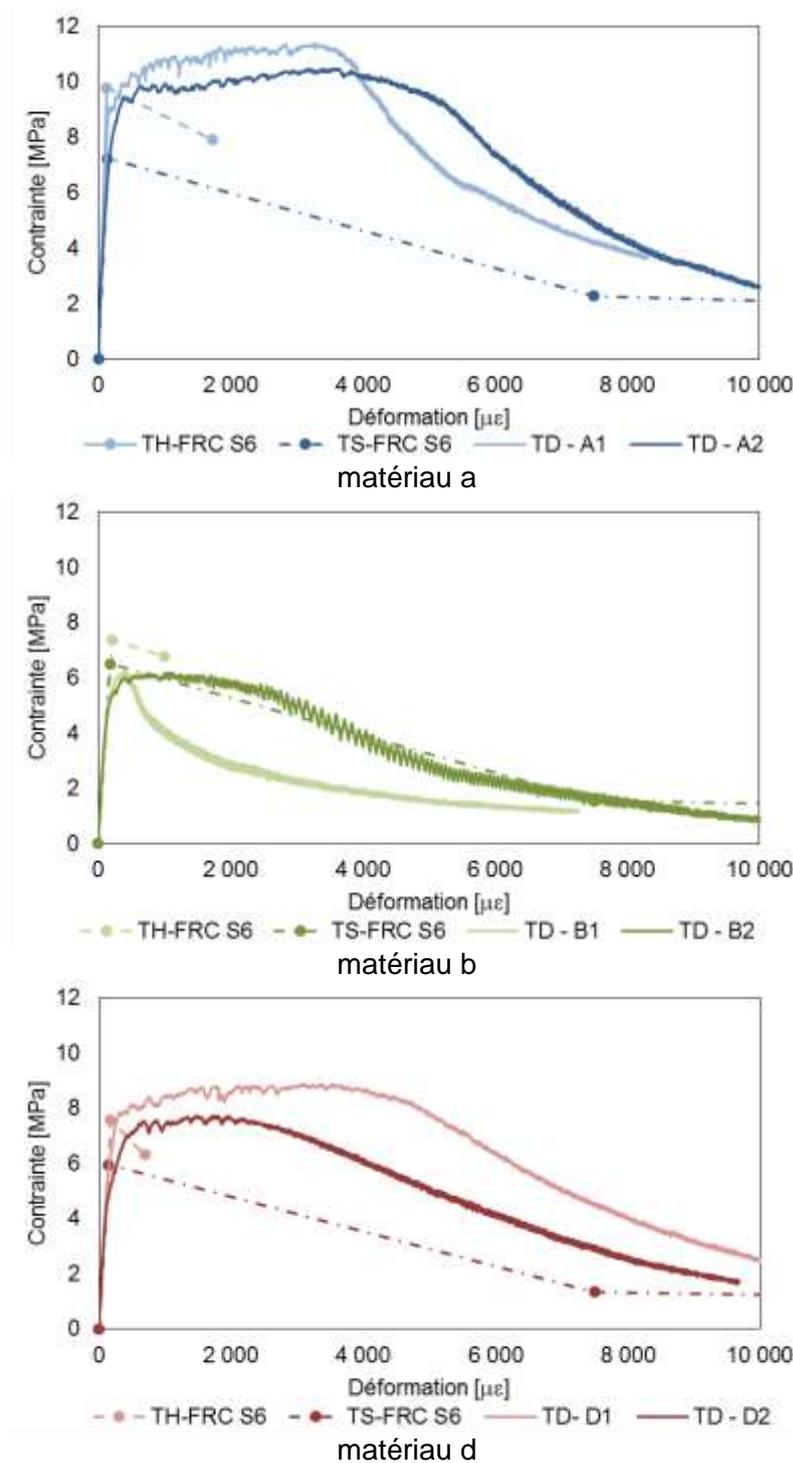


Figure 66 Comparatif entre les résultats expérimentaux et les lois de traction trouvées selon la norme CSA S6 pour des BFUPs écrouissant ou adoucissant

7. POTENTIEL DE FISSURATION DU BFUP PAR LA CORROSION

La durabilité des BFUPs est basée sur leur perméabilité extrêmement faible et la diffusivité, qui est obtenue en maximisant la densité de la microstructure (Fehling et al. 2014; Teichmann et Schmidt 2004; Sorelli et al. 2008; de Larrard et Sedran 1994). Ainsi, la couche de BFUP peut être utilisée efficacement pour améliorer la résistance du béton endommagé et leur perméabilité aux agents agressifs extérieurs ayant un gain optimal en termes de durée de vie de la structure (Denarié et Brühwiler 2015). Il existe très peu de tests sur la résistance au chlorure des BFUPs en conditions réelles de terrain et ces informations sont essentielles pour estimer le gain économique sur le coût de maintenance et la durée de vie de la structure, en particulier dans les régions où les conditions climatiques sont sévères (Stengel et Schießl 2008; Piotrowski et Schmidt 2012).

Comme par exemple, Thomas et al. 2012 ont surveillé la migration des chlorures dans des éprouvettes rectangulaires sans fibres (BUP) dans des conditions réelles in-situ, avec des marées deux fois par jour de cycles mouillage/séchage et des cycles hivernaux de gel/dégel. Après une période d'environ 12 à 15 ans d'exposition marine sévère, la profondeur de pénétration du chlorure a été de 6 à 10 mm, ce qui représente environ un tiers de la profondeur de pénétration du chlorure observée sur des échantillons de référence en béton à haute performance (BHP).

Comme pour les tests de laboratoire, différents types de tests accélérés existent pour évaluer rapidement la résistance du béton à la pénétration des ions chlorure (T. Ahlborn et al. 2011; Benjamin A. Graybeal 2006; B. Graybeal et Tanesi 2007; Luping et Nilsson 1993). Selon la méthode d'essai, différents types de résultats peuvent être obtenus, tels que le profil de chlorure, le coefficient de diffusion effectif ou apparent ou avec un nombre de Coulomb pour donner un rang indicatif de la perméabilité aux ions chlorure du matériau. Ces résultats peuvent être difficiles à comparer. De nombreux autres facteurs influencent la détermination de la perméabilité aux ions chlorure, tels que le type de matériau, la procédure de préparation de l'échantillon ou la méthode d'essai. Ces résultats sont ensuite interprétés pour juger de la durabilité du matériau en ce qui concerne la pénétration des ions chlorure. Cependant, ces essais peuvent ne pas être adaptés pour mesurer avec précision le coefficient de diffusion des BFUPs et caractériser leur durabilité en ce qui concerne la perméabilité aux ions chlorure.

Dans les méthodes d'essai standard, telles que l'ASTM C1202, un champ électrique appliqué accélère la diffusion du chlorure. Il est difficile de mesurer la diffusion à travers les échantillons en raison de l'augmentation indésirable de la température et du court-circuit dû à l'alignement favorable des fibres. En fait, la récente norme de fabrication et d'essai des échantillons BFUP (ASTM C1856) précise que la méthode d'essai ASTM C1202 n'est pas applicable aux BFUP (y compris les fibres) pour les raisons mentionnées précédemment.

Malgré la difficulté de réalisation et l'incertitude des résultats qualitatifs du test ASTM C1202 pour le BFUP avec des fibres, certaines recherches

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

montrent des tests avec des résultats concluants pour les BFUPs avec fibres ou BUP sans fibres. Les résultats, allant de 0 à 360 C, correspondent à la perméabilité négligeable à très faible des ions chlorure de la norme et aucune différence significative n'est observable entre matrice BFUP ou BUP avec et sans fibres. Cependant, un examen de la littérature, par rapport à la perméabilité aux ions chlorure du BFUP considérant l'interaction chimique, montre une grande dispersion des résultats. Thomas et al. (Thomas et al. 2012) et Piérard et al. (Piérard, Dooms, et Cauberg 2012) rapportent respectivement un coefficient de diffusion apparent de $1,3 \times 10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$ et $2 \times 10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$ pour le BUP. Tanaka (Tanaka et al. 2010) obtient un coefficient apparent de diffusion de $4 \times 10^{-15} \text{m}^2/\text{s}$ pour les BFUPs exposés pendant 5 ans dans une poutre-caisson d'un pont et $4,7 \times 10^{-16} \text{m}^2/\text{s}$ pour un BFUP immergé dans une solution de chlorure pendant 2,5 ans. Le Tableau 48 présente un résumé des résultats de la recherche.

**Tableau 48 Résultats du transport des ions chlorure
provenant de la littérature**

Référence	Paramètre de l'essai	Résultats (Mesure – Unité)	Procédure d'essai
(Habel et al. 2008)	\emptyset	88	ASTM C1202 (6 h)
	5.5% acier	72	
(Thomas et al. 2012)	\emptyset	0 à 19	
(Olivier Bonneau 1997)	\emptyset	6 à 7	
	140 kg/m ³ PVA	6 à 9	
(B. Graybeal et Tanesi 2007)	2% acier	18, à 360	
(T. M. Ahlborn et al. 2008)	2% acier	15 à 75	
(Thomas et al. 2012)	\emptyset	1.3×10^{-13}	ASTM C1556 [24] (63 d.) NT Build 443 [26] (90 d.) Exposition pendant 5 ans dans un pont Immersion dans une solution d'eau chlorée pendant 2.5 ans Protocole adapté de l'ASTM C1202
(Piérard, Dooms, et Cauberg 2012)	\emptyset	2×10^{-13}	
(Tanaka et al. 2010)	2% acier	4×10^{-15}	
		4.7×10^{-16}	
(Provete Vincler et al. 2019)	1 à 3% acier	1.8 à 8.2×10^{-15}	
	1 à 5% PVA	1.6 à 3.6×10^{-15}	

Bien que la méthode d'essai ASTM C1202 ne mette pas en évidence de différence significative en raison de la perméabilité aux ions chlorure pour les BUP ou BFUP à partir des différentes expériences, on observe une différence pour les coefficients de diffusion du BUP et du BFUP avec des tests de diffusion naturelle. Ces résultats suggèrent que la méthode d'essai

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

ASTM C1202 pourrait être insuffisante pour caractériser avec précision la perméabilité aux ions chlorure du BFUP et les résultats pourraient ne pas être représentatifs de l'application réelle du matériau avec des fibres. Il peut conduire donc à une forte différence sur la prédiction de la durée de vie ou la conception optimale de l'enrobage des barres d'armature en acier dans les éléments minces en BFUP [28].

Les tests de migration (Provete Vincler et al. 2019) ont été effectués avec succès pour tous les échantillons de BUP, par contre, seuls quelques échantillons de BFUP, ayant une teneur en volume de fibres inférieure à 2%, ont réussi le test. La plupart des échantillons du BFUP présentaient de la corrosion et des fissures entraînant l'échec du test de migration accélérée, provenant du protocole adapté de l'ASTM C1202. La différence avec l'ASTM C1202 consiste en une augmentation (i) de la tension à 70 V, (ii) d'environ cinq fois le volume des réservoirs d'eau, et (iii) de 28 jours de la durée du test. L'ASTM C1202 propose une tension de 60 V durant 6 heures. Un nombre considérable d'échantillons à forte teneur volumique en fibres d'acier ont montré des fissures et de la corrosion (Tanaka et al. 2010). Les essais réalisés avec ces échantillons peuvent être classés comme des essais de migration inutilisables (UMT), car les échantillons se sont fissurés très rapidement et les essais ont donc été interrompus avant 28 jours. Seuls quelques-uns des UMT disposaient de suffisamment de données pour obtenir un coefficient de diffusion. Les UMT étaient plus fréquents pour les échantillons ayant les plus grands volumes de fibres d'acier.

Ces observations semblent anormales pour ce type de matériau. En effet, certaines études bibliographiques ont démontré que les matériaux en fibres d'acier ne peuvent pas se corroder in situ en raison de la faible perméabilité de la microstructure, de la plus petite dimension des fibres d'acier (limitant la zone cathodique) et de l'interface acier-matrice plus dense et plus uniforme (Marcos-Meson et al. 2018; Solgaard et al. 2013). Tous ces facteurs protègent la fibre contre les ions chlorure. La corrosion observée lors des précédents tests de migration accélérée pourrait être due à d'autres effets, comme l'effet de pile (Berrocal et al. 2018). Comme une application haute tension est nécessaire pour ce type de matériau (BUP et BFUP) qui ont une faible perméabilité, il est nécessaire de bien comprendre les limites de l'essai de migration accélérée sur ce type de matrice.

L'étude de Provete Vincler et al. 2020 a testé 28 échantillons de BFUP avec des fibres d'acier avec l'essai adapté de l'ASTM C1202. Le Tableau 49 Quantité d'échantillons utilisés, n_m pour le "test de migration accélérée" n_i pour les "analyses d'image" et p_{SMT} pourcentage de réussite de l'essai de migration SMT

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

Volume de fibres	Partie du cylindre d'essai utilisée pour		
	supérieur (T)	central (M)	inférieur (B)
1%	$n_m=5$ $n_i=3$ $p_{SMT}=33\%$	-	$n_m=4$ $n_i=3$ $p_{SMT}=0\%$
2%	$n_m=4$ $n_i=3$ $p_{SMT}=25\%$	-	$n_m=4$ $n_i=3$ $p_{SMT}=0\%$
3%	$n_m=2$ $n_i=1$ $p_{SMT}=25\%$	-	$n_m=2$ $n_i=2$ $p_{SMT}=0\%$
4%	$n_m=5$ $n_i=5$ $p_{SMT}=0\%$	$n_m=1$ $n_i=1$ $p_{SMT}=0\%$	$n_m=4$ $n_i=4$ $p_{SMT}=0\%$
5%	$n_m=2$ $n_i=1$ $p_{SMT}=0\%$	$n_m=2$ $n_i=2$ $p_{SMT}=0\%$	-
Total	$n_m=18$ $n_i=13$	$n_m=3$ $n_i=3$	$n_m=14$ $n_i=12$

La Figure 67 présente quelques corrélations non linéaires avec l'intensité du courant traversant les échantillons pour tous les tests de migration. Tout d'abord, une relation peut être observée entre l'évolution de la température de la solution (T) et l'intensité du courant (I). La température était de 20 à 30°C en fonction de la température de la pièce et du faible effet Joule induit par le champ électrique appliqué. L'effet Joule se produit lors du passage du courant électrique dans un matériau conducteur par une augmentation de la température. Dans le pire des cas, la température la plus élevée mesurée était de 55°C, ce qui est inférieur à la limite d'environ 90°C pour l'ASTM C1202. Tous les SMT avaient une intensité de courant inférieure à 80 mA, ce qui correspond à une densité de courant de 126 A/m². La température de la solution était donc inférieure à 30°C. Dans presque toutes les UMT, l'intensité de courant était supérieure à 80 mA et la température dépassait 30°C. Lorsque la température atteint cette valeur, il serait donc possible de prévoir la corrosion et la fissuration futures de l'échantillon, mais pas de déterminer quand elles se produiront. Ainsi, il est possible d'exploiter les résultats des tests de migration si la corrosion apparaît tardivement.

résume le nombre d'échantillons testés selon leur teneur en fibres et la partie du cylindre utilisée après sciage (partie supérieure, centrale ou inférieure) pour le test de migration, les analyses d'images et le pourcentage des parties du cylindre testées qui ont passé le test de migration sans dommage. Au total, 6 des 28 échantillons ont passé avec succès le test de migration (SMT). Les 22 autres échantillons ont été identifiés comme étant inutilisables lors du test de migration (UMT) afin de quantifier les propriétés de diffusion du chlorure en raison de la corrosion des fibres d'acier et des fissures des échantillons. À première vue, seuls les échantillons du haut des cylindres d'essai avec 1 à 3 % de fibres avaient passé avec succès le test de migration.

Tableau 49 Quantité d'échantillons utilisés, n_m = pour le "test de migration accélérée" n_i = pour les "analyses

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

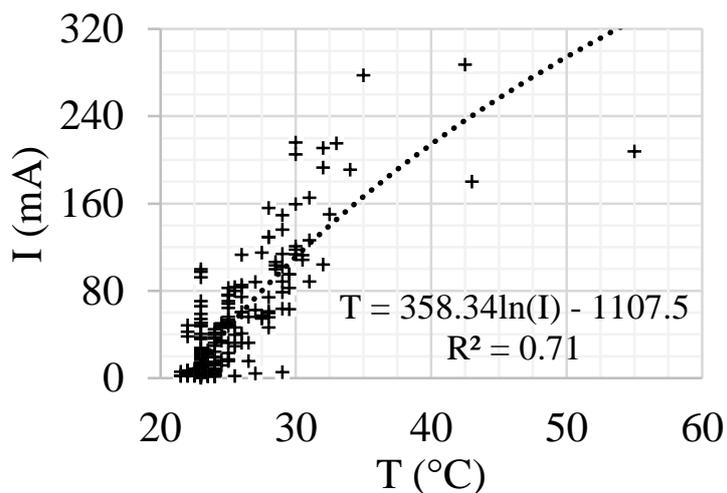
**d'image" et p_{SMT} = pourcentage de réussite de
l'essai de migration SMT**

Volume de fibres	Partie du cylindre d'essai utilisée pour		
	supérieur (T)	central (M)	inférieur (B)
1%	$n_m=5$ $n_i=3$ $p_{SMT}=33\%$	-	$n_m=4$ $n_i=3$ $p_{SMT}=0\%$
2%	$n_m=4$ $n_i=3$ $p_{SMT}=25\%$	-	$n_m=4$ $n_i=3$ $p_{SMT}=0\%$
3%	$n_m=2$ $n_i=1$ $p_{SMT}=25\%$	-	$n_m=2$ $n_i=2$ $p_{SMT}=0\%$
4%	$n_m=5$ $n_i=5$ $p_{SMT}=0\%$	$n_m=1$ $n_i=1$ $p_{SMT}=0\%$	$n_m=4$ $n_i=4$ $p_{SMT}=0\%$
5%	$n_m=2$ $n_i=1$ $p_{SMT}=0\%$	$n_m=2$ $n_i=2$ $p_{SMT}=0\%$	-
Total	$n_m=18$ $n_i=13$	$n_m=3$ $n_i=3$	$n_m=14$ $n_i=12$

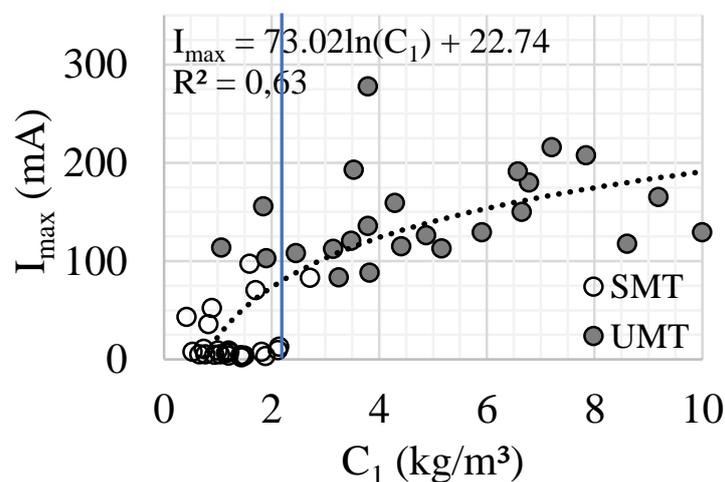
La Figure 67 présente quelques corrélations non linéaires avec l'intensité du courant traversant les échantillons pour tous les tests de migration. Tout d'abord, une relation peut être observée entre l'évolution de la température de la solution (T) et l'intensité du courant (I). La température était de 20 à 30°C en fonction de la température de la pièce et du faible effet Joule induit par le champ électrique appliqué. L'effet Joule se produit lors du passage du courant électrique dans un matériau conducteur par une augmentation de la température. Dans le pire des cas, la température la plus élevée mesurée était de 55°C, ce qui est inférieur à la limite d'environ 90°C pour l'ASTM C1202. Tous les SMT avaient une intensité de courant inférieure à 80 mA, ce qui correspond à une densité de courant de 126 A/m². La température de la solution était donc inférieure à 30°C. Dans presque toutes les UMT, l'intensité de courant était supérieure à 80 mA et la température dépassait 30°C. Lorsque la température atteint cette valeur, il serait donc possible de prévoir la corrosion et la fissuration futures de l'échantillon, mais pas de déterminer quand elles se produiront. Ainsi, il est possible d'exploiter les résultats des tests de migration si la corrosion apparaît tardivement.

On peut également observer un lien entre l'intensité maximale du courant I_{max} et la concentration de chlorure dans la première couche broyée C_1 (Figure 67b). Comme la concentration dans la cellule en amont est $C_0 = 500 \text{ mol/m}^3$, la concentration massique maximale C_{max} qui peut pénétrer dans la solution des pores du béton ne peut pas dépasser 2,22 kg/m³. Par conséquent, presque toutes les UMT présentaient une concentration C_1 supérieure à C_{max} et un courant supérieur à 80 mA. Seuls deux échantillons dépassaient 80 mA à la fin du test de 28 jours, mais ils ont été considérés comme des SMT, car il a été possible d'exploiter leurs résultats.

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)



a)



b)

Figure 67 Corrélations avec l'intensité du courant : (a) intensité du courant pour tous les essais de migration en fonction de la température de la solution à chaque mesure et (b) la plus forte intensité du courant traversant chaque échantillon testé en fonction, la ligne bleue représente C_{\max}

En raison de la courte durée d'exposition, la concentration de chlorure mesurée était faible. Les échantillons a et b de la Figure 68b étaient deux échantillons d'UMT présentant quelques marques de corrosion mais aucune fissure. Cela peut expliquer les valeurs de la concentration de chlorure C_1 qui ont été mesurées dans ces échantillons. On peut en déduire que la forte concentration de chlorure mesurée dans les échantillons d'UMT est principalement due à la présence de fissures.

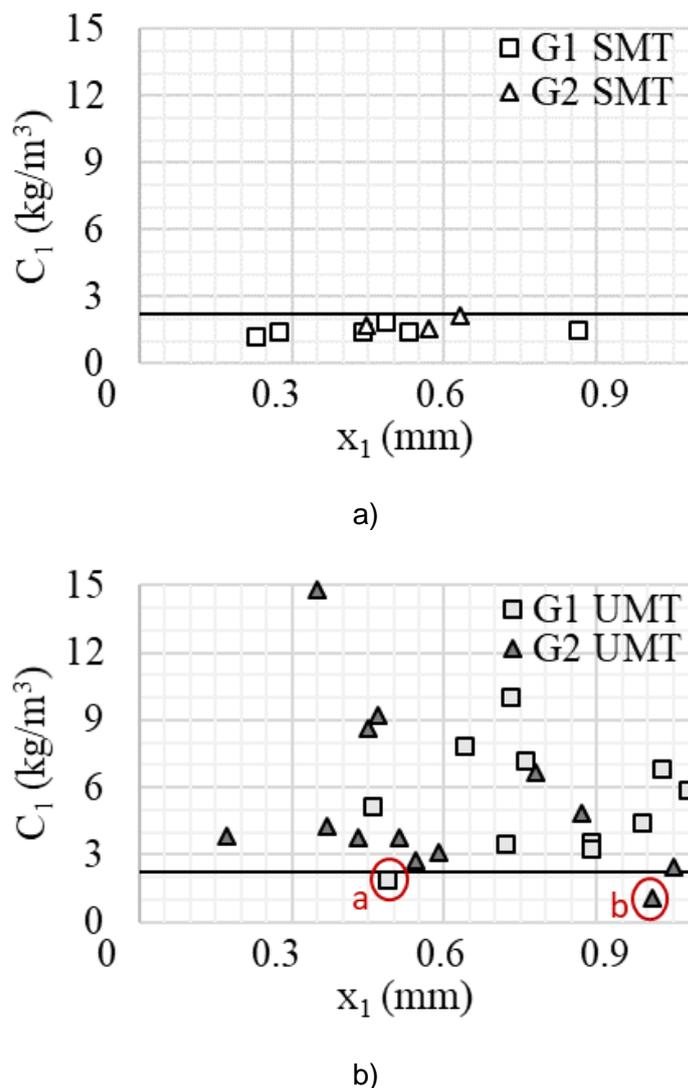
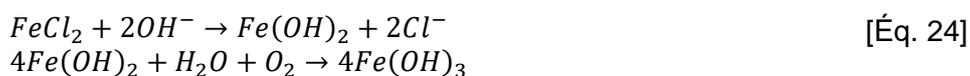


Figure 68 Concentration de chlorure dans la première couche broyée : (a) Tests de migration réussis (SMT) et (b) Tests de migration inutilisables (UMT)

Les valeurs élevées de la concentration de chlorure mesurées pour l'UMT s'expliquent par une augmentation de la porosité des échantillons due à l'ouverture des fissures. Lorsque les ions chlorure Cl^- réagissent avec les fibres d'acier, la réaction produit du dichlorure de fer FeCl_2 [Éq. 23] suivi de la formation de rouille $\text{Fe}(\text{OH})_3$ en l'absence d'oxygène suffisant [Éq. 24], et d'acide chlorhydrique HCl en présence d'oxygène suffisant [Éq. 25] (Mai-Nhu 2013).



**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**



Les deux produits sont visibles sur les échantillons après les tests de migration. Les fissures ont été causées par l'expansion des fibres pendant le processus de rouille (Conciatori 2006). Il est également important de noter que le potentiel électrique élevé appliqué et le pH de la solution de pore augmentent tous deux la formation de HCl (Truc, Ollivier, et Carcassès 2000).

L'inspection visuelle a révélé que le processus débute sur le pourtour de l'échantillon, en particulier à l'interface du béton et de la cellule de migration (Figure 69). Ce processus pourrait s'expliquer par un effet de corrosion caverneuse (Desjardins 2017).

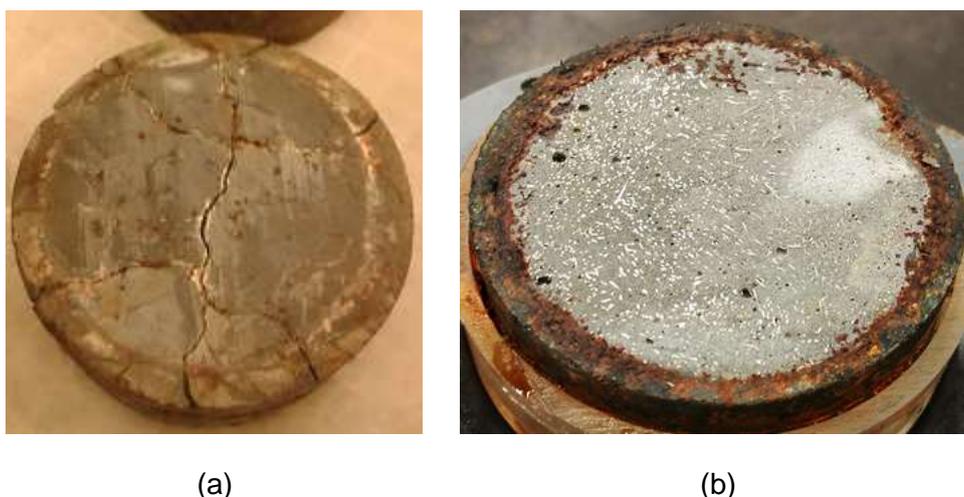


Figure 69 (a) Un exemple d'échantillons UMT présentant des fissures (marques rouges : rouille et marques blanches : hypochlorite), (b) Exemple de localisation de la corrosion sur le revêtement

Une analyse d'images a permis de calculer (« MATLAB Documentation » s. d.) : (1) la distance entre les fibres IFD, (2) l'homogénéité de la distribution des fibres S, (3) l'orientation des fibres φ et (4) la teneur en volume des fibres FV.

Différentes corrélations entre le contenu volumique des fibres mesurées FV_{me} et le coefficient de diffusion $D_{a,Cl}$ ont été observées sur la Figure 70a. Ce dernier est également estimé pour l'UMT où le flux de chlorure a atteint l'état d'équilibre et où la température n'a pas dépassé le seuil standard. Ces résultats étaient cependant moins fiables en raison du processus de fracture. Il est clair que les fissures dans l'UMT ont provoqué une augmentation de deux ordres de grandeur le coefficient de diffusion apparent. Une différence est observée entre le coefficient de diffusion du chlorure calculé à partir du SMT ($D_{a,Cl} \leq 20 \times 10^{-15} m^2/s$) et celui calculé à partir de l'UMT $D_{a,Cl} 50 \times 10^{-15} m^2/s$ (respectivement les points blanc et noir de la Figure 70a).

La Figure 70b présente une corrélation entre la FV_{me} mesurée et la FV_{the} théorique basée sur la conception du mélange. Dans les échantillons analysés, la teneur en volume des fibres est plus importante dans le fond du

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

moule cylindrique que dans le haut. Plus l'échantillon est bas dans le cylindre d'essai, plus sa valeur de FV_{me} est élevée, dépassant la FV_{the} . Cela semble être dû à un possible phénomène de ségrégation des fibres lors de la méthode de coulée.

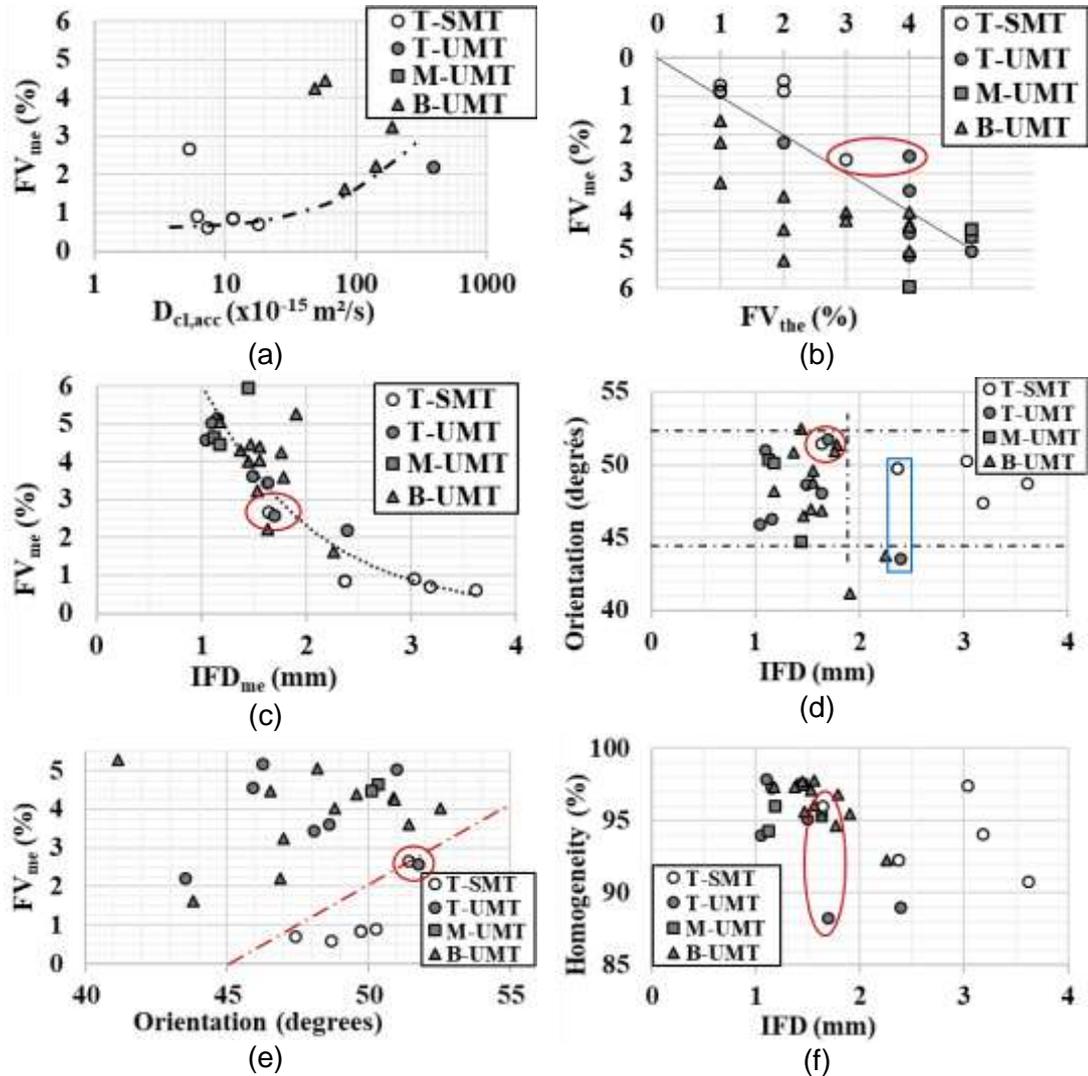


Figure 70 Corrélations entre les résultats des échantillons analysés : (a) La teneur en volume des fibres selon le coefficient de diffusion des chlorures (b) La teneur en volume des fibres mesurée selon le volume des fibres mises dans le mélange (c) La teneur en volume des fibres selon la distance entre les fibres (d) L'orientation des fibres selon la distance entre les fibres (e) La teneur en volume des fibres selon l'orientation des fibres et (f) L'homogénéité de la distribution des fibres selon la distance entre les fibres.

Dans la Figure 70c, la FV_{me} est indiquée en fonction de la distance entre les fibres IFD_{me} . La plupart des tests UMT correspondent aux tests avec une IFD inférieure à 2,2 mm, ce qui signifie qu'avec des fibres d'acier assez proches les unes des autres, cela facilitera le processus de corrosion.

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

La Figure 70d met en évidence l'affinité de l'orientation des fibres et de la distance inter-fibres (IFD). Là encore, l'IFD semble affecter la corrosion des fibres plus que leur orientation. Une limite séparant l'UMT et le SMT peut être observée (rectangle bleu dans la Figure 70d).

Le volume des fibres FV en fonction de leur orientation (Figure 70e) indique que même pour un faible volume de fibres (moins de 2%), une inclinaison de 45° des fibres peut favoriser leur corrosion. Dans la Figure 70e, une ligne rouge a été tracée pour séparer l'UMT et le SMT. Cette ligne peut être définie avec les limites suivantes : (i) IFD 1,60 mm et (ii) φ 45 degrés. Plus la teneur en volume des fibres augmente, plus les fibres doivent être inclinées pour conduire à une TMS. Néanmoins, deux des échantillons G2 avaient les mêmes FV, IFD et φ , mais un seul d'entre eux a subi avec succès un test de migration. Ils sont tous deux identifiés par un cercle rouge dans la Figure 70b-e.

La dernière corrélation entre l'homogénéité et l'IFD (Figure 70f) nous permet de séparer les deux mêmes échantillons dans le cercle rouge et d'identifier le dernier paramètre seuil. L'homogénéité est différente pour les deux échantillons : en effet, l'échantillon SMT a une meilleure homogénéité (95%) que l'échantillon UMT (88%). On peut conclure que les fibres doivent être distribuées de manière homogène dans un BFUP pour appliquer les conditions discutées précédemment.

Les analyses ont montré qu'au-delà d'une teneur de 1,5% en volume de fibres (correspondant à 1,60 mm de DFI), la méthode de coulée est essentielle pour avoir une homogénéité et une orientation des fibres fiables. En effet, lorsque les fibres sont étroitement orthogonales à la direction du flux de migration ($\varphi \leq 45$ degrés), la surface d'échange entre les fibres et le flux de chlorure est plus importante. Ce phénomène semble accélérer la corrosion des fibres et la formation de fissures dans l'échantillon.

L'historique de l'utilisation du BFUP est jeune puisque des résultats sont disponibles pour seulement une dizaine d'années d'exposition sévère (Denarié et Brühwiler 2015). Même lorsque les BFUPs sont microfissurés, les paramètres de durabilité demeurent exceptionnels, lorsqu'ils sont comparés au béton normal (Wittmann et al. 2015; Marsavina et al. 2009; Jang, Kim, et Oh 2011; J.-P. Charron, Denarié, et Brühwiler 2007; Hubert, Desmettre, et Charron 2015). L'utilisation de fibres inoxydables dans l'étude de Turgeon-Malette et al. 2020 n'a montré aucune corrosion avec le protocole d'essai adapté de l'ASTM C1202. Toujours dans la même étude, des poutres microfissurées et testées avec un champ électrique, également aucune corrosion n'a été relevée. Ces dernières remarques permettent de conclure que la fissuration accélérée du BFUP apparaît en présence d'un champ magnétique et donc le choix du type de fibres devrait tenir compte de l'environnement immédiat à de tels champs, comme par exemple, le passage de lignes électriques aériens ou souterrains, caténaires de métro, trains, etc.

8. EXPÉRIENCES PERTINENTES ET RECOMMANDATIONS

Ce projet de recherche a apporté son lot de défis et d'expériences. La caractérisation du BFUP, tant mécanique qu'en termes de propriétés de durabilité, est particulièrement exigeante.

8.1 Défis rencontrés

La caractérisation des propriétés mécaniques et de durabilité des différents BFUPs utilisés dans le cadre de ce projet de recherche a posé de nombreux défis. Il faut aussi noter qu'au début du projet les normes CSA A23.1 Annexe U sur les méthodes de fabrication et caractérisation des BFUPs, la norme CSA S6 A8.1 sur leur conception et la norme ASTM n'étaient pas disponibles. Seules quelques directives américaines ASTM C1856 et les normes européennes et suisses étaient disponibles.

Les défis suivants ont été rencontrés :

- Malaxage des différents BFUPs. Tel que présenté dans la revue de littérature, le BFUP requiert un processus de malaxage très précis afin d'obtenir un mélange conforme aux exigences du fournisseur, et les malaxeurs nécessaires fournissent une énergie de malaxage beaucoup plus importante afin de désagglomérer les particules fines et fluidifier le mélange. Une procédure adaptée, avec un malaxeur à béton conventionnel, a dû être mise en place afin de produire un matériau conforme avec un malaxeur non adapté à ce matériau. Le malaxeur utilisé a également un impact sur la distribution des fibres à l'intérieur de la matrice cimentaire, ce qui en retour influence directement les résultats des essais en flexion/traction et pourrait être une des causes des écarts-type importants notés dans certains essais.
- Mise en place des protocoles d'essai particuliers pour le BFUP. Puisque la presse SATEC utilisée pour les essais de compression fonctionne avec un taux de déplacement (mm/min) plutôt que de charge (MPa/sec), une conversion et une calibration ont été nécessaires afin d'obtenir un taux de déplacement acceptable. Cette conversion a été d'autant plus délicate à déterminer considérant la différence notable dans les modules d'élasticité des différents matériaux testés dans le cadre de ce projet (de 35 GPa à 50 GPa).
- La fabrication d'un montage de flexion hybride, permettant de réaliser tous les différents essais de flexion (3PBT, 4PBT, 4PBT sur dalles minces) tout en permettant une analyse des résultats par corrélation d'images a posé un certain défi. De plus, afin de garder un contrôle de la presse en tout temps lors de l'essai, une programmation complexe du protocole d'essai de la presse a été nécessaire. Ceci s'est avéré essentiel puisque la rupture des fibres lors des essais de flexion entraîne un choc et une augmentation rapide de la flèche mesurée par les LVDTs. Cette augmentation rapide de la flèche

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

dépasse alors le taux de chargement initialement déterminé, et la presse décharge l'échantillon afin de retourner à la bonne flèche. Afin de contrecarrer ce problème, un système de boucles et de remises à zéro automatique de la flèche en cours d'essai a dû être implanté à l'intérieur de la programmation.

- L'implémentation et l'adaptation d'un essai de traction directe a été préalablement développé à l'EPFL pour garantir une traction uniforme sur les BFUPs (Helbling et Brühwiler 1987; Hajiesmaeili et Denarié 2018). La caractérisation en traction directe reste un essai très complexe, et beaucoup de développement est encore nécessaire afin d'optimiser sa réalisation au niveau international. Du côté de l'université Laval, l'essai est bien maîtrisé lorsque l'on compare en prépic les déplacements différentiels faibles sur toute une section de l'éprouvette. L'installation de l'échantillon à l'intérieur du banc d'essai, l'instrumentation et le pilotage de l'essai reste des étapes plutôt complexes. L'alignement des échantillons présente toujours un défi pour cet essai, car un alignement déficient affecte énormément les résultats de traction.
- Dans la caractérisation de la durabilité, le défi principal est de pouvoir accélérer les essais typiquement effectués sur du béton conventionnel, sans toutefois tester le matériau dans des conditions non-représentatives de ses conditions en service. Par exemple, le BFUP ne présente généralement aucune dégradation avec les essais d'écaillage et de gel-dégel, et des essais plus rigoureux ou exigeants devraient être développés, afin de caractériser le matériau. Une difficulté similaire est notée pour les essais d'absorption d'eau, où l'imperméabilité de la matrice rend l'absorption d'eau particulièrement lente.
- L'essai de résistance à la pénétration des ions de chlore est aussi un essai complexe pour le BFUP, car la présence de fibres métalliques modifie le principe de l'essai en créant un chemin préférentiel pour le courant électrique. De nombreux essais différents existent dans la littérature afin de déterminer la résistance à la pénétration des ions de chlore, mais ces essais ne sont souvent pas adaptés pour le BFUP.
- Pour l'essai de résistance aux cycles de gel-dégel, plusieurs réparations du tombeau de gel-dégel ont dues être effectuées avant de démarrer l'essai ce qui en a largement retardé le démarrage. Tel que mentionné plus haut, la difficulté des essais de migration des ions chlorure réside dans la présence ou non des fibres métalliques. Lorsque celles-ci sont présentes, un suivi assidu de l'essai doit être effectué afin de pouvoir arrêter l'essai avant qu'il y ait un court-circuit.
- Un défi particulier était le fait que la norme canadienne sur la fabrication, caractérisation et conception des BFUPs (CSA S6 A8.1 et CSA A23.1) est apparue seulement à la fin du ce projet, même si des versions préliminaires ont été rendues disponibles durant le projet. Malgré l'adaptation rapide par rapport aux analyses en cours

vis-à-vis de la norme, le temps restant pour évaluer la pertinence des essais de la nouvelle norme reste toutefois très limité.

8.2 Recommandations pour les devis du Ministère concernant l'utilisation du BFUP dans les ouvrages d'art et les structures

Pour réaliser un devis avec l'utilisation du BFUP, il est intéressant de réfléchir dans une première étape sur la fonction dont le matériau doit remplir. Il y a une fonction de portance et une fonction de protection. Si le choix se porte sur la fonction de portance, il est dans ce cas important de mettre l'accent sur les propriétés mécaniques. Alors que si le choix se porte sur la fonction de protection, l'accent est mis plutôt sur les propriétés de durabilité. La ductilité en traction du BFUP, qui se manifeste avec une microfissuration multiple, est critique pour assurer la durabilité de la structure en service. Et finalement, si le matériau doit remplir les deux fonctions pour assurer la durabilité à long terme, dans ce cas, l'effet de la dégradation mécanique sur la durabilité du BFUP doit être regardé avec plus d'attention.

- Essai de résistance à la compression. La résistance à la compression du BFUP est une propriété critique du matériau, et l'essai proposé par l'ASTM C1856 (diminution de la taille de l'échantillon, augmentation de la vitesse de chargement comparativement à un essai sur béton conventionnel) permet une caractérisation rapide et précise. Il est à noter que, selon les critères de résistance minimaux présentés dans la CSA A23.1, les matériaux B, C et D ne pourraient pas être caractérisés comme BFUP puisque la résistance caractéristique est inférieure à 120 MPa. Dans le cas du BFUP A, les résultats obtenus laissent croire que le matériau se catégorise comme un BFUP de classe 120 (le nombre d'essai est insuffisant afin d'établir la valeur de résistance caractéristique selon les critères de la CSA A23.1, mais les résultats obtenus indiquent une résistance suffisante). La résistance au jeune âge est également un critère important car elle conditionne la vitesse à laquelle les éléments peuvent être décoffrés et, ultimement, le délai d'attente nécessaire avant de pouvoir mettre la structure en service. Les essais réalisés au jeune âge indiquent que 3 matériaux sur 4 (BFUP A, B et C) respectent le critère de résistance pour le décoffrage de 80 MPa à 4 jours exigé par le MTQ. La clause U.7.3.2 de la CSA A23.1 recommande cependant une résistance minimale de 100 MPa avant l'application de la charge sur le BFUP, ce qui représente un temps d'attente entre 4 et 28 jours pour les matériaux A, B et C. Pour le matériau D, la résistance reste en-dessous de 100 MPa.
- Essais de traction directe. La loi de traction de BFUP est l'élément clé dans la conception des structures en BFUP selon la norme CSA S6 A8.1. Malgré que cet essai soit stipulé dans la norme CSA S6 A8.1, aucune méthode d'essai n'est spécifiée par les normes canadiennes. L'état de l'art développé dans cette étude a permis de

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

comparer les méthodes d'essais de traction directe disponibles dans les autres pays. En particulier, dans cette étude, une méthode d'essais de traction directe développée à l'EPFL (Hajiesmaeili et Denarié 2018; Helbling et Brühwiler 1987) a été mise en place. Cette méthode permet d'obtenir des déformations de traction plutôt uniforme qui sont difficilement atteignables avec l'effet de prise de mâchoires de presse. Les essais réalisés à l'Université Laval ont permis de caractériser les BFUPs disponibles au Québec avec succès. La poursuite dans le développement et l'amélioration d'un essai de traction directe pourrait être pertinent pour les utilisateurs de ces matériaux afin d'identifier la loi de traction du BFUP avec précision et de qualifier ainsi le matériau. Cela permettra aussi de valider les formules de l'analyse et d'utiliser le matériau avec une meilleure certitude sur les propriétés mécaniques. Cette dernière remarque relate un commentaire des normes CSA S6 A8.1, où il recommande de définir un devis d'essai de traction directe, afin d'identifier la loi de traction moyenne et caractéristique d'un BFUP;

- Essais de flexion pour identifier la loi de traction. La norme CSA S6 A8.1 propose une méthode d'analyse inverse pour identifier la loi de traction à partir des essais de flexion conduit selon la norme CSA A23.1. Comme mentionné dans la norme elle-même, peu de résultats sont aujourd'hui disponibles pour valider de façon statistique les formules de l'analyse inverse pour les BFUPs. En particulier, dans ce projet, la méthode inverse selon CSA S6 A8.1 avec essais de flexion a fourni des lois de traction moyennes qui sont significativement inférieures de celles qui ont été mesurées avec les essais de traction directe. Il est fortement recommandé de conduire une étude statistique (en général 6 essais et en réalité le nombre d'essai est dépendant de la convergence vers un écart-type sans fluctuation), afin de valider les différentes hypothèses à la base de la méthode d'analyse récemment proposé par la norme CSA S6 A8.1;
- En particulier, la répétition des essais de flexion et de traction dans cette étude était limitée, car le but était la comparaison de différents BFUPs. Pour l'identification d'une loi de conception de traction avec des valeurs caractéristiques et de conception (qui considère l'effet de la dispersion de résultats), il serait important de conduire une étude statistique (en général 6 essais et en réalité le nombre d'essai est dépendant de la convergence vers un écart-type sans fluctuation) de la méthode de flexion et traction pour déterminer les coefficients de sécurité appropriés, ainsi que le minimum d'essais à prescrire;
- Essais de retrait. Cette étude a démontré que le retrait de séchage est très limité et pas significatif pour le BFUP, tout à fait en accord avec les résultats disponibles dans la littérature (Benjamin Allen Graybeal 2005). Toutefois, le retrait endogène au jeune âge des BFUPs est très important dû au contenu élevé de ciment (Xie et al. 2018; Lura, Jensen, et van Breugel 2003). Il est recommandé de mettre en place un devis avec une méthode de mesure appropriée

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

pour mesurer le retrait endogène de BFUP au jeune âge à partir de la norme ASTM C1698-19 avec un tube ondulé. En particulier, de récentes études montrent que le retrait endogène des BFUPs pourrait induire d'importantes contraintes de traction et fissurations de retrait au jeune âge (Hafiz, Hajiesmaeili, et Denarié 2019). Puisque la norme CSA S6 A8.1 ne mentionne rien à ce sujet, il sera donc important de comparer les méthodes existantes et d'identifier une technique appropriée pour caractériser le retrait endogène de BFUP;

- Étude sur l'effet de l'orientation des fibres causé par les différents types de malaxeurs et technique de remplissage en chantier. La norme CSA S6 A8.1 propose un coefficient de sécurité pour l'orientation de fibres qui varie considérablement entre 1 et 0.3 selon l'application. Malgré que la norme CSA A23.1 mentionne l'importance de garantir une distribution uniforme dans les méthodes de coulages pour la préparation des échantillons, aucun protocole précis n'est défini. On pourrait donc s'attendre avoir des écarts importants entre le comportement en flexion des BFUPs coulés en laboratoire et en chantier à cause de ségrégation de fibres et la distribution de leur orientation. Malgré que l'effet de la distribution des fibres n'ait pas été l'objet d'étude de ce projet, certains BFUPs ont montré une importante ségrégation de fibres lors de coulage. De plus, les résultats de résistance à la flexion montrent une variabilité importante due à l'orientation de fibres. De récents essais en Suisse (Osterlee 2010) ont montré que l'effet de remplissage pourrait fortement affecter la résistance en traction identifiée par analyse inverse sur des BFUPs.
- Enfin, des sondes magnétiques ont été développés récemment pour détecter la distribution des fibres métalliques dans des poutres et dalles en BFUP qui pourraient être d'utilité pratique pour vérifier l'uniformité de la distribution de fibres dans les coulages des échantillons pour les essais de caractérisation ou pour le contrôle de qualité du coulage en chantier et des éléments préfabriqués (Shen et Brühwiler 2020). On recommande d'explorer ces outils pratiques pour vérifier la distribution de fibre qui reste un aspect critique du comportement structurel des structures en BFUP.

Pour évaluer les propriétés de durabilité du BFUP, les essais d'absorption et de perméabilité aux ions chlorure sont ceux qui permettent de faire la comparaison de plusieurs mélanges entre eux. Si les essais de la résistance à l'écaillage et de la résistance aux cycles de gel-dégel ne sont pas mis dans cette liste, c'est qu'ils n'ont pas permis d'obtenir de résultats probants dans ce travail. Voici les recommandations faites pour la réalisation de chaque essai :

- Essais d'absorption : la porosité mesurée sera proche de 3 à 5% si la procédure suit méticuleusement les codes en vigueur; ces valeurs sont en réalité erronées, pour un modèle de calcul par exemple, et la version longue de l'essai, proposé par l'AFGC, permettra d'avoir des valeurs plus réalistes de la porosité des BFUPs. On recommande d'étudier la porosité capillaire des BFUPs, par exemple avec la

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

porosimétrie par intrusion de mercure (MIP). Certains BFUPs sont disponibles au Canada avec une quantité réduite de fumée de silice pourrait contenir une porosité capillaire significative (5-10%). Cela se remarque de façon indirecte lors d'obtention de basses résistances en compression des BFUPs disponibles au Canada. Il est donc fortement recommandé d'étudier le système de porosité des différentes classes de BFUP et le lien avec sa durabilité.

- Essais de résistance à l'écaillage : notre expérience et celle de la littérature montrent qu'il n'y a pas de détachement de particules pendant cet essai; la cote est 0. Cependant, cet essai pourrait être combiné avec un essai d'abrasion et comparé avec un échantillon de référence n'ayant pas subi l'essai d'écaillage préalablement. Il pourrait être possible de noter si une dégradation engendrée par l'action des sels de déglçage a bien eu lieu, ou si le BFUP présente réellement une excellente résistance face à l'écaillage. Il convient aussi de noter que le phénomène de dégradation par l'écaillage est encore mal connu, et que l'utilisation d'une solution davantage saturée en sels n'est pas garante d'une sollicitation plus importante.
- Essais de résistance aux cycles de gel-dégel : il est intéressant dans cet essai d'observer une prise de résistance dans le temps. Peut-être que le temps d'essai n'est pas suffisant pour observer des dégâts dus au gel-dégel. Il faudrait peut-être exercer une sollicitation plus importante, des écarts de température plus grande, etc. de la recherche est nécessaire pour évaluer la résistance au gel-dégel de ce matériau.
- Essais de perméabilité aux ions chlorure : La question principale concernant cet essai réside dans la réalisation de l'essai de perméabilité sur une matrice cimentaire fibrée ou non. Il apparaît certain que la porosité du matériau est différente dans les deux cas, soit que la matrice contienne des fibres ou non. Privilégier la présence de fibres est meilleur selon notre avis. Une façon d'éliminer le problème serait de remplacer les fibres d'acier par des fibres inoxydables de même dimension et taille, malgré le coût plus important de ces fibres par rapport aux fibres traditionnellement utilisées. Par contre, la solution la plus simple est de faire l'essai sur des échantillons sans fibres; la méthode de l'ASTM C1202 est rapide et donne une idée de la qualité qui devrait se situer de très faible à négligeable. Si des prédictions sont nécessaires, l'essai de migration modifié permet d'identifier le coefficient de diffusion du chlore dans le matériau.
- Il est difficile avec cette étude d'obtenir une idée de la distribution du réseau de bulles d'air sur la durabilité au gel/dégel des BFUPs. Des essais combinés avec des sollicitations au gel/dégel plus importantes sont nécessaires pour voir s'il y a une corrélation avec les résultats obtenus dans cette étude.

Lorsque le BFUP (Provete Vincler et al. 2019, Provete Vincler et al. 2020) est appliqué sur un ouvrage où des courants vagabonds (lignes de métro, de chemin de fer, de haute tension, etc.) sont présents, une attention particulière doit être mise en place. En présence d'espèce ionique comme

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

les chlorures, la corrosion des fibres libèrerait des ions H^+ . Lorsque plusieurs ions H^+ se combinent à l'intérieur d'un pore, il peut y avoir formation de dihydrogène, un gaz très expansif provoquant immédiatement une fissuration rapide du matériau. À nouveau, l'utilisation de fibres inoxydables a totalement annihilé cette réaction indésirable même en présence de microfissures dans le matériau.

Dans le futur, si un BFUP est utilisé pour augmenter la durée de vie des infrastructures existantes ou nouvelles, il sera important de réussir à développer des méthodes d'essai capables de caractériser la durabilité des BFUPs dans des conditions représentatives de leurs conditions de contrainte en service. Par exemple, les essais de gel-dégel et d'écaillage, selon les méthodes standard pour le béton normal, n'ont pas donné de résultats significatifs qui permettent de quantifier la durabilité de BFUP à long terme.

9. CONCLUSION

Deux types d'utilisation se distinguent pour le BFUP, soit coulé sur place ou préfabriqué, chaque méthode répondant à des besoins différents. Pour les BFUPs coulé sur place, on pense notamment à cette utilisation pour les joints ainsi que la réhabilitation et la réparation des structures. Les éléments préfabriqués sont plutôt utilisés pour des applications structurales et architecturales. Ces différentes applications nécessitent que la performance visée du matériau soit adaptée à son utilisation. La performance du matériau est généralement caractérisée par ses propriétés mécaniques et sa durabilité. L'utilisation du BFUP pour des éléments structuraux préfabriqués nécessite une vérification des performances mécaniques telle que la résistance en compression. Pour des éléments soumis à des contraintes de flexion importantes, la résistance en flexion devrait également être nécessaire. La résistance en traction pure pourrait aussi être une information à connaître pour des éléments soumis à ce type de contrainte, cependant la grande difficulté pour réaliser des essais en traction directe rend cette information particulièrement complexe à obtenir. Contrairement au béton normal, une utilisation du BFUP pour des éléments devant résister à de la traction serait envisageable étant donné son comportement ductile en traction. Une cure accélérée à haute température serait à privilégier pour des éléments préfabriqués, afin de favoriser la réaction d'hydratation et ainsi améliorer les propriétés mécaniques et de durabilité des BFUPs au jeune âge. Pour le BFUP coulé sur place et utilisé pour la réhabilitation ou la réparation de structures, une cure accélérée imposerait probablement des dispositions très complexes en chantier, en plus d'augmenter les coûts globaux et nécessiter un suivi constant des conditions afin de s'assurer de l'efficacité de la cure. Le BFUP peut être utilisé à la fois pour des besoins structuraux et pour améliorer la durabilité des infrastructures. Dans le premier cas, la caractérisation des propriétés mécaniques est à favoriser et dans le second, la caractérisation de la durabilité du matériau doit être évaluée.

Tel que présenté dans ce rapport, plusieurs essais sont disponibles pour la caractérisation du BFUP, autant pour les propriétés mécaniques que pour la durabilité. Les documents consultés et disponibles actuellement proposent généralement des essais sensiblement différents pour chacune des propriétés recherchées. Les limites à respecter pour classer le matériau comme un BFUP sont aussi très variables entre les différentes normes ou recommandations existantes et très récentes. Ces nombreuses différences illustrent l'importance d'une étude approfondie pour déterminer les essais pertinents et les limites à imposer au matériau selon son utilisation.

Les objectifs du projet de recherche étaient de (1) développer l'expertise au sein du MTQ pour caractériser le BFUP et rédiger des devis, (2) caractériser et d'identifier les méthodes d'essais pertinentes et les propriétés mécaniques des BFUPs, (3) caractériser et d'identifier les méthodes d'essais pertinentes et la durabilité au gel, si nécessaire, (4) caractériser et d'identifier les méthodes d'essais pertinentes et la durabilité relativement à la corrosion des fibres d'acier à l'intérieur du matériau et celle par rapport au renforcement (barres d'armature).

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

L'équipe du projet a mis en place un très grand éventail d'essais pour répondre à ces 4 objectifs, elle a tout d'abord déployé beaucoup d'énergie à réaliser une revue de la littérature complète sur les essais existants et les codes en vigueur pour l'utilisation du BFUP. Cette étape a été complétée avec le rapport R791.1 (4502-16-RD06) (Bouchard et al. 2018) remis et accepté en mai 2018. La deuxième étape a permis d'identifier la procédure la plus adéquate pour réaliser des essais de compression, de traction directe et de flexion par la construction de nouveaux bâtis pour réaliser ces essais en laboratoire. En parallèle, la durabilité a été évaluée aux travers principalement d'essais standard (gel-dégel, écaillage et la perméabilité aux ions chlorure) dont certains ont été adaptés aux conditions du BFUP.

Finalement tout au long de ce rapport et surtout dans les expériences acquises, il est possible de relever des commentaires pointus, des recommandations sur l'utilisation, la pertinence et la sensibilité des essais. Il est noté dans le premier objectif du rapport que le MTQ développera une expertise dans ce domaine, il est sans aucun doute très clair que notre équipe a développé grâce à ce projet de recherche une expertise riche pour étudier plus en profondeur ce matériau et comprendre les nouveaux défis pour implémenter correctement le BFUP dans la construction.

10. RÉFÉRENCES

- AASHTO. 1987. « Standard Method of Test for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars ».
- Abbas, S., et al. 2016. « Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges ». *International Journal of Concrete Structures and Materials* 10 (3): 271-95. <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0157-4>.
- ACI Committee 544. 2017. « ACI 544.pdf ». Report on Measuring Mechanical Properties of Hardened Fiber-Reinforced Concrete ACI 544.9R-17. American Concrete Institute.
- Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction. 2007. « Guide for the Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures.pdf ». CNR-DT 204/2007. Rome: National Research Council.
- AFGC, SETRA. 2013. « Bétons fibrés à ultra-hautes performances—Recommandations ». *AFGC, France*.
- AFNOR. 2016. « Bétons - Bétons fibrés à Ultra Hautes Performances - Spécification, performance, production et conformité ».
- Ahlborn, Theresa, Devin Harris, Donald Misson, et Erron Peuse. 2011. « Characterization of Strength and Durability of Ultra-High-Performance Concrete Under Variable Curing Conditions ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2251 (décembre): 68-75. <https://doi.org/10/fzqkpw>.
- Ahlborn, Theresa M., et al. 2008. « Ultra-High Performance Concrete for Michigan Bridges Material Performance - Phase 1 ». Final Report Research Report RC-1525. MTU.
- Aire, Carlos, Sergio Carmona, Antonio Aguado, et Climent Molins. 2015. « Double-Punch Test of Fiber-Reinforced Concrete: Effect of Specimen Origin and Size ». *ACI Materials Journal* 112 (2). <https://doi.org/10.14359/51687362>.
- ASTM. 1997. « Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading) ». ASTM International.
- ASTM. 2011. « Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens ». ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0496_C0496M-11.
- ASTM. 2012a. « Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading) ». ASTM International. https://doi.org/10.1520/C1609_C1609M-12.
- ASTM. 2012b. « Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel) ». ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C1550-12A>.
- ASTM. 2015. « Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete ». ASTM International. https://doi.org/10.1520/C1399_C1399M-10R15.
- ASTM. 2016. « Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete ». ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0457_C0457M-16.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

- ASTM. 2017a. « Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete ». ASTM International.
- ASTM. 2017b. « Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.pdf ». ASTM International.
- Berrocal, Carlos G., Karla Hornbostel, Mette R. Geiker, Ingemar Löfgren, Karin Lundgren, et Dimitrios G. Bekas. 2018. « Electrical Resistivity Measurements in Steel Fibre Reinforced Cementitious Materials ». *Cement and Concrete Composites* 89 (mai): 216-29. <https://doi.org/10/gg3w3g>.
- Blanco, Ana, Pablo Pujadas, Sergio Cavalaro, Albert de la Fuente, et Antonio Aguado. 2014. « Constitutive Model for Fibre Reinforced Concrete Based on the Barcelona Test ». *Cement and Concrete Composites* 53 (octobre): 327-40. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.017>.
- Bonneau Olivier, Lachemi Mohamed, Dallaire Eric, Dugat Jerome, and Aitcin Pierre-Claude. 1997. « Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes ». *Materials Journal* 94 (4). <https://doi.org/10/gffkqm>.
- Bouchard David, Turgeon-Mallette Vicky, Conciatori David, Sorelli Luca, Durand Vanessa, Encadrement de l'utilisation du béton fibré ultra-performant (BFUP) au ministère des transports, de la mobilité durable de l'électrification des transports (MTMDET) – Partie 1 : revue de la littérature sur la caractérisation des BFUP, Projet de recherche R791.1, Dossier 4502-16-RD06, 104 p., mai 2018.
- Canadian Standard Association. 2019. « Annex U Ultra-high performance concrete (UHPC), Concrete Design Handbook A23.3-19 ». CSA International, Toronto, Ontario, Canada.
- Canadian Standards Association. 2019a. « CSA A23.1:19 Annexe U ».
- Canadian Standards Association. 2019b. *CSA S6-19: Canadian Highway Bridge Design Code*.
- Charron, Jean-Philippe. 2003. « Contribution à l'étude du comportement au jeune âge des matériaux cimentaires en conditions de déformations libre et restreinte ». Thèse (Ph. D.), Université Laval. A1384361. Ariane. Accès via ProQuest <http://search.proquest.com/docview/305259083/abstract>.
- Charron, J.-P., E. Denarié, et E. Brühwiler. 2007. « Permeability of ultra high performance fiber reinforced concretes (UHPFRC) under high stresses ». *Materials and Structures* 40 (3): 269-77. <https://doi.org/10/c4963f>.
- Colombo, Matteo, Marco di Prisco, et Roberto Felicetti. 2010. « Mechanical Properties of Steel Fibre Reinforced Concrete Exposed at High Temperatures ». *Materials and Structures* 43 (4): 475-91. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9504-0>.
- Comite Europeen de Normalisation (CEN). 2007. « Test Method for Metallic Fibre Concrete—Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality (LOP), Residual) ».
- Conciatori, David. 2006. « Effet du microclimat sur l'initiation de la corrosion des aciers d'armature dans les ouvrages en béton armé ». Thèse de doctorat, Lausanne, Switzerland: École Polytechnique Fédérale de Lausanne. <http://infoscience.epfl.ch/record/56049>.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

- Conciatori, David, Étienne Grégoire, Éric Samson, Jacques Marchand, et Luc Chouinard. 2014. « Statistical analysis of concrete transport properties ». *Materials and structures* 47 (1-2): 89–103. <https://doi.org/10/f5r33z>.
- Denarié, Emmanuel, et Eugen Brühwiler. 2015. « Cast-on site UHPFRC for improvement of existing structures—achievements over the last 10 years in practice and research ». Dans *7th workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, 1-3, June 2015, Stuttgart, Germany*. http://infoscience.epfl.ch/record/215013/files/HPFRCC7_2015_ED_EB%20.pdf.
- Desjardins, Victor. 2017. « Connecteurs en cisaillement pour développer l'action composite dans les ponts aluminium/acier ». Laval.
- Fehling, Ekkehard, Michael Schmidt, Joost C. Walraven, Torsten Leutbecher, et Susanne Fröhlich, éd. 2014. *Ultra-High Performance Concrete UHPC: Fundamentals - Design - Examples*. BetonKalender. Berlin: Ernst & Sohn.
- Feldman, R.F. 1987. « Diffusion Measurements in Cement Paste by Water Replacement Using Propan-2-OL ». *Cement and Concrete Research* 17 (4): 602-12. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90133-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90133-5).
- German Society for Concrete, et and Construction Technology. 2001. « Steel Fibre Concrete ».
- Graybeal, Benjamin A. 2006. « Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete ». Final Report FHWA-HRT-06-103. US Transportation, Federal Highway Administration, <https://trid.trb.org/view.aspx?id=798080>.
- Graybeal, Benjamin A. 2014. « Compression Testing of Ultra-High-Performance Concrete ». *Advances in Civil Engineering Materials*, novembre, 20140027. <https://doi.org/10.1520/ACEM20140027>.
- Graybeal, Benjamin A., et Florent Baby. 2013. « Development of Direct Tension Test Method for Ultra-High- Performance Fiber-Reinforced Concrete ». *ACI Materials Journal* 110 (2). <https://doi.org/10.14359/51685532>.
- Graybeal, Benjamin A., et Henry G. Russell. 2013. « Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community ». Final Report FHWA-HRT-13-060. Office of Infrastructure Research & Development Federal Highway Administration.
- Graybeal, Benjamin Allen. 2005. « Characterization of the behavior of ultra-high performance concrete ». PhD Thesis.
- Graybeal, Benjamin, et Jussara Tanesi. 2007. « Durability of an ultrahigh-performance concrete ». *Journal of materials in civil engineering* 19 (10): 848–854.
- Habel, Katrin, Jean-Philippe Charron, Shadi Braike, R. Douglas Hooton, Paul Gauvreau, et Bruno Massicotte. 2008. « Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete Mix Design in Central Canada ». *Canadian Journal of Civil Engineering* 35 (2): 217-24. <https://doi.org/10/bthpsc>.
- Hafiz, Mohamed Abdul, Amir Hajiesmaeili, et Emmanuel Denarié. 2019. « Tensile response of low clinker UHPFRC subjected to fully restrained shrinkage ». *Cement and Concrete Research* 124: 105804.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

- Hajiesmaeili, Amir, et Emmanuel Denarié. 2018. « Next generation UHPFRC for sustainable structural applications ». Dans *DSCS 2018: 2nd International Workshop on Durability and Sustainability of Concrete Structures*.
- Helbling, A., et E. Brühwiler. 1987. « Eine neue Halterung für Zugversuche mit Beton-Probekörper ». *Material und Technik* 15: 103-7.
- Hornain, Hugues. 2007. *GranDuBé: grandeurs associées à la durabilité des bétons*. Presses des Ponts.
- Hubert, Maxime, Clélia Desmettre, et Jean-Philippe Charron. 2015. « Influence of Fiber Content and Reinforcement Ratio on the Water Permeability of Reinforced Concrete ». *Materials and Structures* 48 (9): 2795–2807. <https://doi.org/10/gdvntb>.
- Jang, Seung Yup, Bo Sung Kim, et Byung Hwan Oh. 2011. « Effect of crack width on chloride diffusion coefficients of concrete by steady-state migration tests ». *Cement and Concrete Research* 41 (1): 9–19. <https://doi.org/10/bkts2k>.
- Japan Concrete Institute. 1984. « Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete ».
- Japan Society of Civil Engineers. 2008. « Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC) ».
- Kusumawardaningsih, Yuliarti, et al. 2015. « UHPC Compressive Strength Test Specimens: Cylinder or Cube? » *Procedia Engineering* 125: 1076-80. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.165>.
- Larrard, François de, et Thierry Sedran. 1994. « Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model ». *Cement and Concrete Research* 24 (6): 997–1009. <https://doi.org/10/czwwbv>.
- Lee, Ming-Gin, C-T Chiu, et Y-C Wang. 2005. « The Study of Bond Strength and Bond Durability of Reactive Powder Concrete ». *Journal of ASTM International*, juillet 2005.
- Löfgren, Ingemar, Henrik Stang, et John Forbes Olesen. 2004. « Wedge splitting test-a test to determine fracture properties of FRC ». Dans *Fibre-Reinforced Concretes-BEFIB 2004-Proceedings of the Sixth RILEM symposium/di Prisco, M., Felicetti, R., Plizzari, GA*, 1:379–388. Rilem publications.
- López, Juan Ángel, Pedro Serna, Juan Navarro-Gregori, et Hugo Coll. 2016a. « A simplified five-point inverse analysis method to determine the tensile properties of UHPFRC from unnotched four-point bending tests ». *Composites Part B: Engineering* 91 (avril): 189-204 <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.01.026>.
- Luping, Tang, et Lars-Olof Nilsson. 1993. « Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electric field ». *Materials Journal* 89 (1): 49–53.
- Lura, Pietro, Ole Mejlhede Jensen, et Klaas van Breugel. 2003. « Autogenous Shrinkage in High-Performance Cement Paste: An Evaluation of Basic Mechanisms ». *Cement and Concrete Research* 33 (2): 223-32. <https://doi.org/10/bhn568>.
- Mai-Nhu, Jonathan. 2013. « Corrosion des armatures du béton: couplage carbonatation-chlorures en présence de cycles hydriques ». PhD Thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

- Marcos-Meson, Victor, Alexander Michel, Anders Solgaard, Gregor Fischer, Carola Edvardsen, et Torben Lund Skovhus. 2018. « Corrosion Resistance of Steel Fibre Reinforced Concrete - A Literature Review ». *Cement and Concrete Research* 103 (janvier): 1-20. <https://doi.org/10/gcw6dr>.
- Marsavina, L., Katrien Audenaert, Geert De Schutter, N. Faur, et D. Marsavina. 2009. « Experimental and numerical determination of the chloride penetration in cracked concrete ». *Construction and Building Materials* 23 (1): 264–274. <https://doi.org/10/dk8vvp>.
- « MATLAB Documentation ». s. d. Consulté le 5 novembre 2018. <https://www.mathworks.com/help/>.
- Molins, Climent, Antonio Aguado, et Sergio Saludes. 2009. « Double Punch Test to Control the Energy Dissipation in Tension of FRC (Barcelona Test) ». *Materials and Structures* 42 (4): 415-25. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9391-9>.
- Naaman, Antoine E, et Kay Wille. 2012. « The path to ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC): five decades of progress ». Dans , 3-13.
- Nadarajah Gowripalan, et Ian R Gilbert. 2000. « Design Guidelines for Ductal Prestressed Concrete Beams ». Australie: School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales.
- Osterlee Cornelius. 2010. Structural Response of Reinforced UHPFRC and RC Composite Members, thesis nr. 4848, Swiss Federal of Technology, Lausanne, Switzerland.
- Piérard, Julie, Bram Dooms, et Niki Cauberg. 2012. « Evaluation of durability parameters of UHPC using accelerated lab tests ». Dans *Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, Germany*, 371–376.
- Piotrowski, Siemon, et M. Schmidt. 2012. « Life cycle cost analysis of a UHPC-bridge on example of two bridge refurbishment designs ». Dans *Proceedings of the 3rd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, 957-64. Kassel, Germany: Kassel University Press.
- Prisco, Marco di, Liberato Ferrara, et Marco G. L. Lamperti. 2013. « Double Edge Wedge Splitting (DEWS): An Indirect Tension Test to Identify Post-Cracking Behaviour of Fibre Reinforced Cementitious Composites ». *Materials and Structures* 46 (11): 1893-1918. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0028-2>.
- Provete Vincler, Juliano, Thomas Sanchez, Behzad Majidi, Luca Sorelli, et David Conciatori. 2020. « Investigation on the Limitations of Accelerated Migration Tests applied to UHPFRC with Steel Fibers ». *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Provete Vincler, Juliano, Thomas Sanchez, Vicky Turgeon, David Conciatori, et Luca Sorelli. 2019. « A Modified Accelerated Chloride Migration Tests for UHPC and UHPFRC with PVA and Steel Fibers ». *Cement and Concrete Research* 117 (mars): 38-44. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.12.006>.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

- Pujadas, P., A. Blanco, S. H. P. Cavalaro, A. de la Fuente, et A. Aguado. 2016. « Multidirectional Double Punch Test To Assess The Post-Cracking Behaviour Of FRC ».
- Resplendino, Jacques. 2006. « Les Bétons Fibrés Ultra Performants - (BFUP) - Perspectives offertes vis-à-vis de la pérennité et la maintenance des ouvrages ». Toulouse, octobre 18.
- RILEM. 2000. « Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete: TC 162-TDF ». *Materials and Structures*, 2000, V. 33, No. 1 édition.
- RILEM. 2001. « Uniaxial Tension Test for Steel Fibre Reinforced Concrete ». *Materials and Structures*, 2001, V. 34, No. 1 édition.
- Samson, E., J. Marchand, P. Henocq, et P. Beauséjour. 2008. « Recent advances in the determination of ionic diffusion using migration test results ». Dans *International RILEM Symposium on Concrete Modelling-ConMod'08*, 65–78. RILEM Publications SARL.
- Schmidt, Michael, et Susanne Fröhlich. 2015. « UHPC From Research to Standardization: European Approaches ». *Advances in Civil Engineering Materials* 4 (2): 20140032. <https://doi.org/10.1520/ACEM20140032>.
- Schmidt, Michael, Torsten Leutbecher, Siemon Piotrowski, et Udo Wiens. 2017. « The German Guideline for Ultra-High Performance Concrete ». Dans . Montpellier.
- Sharif, A., K.F. Loughlin, A.K. Azad, et C.M. Navaz. 1997. « Determination of the Effective Chloride Diffusion Coefficient in Concrete via a Gas Diffusion Technique ». *ACI Materials Journal* 94 (3): 227-33.
- Shen, Xiujiang, et Eugen Brühwiler. 2020. « Influence of local fiber distribution on tensile behavior of strain hardening UHPFRC using NDT and DIC ». *Cement and Concrete Research* 132: 106042.
- SIA. 2016. « SIA 2052 Béton fibré ultra-performant (BFUP) - Matériaux, dimensionnement et exécution ». Suisse: SIA.
- Solgaard, A.O.S., M. Carsana, M.R. Geiker, A. Küter, et L. Bertolini. 2013. « Experimental Observations of Stray Current Effects on Steel Fibres Embedded in Mortar ». *Corrosion Science* 74 (septembre): 1-12. <https://doi.org/10/gg3w3h>.
- Sorelli, Luca, Georgios Constantinides, Franz-Josef Ulm, et François Toutlemonde. 2008. « The Nano-Mechanical Signature of Ultra High Performance Concrete by Statistical Nanoindentation Techniques ». *Cement and Concrete Research* 38 (12): 1447-56. <https://doi.org/10/bjcm88>.
- Sritharan, Sri. 2015. « Design of UHPC Structural Members: Lessons Learned and ASTM Test Requirements ». *Advances in Civil Engineering Materials*, avril, 20140042. <https://doi.org/10.1520/ACEM20140042>.
- Stanish, K. D., et al. 2000. *Testing the chloride penetration resistance of concrete: a literature review*. Department of Civil Engineering, University of Toronto Toronto, Ontario, Canada.
- Stefan, Lavinia. 2009. « Étude expérimentale et modélisation de l'évolution des propriétés mécaniques au jeune âge dans les matériaux cimentaires ». École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00624989>.

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

- Stengel, Thorsten, et Peter Schießl. 2008. « Sustainable construction with UHPC—from life cycle inventory data collection to environmental impact assessment ». Dans *Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 461-68. Kassel, Germany: Kassel University Press.
- Stephen Foster. 2017. « FRC design according to the draft Australian bridge code ». *ACI Symposium Publication 310* (mars).
- Tanaka, Y, H Musha, S Tanaka, et M Ishida. 2010. « Durability Performance of UFC Sakata-Mira Footbridge under Sea Environment », 7.
- Tang, L., et L.-O. Nilsson. 1992. « Chloride Diffusivity in High Strength Concrete ». *Nordic Concrete Research Vol. 11*, 1992.
- Teichmann, Thomas, et Michael Schmidt. 2004. « Influence of the packing density of fine particles on structure, strength and durability of UHPC ». Dans *International symposium on ultra high performance concrete*, 313–323.
- Thomas, Michael, B. Green, E. O'Neal, V. Perry, S. Hayman, et A. Hossack. 2012. « Marine performance of UHPC at Treat Island ». Dans *Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, 365–370.
- Truc, O., J. P. Ollivier, et M. Carcassès. 2000. « A new way for determining the chloride diffusion coefficient in concrete from steady state migration test ». *Cement and Concrete Research* 30 (2): 217-26. <https://doi.org/10/cs546q>.
- Turgeon-Malette, V., M.C. Teguedy, Thomas Sanchez, David Conciatori, et Luca Sorelli. 2020. « Towards chloride ion permeability evaluation of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete under maintained loading conditions ».
- Wittmann, Folker H, X Yao, P Wang, P Zhang, et T Zhao. 2015. « Influence of an imposed tensile stress and subsequent self-healing on capillary absorption and chloride penetration into HPFRCC ». Dans , 251-58.
- Xie, T., C. Fang, MS Mohamad Ali, et P. Visintin. 2018. « Characterizations of autogenous and drying shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC): An experimental study ». *Cement and Concrete Composites* 91: 156-73.

La norme NF EN 12390-3 n'est pas incluse dans ce présent rapport.

Tableau 50 Description des normes de référence pour les essais en compression

Norme	ASTM C39	ASTM C109
Nombre d'échantillons	N.S	Au moins 2 échantillons
Dimensions (mm)	N.S.	Cube arêtes de 50
Préparations supplémentaires	Rectification des surfaces supérieures et inférieures jusqu'à une déviation maximale permise de 0,5° par rapport à l'axe perpendiculaire du cylindre.	N.S
Cure	Suivi de la cure humide selon la norme ASTM C192. Nombre de jours prescrits au Tableau 51	Cure par submersion dans de l'eau de chaux saturée, selon le nombre de jours prescrits au Tableau 52
Procédure	<ol style="list-style-type: none"> 1. Prendre la masse de l'échantillon, et arrondir cette dernière à 0,1 g. 2. Mesurer les différentes dimensions de l'échantillon, et arrondir à 0,1 mm. 3. Placer et centrer l'échantillon sur le bloc d'appui inférieur de la presse. 4. Effectuer l'essai de compression en appliquant la charge à un taux constant, selon la vitesse prescrite. 5. Poursuivre l'essai de compression jusqu'à l'obtention d'une baisse de la charge, après l'atteinte de la charge maximale. 6. Arrêter l'essai. 7. Noter le type de rupture obtenue, selon la classification proposée à la <p align="center">8. Figure 71</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Prendre la masse de l'échantillon, et arrondir cette dernière à 0,1 g. 2. Mesurer les différentes dimensions de l'échantillon, et arrondir à 0,1 mm. 3. Placer l'échantillon sur le bloc d'appui inférieur de la presse. 4. Centrer l'échantillon sur l'axe de la presse, entre les blocs d'appuis inférieurs et supérieurs. 5. Effectuer l'essai de compression en appliquant la charge à un taux constant, entre 0,9 et 1,8 kN/s. 6. Poursuivre l'essai de compression jusqu'à l'obtention d'une baisse de la charge, après l'atteinte de la charge maximale. 7. Arrêter l'essai.

Source: ASTM C39 (2016), ASTM C109 (2016)

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

Tableau 51 Âge de l'échantillon au moment de l'essai de compression et tolérance admissible pour l'essai ASTM C39

Âge de l'échantillon à l'essai	Tolérance
24h	± 0,5h
3 jours	± 2h
7 jours	± 6h
28 jours	± 20h
90 jours	± 48h

Source: ASTM C39 (2016)

Tableau 52 Âge de l'échantillon au moment de l'essai de compression et tolérance admissible pour l'essai ASTM C109

Âge de l'échantillon à l'essai	Tolérance
24h	± 0,5h
3 jours	± 1h
7 jours	± 3h
28 jours	± 12h

Source: ASTM C109 (2016)

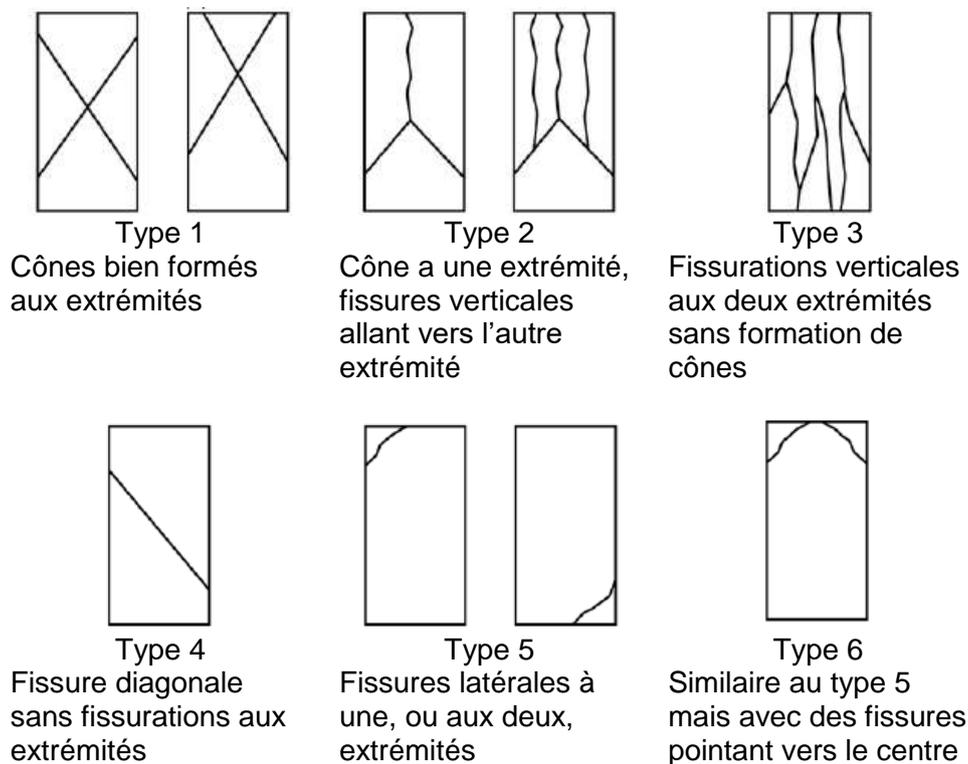


Figure 71 Patrons de fissuration à noter pour l'essai de compression fait selon la norme ASTM C39

Source : ASTM C39 (2016)

La norme NF EN 12390-13 n'est pas incluse dans ce présent rapport.

Tableau 53 Description des normes de référence pour les essais de module élastique

Norme	ASTM C469
Nombre d'échantillons	N.S
Dimensions (mm)	N.S
Préparations supplémentaires	Préparer les surfaces d'extrémité selon les directives de la norme ASTM C39
Cure	N.S
Durée de l'essai	N.S
Procédure	<ol style="list-style-type: none"> 1. Déterminer préalablement la résistance en compression du matériau en procédant à l'essai de compression ASTM C39 avec 2 échantillons. 2. Installer la cage de module sur l'échantillon, et le placer sur le plateau inférieur de la presse, comme pour un essai de compression. 3. Procéder à 3 cycles de charge-décharge, en respectant les indications suivantes : <ol style="list-style-type: none"> a. Ne pas considérer les résultats du premier cycle. b. Procéder à l'essai avec un taux constant de 0,25 MPa/s. c. Charger l'échantillon jusqu'à une valeur équivalent à 40% de la charge maximale moyenne déterminée à l'étape 1 d. Décharger complètement l'échantillon à la fin de l'essai 4. Après l'essai de module et avoir enlevé la cage, l'échantillon peut être utilisé pour un essai de compression (si nécessaire).

Source : ASTM C469 (2014)

Les normes NF EN 12350-5 et NF EN 12350-8 ne sont pas incluses dans ce présent rapport.

Tableau 54 Description des normes de référence pour les essais d'étalement

Norme	ASTM C1437	ASTM C143
Cure	Essais à l'état frais	Essais à l'état frais
Durée de l'essai	1:30 minute	2:30 minute
Procédure	<ol style="list-style-type: none"> 1. Nettoyer et assécher attentivement la surface de la table d'étalement. 2. Placer une couche de mortier d'environ 25 mm d'épaisseur dans le moule. 3. Frapper 20x sur le moule avec la tige afin d'obtenir un remplissage uniforme. 4. Finir le remplissage du moule et répéter les vibrations avec la tige. 5. Araser la surface supérieure avec la truelle d'acier, à égalité avec le rebord supérieur du moule. 6. Retirer le moule une minute après le début du remplissage. 7. Lever et faire tomber la table d'étalement 25x en 15 secondes après la levée du moule. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Nettoyer et assécher attentivement la surface qui servira au test d'étalement. 2. Remplir le moule en trois couches de volume approximativement égal, en le maintenant bien en place. 3. Enfoncer chacune des couches 25x avec la tige; pour les couches supérieures, la tige devrait pénétrer de 25 mm dans la couche directement inférieure. 4. Araser la surface supérieure avec la truelle d'acier, à égalité avec le rebord supérieur du moule. 5. Lever le moule d'une hauteur de 300 mm en 5 secondes (\pm 2 sec.) d'un mouvement continu. 6. Mesurer immédiatement le diamètre de la couche de béton.

Source : ASTM C1437 (2015), ASTM C143 (2015)

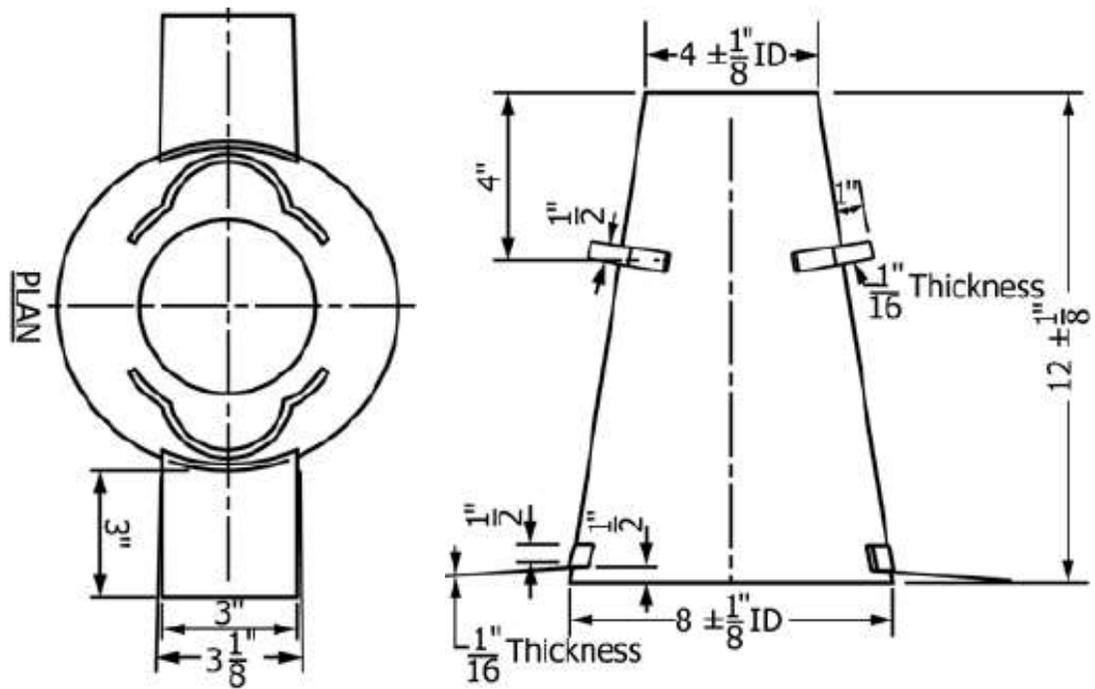


Figure 72 Moule standard utilisé pour l'essai d'étalement de béton frais, selon la norme ASTM C143
 Source : ASTM C143 (2015)

Tableau 55 Description des normes de référence pour les essais de retrait

Norme	ASTM C157	ASTM C341
Nombre d'échantillons	6	N.S.
Dimensions (mm)	Prisme: b = l = 25 (pour mortier) ou b = l = 75 (pour béton) L = 285	N.S.
Cure	Démoulage après 23h suivant la mise en place. 27 jours de cure dans de l'eau de chaux saturée à 23 ± 2°C.	Cure dans de l'eau de chaux saturée à 23 ± 2°C (durée variable selon l'atteinte du conditionnement).
Durée de l'essai	68 semaines au total (4 semaines de cure, 64 semaines d'essai)	Variable
Procédure	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mesurer la longueur de l'échantillon immédiatement après la fin de la cure, et arrondir à 0,1 mm. 2. Submerger l'échantillon dans un contenant rempli d'eau de chaux saturée pendant 30 minutes. 3. Sortir l'échantillon et sécher les surfaces externes. 4. Mesurer la longueur initiale de l'échantillon, et arrondir à 0,1 mm. 5. Déterminer le retrait en mesurant l'échantillon ainsi : <ol style="list-style-type: none"> 5.1. Pour un essai dans l'eau saturée, mesurer la longueur de l'échantillon après 8, 16, 32 et 64 semaines après le début du test. 5.2. Pour un essai dans l'air ambiant à une humidité relative de 50%, mesurer la longueur de l'échantillon après 4, 7, 14 et 28 jours, de même qu'après 8, 16, 32 et 64 semaines. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Déterminer la fin du conditionnement de la cure à l'eau de chaux en mesurant l'échantillon de la façon suivante, à des intervalles de 7 jours : <ol style="list-style-type: none"> 1.1. Sortir l'échantillon de l'eau et essuyer les surfaces. 1.2. Mesurer la longueur de l'échantillon, et arrondir à 0,1 mm. 2. Répéter le processus décrit à l'étape précédente jusqu'à ce que 2 mesures consécutives présentent une différence de moins de 0,001%. 3. Déterminer le retrait en prenant mesurant l'échantillon de la façon suivante : <ol style="list-style-type: none"> 3.1. Pour un essai dans l'eau saturée, mesurer la longueur de l'échantillon après 1, 2, 4, 8, 16, 32 et 64 semaines après le début du test. 3.2. Pour un essai dans l'air ambiant à une humidité relative de 50%, mesurer la longueur de l'échantillon à tous les 7 jours, jusqu'à ce que 2 mesures consécutives présentent une différence de moins de 0,001%.

Source : ASTM C157 (2014), ASTM C341 (2013)

Tableau 56 Description des normes de référence pour les essais de fluage

Norme	ASTM C512
Nombre d'échantillons	6, testés selon la disposition suivante : 2 échantillons testés en compression pour obtenir la résistance maximale en compression 2 échantillons utilisés pour le test de fluage, 2 échantillons témoins non chargés Préférentiellement, utiliser 3 cylindres par tests (donc 9 au total)
Dimensions (mm)	Cylindre : $\phi = 150$ $290 < L < 300$
Préparation supplémentaires	Préparation des surfaces d'extrémité des cylindres identique à celle exigée pour les essais de compression présentés à la norme ASTM C39.
Cure	Démoulage entre 20 et 48h suivant la mise en place. Mise de l'échantillon en chambre humide, à une température de 23°C, jusqu'à 7 jours. Mise de l'échantillon dans une chambre environnementale à 23°C et 50% d'humidité relative jusqu'à la fin du test.
Durée de l'essai	Début du test à 28 jours (recommandé). Pour une caractérisation complète du fluage du matériau, début des essais après 2, 7, 28, 90 et 365 jours. La charge est maintenue sur les échantillons pendant 1 an.
Procédure	1. Mesurer les différentes dimensions de l'échantillon, et arrondir à 0,1 mm. 2. Tester les cylindres en compression immédiatement avant le début des tests de fluage, suivant la norme ASTM C39. 3. Installer les cylindres servant au test de fluage dans l'appareil de charge. 4. Prendre les mesures des déformations initiales des échantillons placés dans l'appareil de fluage. 5. Charger les cylindres jusqu'à une charge correspondant à 40% de la charge maximale en compression. 6. Prendre les mesures des déformations immédiatement après le chargement initial. 7. Prendre les mesures des déformations entre 2 et 6 h après le chargement. Puis, prendre les mesures 1 fois par jour pendant 7 jours, 1 fois par semaine pendant 1 mois, et 1 fois par mois pendant 1 an.

Source : ASTM C512 (2015)

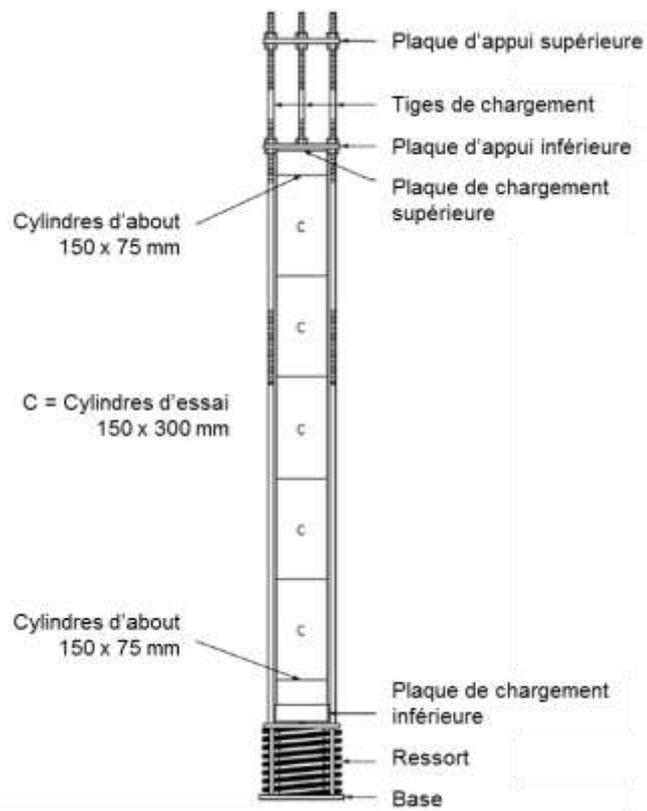


Figure 73 Disposition de l'essai de fluage, selon la norme ASTM C512
Source : ASTM C512 (2015)

Annexe 6
Absorption

Tableau 57 Description des normes de référence pour les essais d'absorption

Norme	ASTM C1585	CSA A23.2-11C
Nombre d'échantillons	2	N.S.
Dimensions (mm)	Cylindre: $\phi = 100$ $b = 50$	Toutes dimensions acceptables, volume minimal de 350 cm ³
Préparations supplémentaires	Préparation des échantillons par prélèvements sur des cylindres parents moulés (en excluant les premiers mm supérieurs et en utilisant la portion supérieure du cylindre, utiliser la même section des cylindres pour chacun des échantillons).	N.A.
Cure	Placer l'échantillon dans une chambre environnementale à 50 ± 2°C à 80 ± 3% d'humidité relative pendant 3 jours (ou encore dans un dessiccateur à 50 ± 2°C pendant 3 jours). Placer chaque échantillon dans un contenant individuel scellé, en assurant un contact minimal entre l'échantillon et les parois du contenant. Entreposer les contenants scellés à une température de 23 ± 2°C pendant au moins 15 jours avant le début de l'essai.	28 jours de cure
Durée de l'essai	Jusqu'à 9 jours après la cure	Environ 35 jours
Procédure	<ol style="list-style-type: none"> 1. Retirer l'échantillon du contenant hermétique. 2. Prendre la masse de l'échantillon, et arrondir cette dernière à 0,001 g. 3. Mesurer le diamètre de la surface exposée à l'eau de l'échantillon à 4 reprises, et arrondir à 0,1 mm. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Prendre la masse de l'échantillon à la fin de la période de cure, et arrondir cette dernière à 0,001 g. 2. Déterminer la masse séchée à l'air de la façon suivante : <ol style="list-style-type: none"> 2.1. Conditionner l'échantillon dans une chambre avec une humidité relative comprise entre 45 et 55% pendant 28 jours.

	<ol style="list-style-type: none"> 4. Sceller la surface latérale du cylindre, de même que l'extrémité qui ne sera pas en contact avec l'eau. 5. Prendre la masse de l'échantillon avec le scellant en place, et arrondir cette dernière à 0,001 g. 6. Placer l'échantillon dans le contenant rempli d'eau, sur les supports, et démarrer le chronomètre dès que la surface exposée de l'échantillon touche l'eau. L'eau devrait dépasser de quelques millimètres la surface exposée. 7. Mesurer l'absorption aux différents temps indiqués au Tableau 58, de la façon suivante : <ol style="list-style-type: none"> 7.1. Sortir l'échantillon du contenant d'eau. 7.2. Essuyer la surface exposée à l'eau. 7.3. Prendre la masse de l'échantillon, et arrondir cette dernière à 0,001 g. La masse doit être prise dans les 15 secondes suivant le retrait de l'échantillon du contenant. 7.4. Remettre l'échantillon dans le contenant en assurant le contact de la surface exposée avec l'eau. S'assurer que le niveau d'eau soit suffisant tout au long de l'essai. 8. Poursuivre l'essai d'absorption jusqu'à la dernière prise de mesure, indiquée au Tableau 58. 	<ol style="list-style-type: none"> 2.2. Prendre la masse de l'échantillon à la fin de la période de cure, et arrondir cette dernière à 0,001 g. 2.3. Reprendre la masse de l'échantillon à des périodes de 7 jours, jusqu'à ce que deux masses successives ne présentent pas une différence de plus de 0,5%. 3. Déterminer la masse séchée au four de la façon suivante : <ol style="list-style-type: none"> 3.1. Faire sécher l'échantillon à l'étuve à une température de 110 ± 5 °C pendant au moins 48h. 3.2. Refroidir l'échantillon dans un environnement sec ($50 \pm 5\%$ HR) jusqu'à l'atteinte d'une température de 23 ± 2 °C. 3.3. Prendre la masse de l'échantillon séché et refroidi, et arrondir cette dernière à 0,001 g. 3.4. Remettre l'échantillon à l'étuve et faire sécher pendant au moins 24h. 3.5. Répéter les étapes 3.2 et 3.3. Si la différence entre les deux valeurs successives de pesée est supérieure à 0,5% de la plus petite masse, répéter les étapes 3.1 à 3.3 jusqu'à l'atteinte du critère de 0,5%. 3.6. Répéter les étapes 4. Déterminer la masse pesée après submersion de la façon suivante : <ol style="list-style-type: none"> 4.1. Submerger l'échantillon dans de l'eau à une température de 23 ± 2 °C pendant au moins 24h. 4.2. Retirer l'échantillon de l'eau. 4.3. Sécher les surfaces extérieures de l'échantillon. 4.4. Prendre la masse de l'échantillon après la période de submersion, et arrondir cette dernière à 0,001 g. 5. Déterminer la masse après ébullition de la façon suivante : <ol style="list-style-type: none"> 5.1. Submerger l'échantillon dans de l'eau et porter à ébullition pendant au moins 5h. 5.2. Refroidir l'échantillon pendant au moins 14 h jusqu'à l'atteinte d'une température de 23 ± 2 °C.
--	--	---

		<p>5.3. Retirer l'échantillon de l'eau.</p> <p>5.4. Sécher les surfaces extérieures de l'échantillon.</p> <p>5.5. Prendre la masse de l'échantillon après la période de submersion, et arrondir cette dernière à 0,001 g.</p> <p>6. Déterminer la masse hydrostatique après ébullition de la façon suivante :</p> <p>6.1. Suspendre l'échantillon dans un contenant rempli d'eau à $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$.</p> <p>6.2. Prendre la masse hydrostatique de l'échantillon, et arrondir cette dernière à 0,001 g.</p>
--	--	--

Source : ASTM C1585 (2013), CSA A23.2-11C

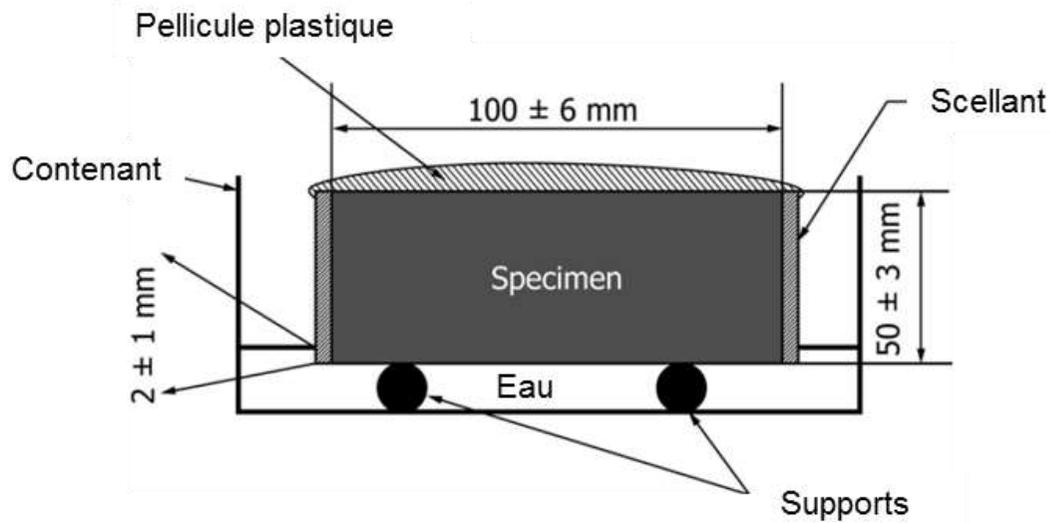


Figure 74 Disposition de l'essai d'absorption, selon la norme ASTM C1585
Source : ASTM C1585 (2013)

Tableau 58 Périodes de mesure pour l'essai d'absorption, et tolérance possible

Temps	60 s.	5 min.	10 min.	20 min.	30 min.	60 min.	Chaque heure, jusqu'à 6h	Chaque jour, jusqu'à 3 jours	Jour 4 - 7, 3 mesures par tranche de 24h	Jour 7 au jour 9, 1 mesure
±	2 s.	10 s.	2 min.	2 min.	2 min.	2 min.	5 min.	2h	2h	2h

Source : ASTM C1585 (2013)

Tableau 59 Description des normes de référence pour les essais d'écaillage

Norme	ASTM C672	BNQ 2621-905
Nombre d'échantillons	2	2
Dimensions (mm)	Dalle prismatique: $b > 75$ $A_{exp.} \geq 450 \text{ cm}^2$	Dalle prismatique ou circulaire: $75 < b < 90$ $A_{exp.} \geq 500 \text{ cm}^2$
Préparations supplémentaires	Arasement de la surface à la règle de bois, sans faire une finition excessive de la surface Mise en place du cadre d'étanchéité avant la fin de la cure humide, soit directement sur le béton frais, soit à l'aide d'une colle après le durcissement initial Vibration externe par coups répétés (selon la norme ASTM C1856) permise pour combler les vides de surface	Arasement de la surface à la règle de bois, sans faire une finition excessive de la surface Mise en place du cadre d'étanchéité avant la fin de la cure Vibration externe par coups répétés (selon la norme ASTM C1856) permise pour combler les vides de surface
Cure	Protection par pellicule plastique (pendant les 24 premières heures), en évitant le plus possible un contact entre la surface et la pellicule Démoulage entre 20 et 24h suivant la mise en place Mise de l'échantillon en chambre humide, à une température de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, jusqu'au 14 ^e jour Mise de l'échantillon à l'air ambiant, à une température de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative variant entre 45 et 55%, jusqu'au 28 ^e jour	Protection par pellicule plastique (pendant les 24 premières heures), en évitant le plus possible un contact entre la surface et la pellicule Démoulage entre 20 et 28h suivant la mise en place Mise de l'échantillon en chambre humide, à une température de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, jusqu'au 14 ^e jour Mise de l'échantillon à l'air ambiant, à une température de 15°C et 30°C et une humidité relative de $50 \pm 20\%$
Durée de l'essai	Variable, au moins 78 jours (28 jours de cure et 50 cycles d'écaillage de 24h).	91 jours (28 jours de cure, 7 jours de traitement initial et 56 cycles d'écaillage de 24h).
Procédure	1. Mettre la solution saline sur la surface supérieure de l'échantillon, d'une épaisseur approximative de 6 mm.	1. Mesurer les différentes dimensions de la surface supérieure exposée de l'échantillon, et arrondir à 0,1 mm. 2. Déterminer l'aire exposée et exprimer cette dernière en mm^2 .

	<ol style="list-style-type: none"> 2. Mettre l'échantillon dans l'appareil de gel-dégel, et débiter les cycles de gel-dégel de 24h en respectant les conditions suivantes : 16 à 18h de gel à -18°C suivi de 6 à 8h de dégel à une température de 23°C. 3. Ajouter de la solution lorsque nécessaire pour compenser l'évaporation. 4. Jeter la solution, rincer la surface de l'échantillon et mettre une nouvelle solution en place à chaque intervalle de 5 jours. 5. Noter qualitativement l'état de la surface de l'échantillon, selon l'échelle qualitative, lors du changement de la solution saline. 6. Poursuivre l'essai d'écaillage pendant au moins 50 cycles. 7. Noter qualitativement l'état final de la surface de l'échantillon, et arrêter l'essai. 	<ol style="list-style-type: none"> 3. Mettre la solution saline sur la surface supérieure de l'échantillon, d'une épaisseur de 5 ± 2 mm. 4. Mettre l'échantillon à température ambiante pendant 7 jours et recouvrir l'échantillon afin de prévenir l'évaporation de la solution. 5. Mettre l'échantillon dans l'appareil de gel-dégel après la période de conditionnement de 7 jours, et débiter les cycles de gel-dégel de 24h. S'assurer que l'échantillon soit recouvert d'une pellicule plastique afin de prévenir l'évaporation de la solution saline. 6. Mesurer l'écaillage après 7, 21, 35 et 56 cycles de la façon suivante : <ol style="list-style-type: none"> 6.1. Rincer la surface de l'échantillon avec une nouvelle solution saline. 6.2. Laver les débris obtenus à l'eau distillée dans un filtre de $80 \mu\text{m}$. 6.3. Sécher les débris obtenus à l'étuve jusqu'à masse constante. 6.4. Prendre la masse des débris, et arrondir cette dernière à 0,1 g. 6.5. Exprimer le résultat en kg/m^2 de surface exposée. 7. Noter qualitativement l'état final de la surface de l'échantillon, et arrêter l'essai après le 56^e cycle réalisé.
--	---	--

Source : ASTM C672 (2012), BNQ 2621-905 (2012)

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

**Tableau 60 Cote subjective de l'état de la surface pour
l'essai d'écaillage, selon la norme ASTM C672**

Cotation subjective	Condition à la surface de l'échantillon
0	Aucun écaillage
1	Écaillage très léger, profondeur maximale de 3 mm
2	Écaillage léger à moyen
3	Écaillage moyen, avec certains gros granulats visibles
4	Écaillage moyen à sévère
5	Écaillage sévère, avec certains gros granulats entièrement visible

Source : ASTM C672 (2012)

**Tableau 61 Cote subjective de l'état de la surface pour
l'essai d'écaillage, selon le BNQ**

Cote	Caractéristique de la surface écaillée
0	Aucun écaillage important observé.
1-A	Écaillage très léger du mortier de surface avec absence de cratères (popouts).
1-B	Écaillage important du mortier de surface avec absence de cratères (popouts).
2-A	Aucun écaillage important du mortier de surface, mais présence de quelques cratères (popouts).
2-B	Aucun écaillage important du mortier de surface, mais présence de plusieurs cratères (popouts).
3	Combinaison du mortier de surface écaillée principalement avec de gros granulats éclatés.
4	Combinaison de gros granulats éclatés principalement avec du mortier de surface écaillée.

Source : BNQ 2621-905 (2012)

Tableau 62 Description des normes de référence pour les essais de gel-dégel

Norme	ASTM C666
Dimensions (mm)	Cylindre: $75 < \phi < 125$ $274 < L < 405$ Prisme: $75 < b < 125$ $75 < l < 125$ $274 < L < 405$
Cure	14 jours de cure dans une solution saturée d'eau de chaux
Procédure	<ol style="list-style-type: none"> 1. Prendre la masse de l'échantillon, et arrondir cette dernière à 0,1 g. La mesure se fait entre -1°C et +2°C de la température de dégel. 2. Mesurer les différentes dimensions de l'échantillon, et arrondir à 0,1 mm. Les mesures se font entre -1°C et +2°C de la température de dégel. 3. Effectuer le test du module dynamique pour déterminer la première fréquence fondamentale transverse. 4. Placer l'échantillon dans l'appareil de gel-dégel, et débiter les cycles d'essai en commençant avec la phase de dégel. 5. Répéter les étapes 1 à 3 à des intervalles de dépassant pas 36 cycles consécutifs, pendant la phase de dégel du cycle de gel-dégel. 6. Poursuivre l'essai de gel-dégel pendant 300 cycles, ou à l'atteinte d'un module élastique dynamique relatif inférieur à 60% du module initial.

Source : ASTM C666 (2015)

La norme NF EN 12892-3 n'est pas incluse dans ce présent rapport.

Tableau 63 Description des normes de référence pour les essais d'abrasion

Norme	ASTM C944
Dimensions	La surface exposée doit permettre l'application complète de la charge d'abrasion en trois endroits non chevauchants. La surface de contact doit être lisse.
Durée de l'essai	2 minutes
Procédure	<ol style="list-style-type: none"> 1. Prendre la masse de l'échantillon, et arrondir cette dernière à 0,1 g. 2. Mettre l'échantillon sur le plateau de l'appareil d'abrasion, et s'assurer qu'il y soit solidement fixé pour empêcher tout mouvement lors de l'essai d'abrasion. 3. Abaisser la tête d'abrasion et appliquer la charge d'abrasion pendant 2 minutes, en utilisant la force de contact prescrite. 4. Relever la tête d'abrasion et arrêter l'appareil. 5. Nettoyer la surface abrasée et enlever les débris se trouvant à la surface. 6. Prendre la masse de l'échantillon, et arrondir cette dernière à 0,1 g. 7. Répéter les étapes 3 à 6 à deux occasions, en utilisant à chaque fois une nouvelle section de l'échantillon. 8. Arrêter l'essai après 3 abrasions.

Source : ASTM C944 (2012)

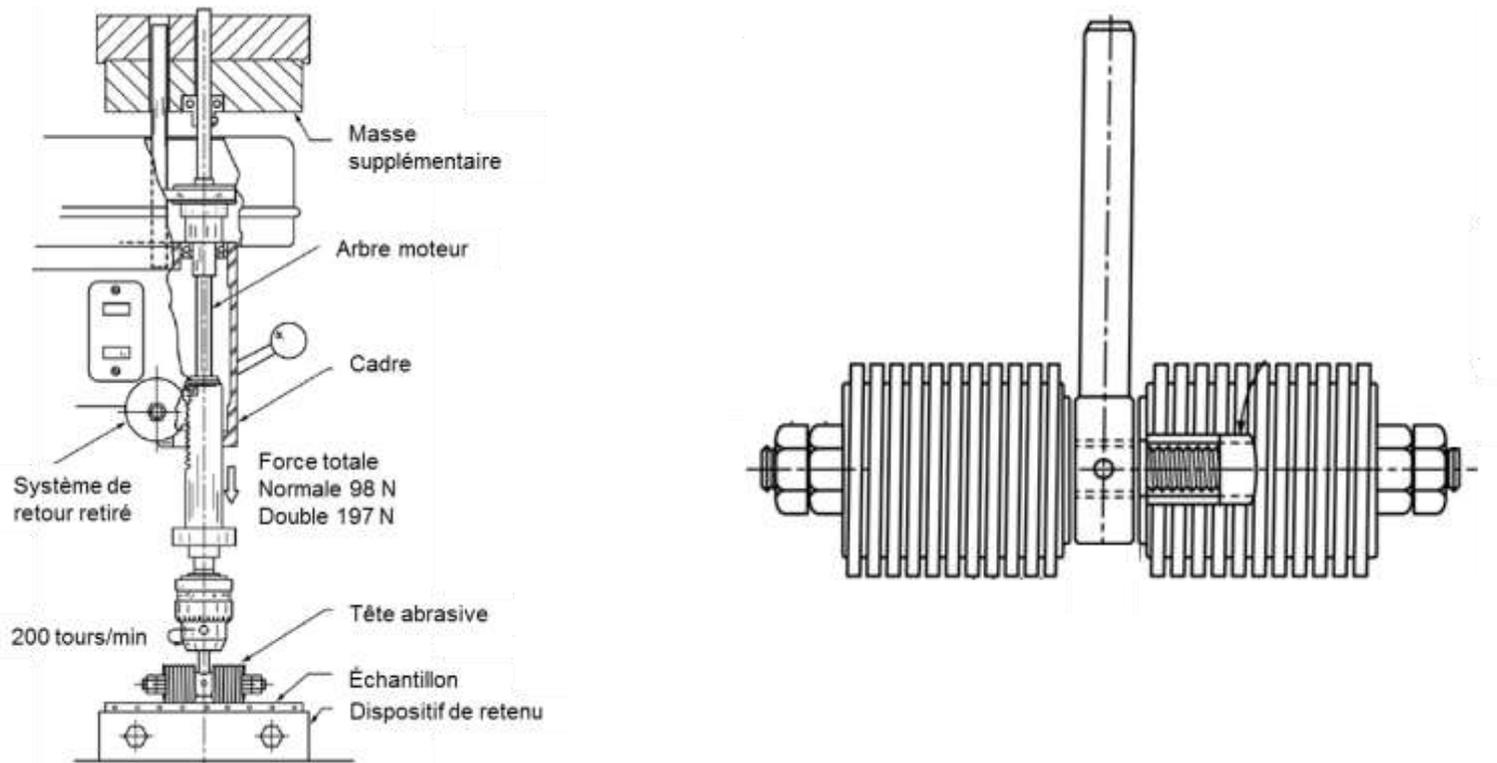


Figure 75 Dispositif pour l'essai d'abrasion (gauche) et tête abrasive (droite), selon la norme ASTM C944
Source : ASTM C944 (2012)

Tableau 64 Description des normes de référence pour les essais de pénétration aux ions chlorure

Norme	XP P18-462	ASTM C1202	AASHTO T259
Nombre d'échantillons	3	N.S.	Au moins 4 échantillons
Dimensions (mm)	Cylindre: $\phi \geq \min(3D_{\max.}, 60)$ pour du mortier $\phi \geq \min(3D_{\max.}, 80)$ pour du béton $b = 50$	Cylindre: $\phi = 100$ $b = 50$	Dalle: $b > 75$ $A_{\text{exp.}} \geq 17'500 \text{ mm}^2$
Préparations supplémentaires	Préparation des échantillons par prélèvements sur des cylindres parents moulés ou carottés (en excluant les 10 premiers mm de part et d'autre du cylindre parent).	Préparation des échantillons par prélèvements sur des cylindres parents moulés (en excluant les premiers mm supérieurs et en utilisant la portion supérieure du cylindre).	N.A.
Cure	Suivi de la cure humide selon la norme NF EN 12360-2.	La cure se fait en conformité avec les cures proposées suivantes : Cure humide de 28 jours Cure humide allongée de 56 jours Cure humide accélérée de 7 jours, puis cure de 21 jours dans l'eau de chaux saturée à $38 \pm 2^\circ\text{C}$	La cure se fait en conformité avec la procédure suivante : Cure humide jusqu'au 14 ^e jour selon la norme R 39 Cure humide de 14 à 28 jours dans une chambre climatique respectant la norme T 160
Durée de l'essai	2 jours (plus la durée de la cure humide)	2 jours (plus la durée de la cure humide)	90 jours
Procédure	1. La préparation et saturation des échantillons se fait selon les étapes suivantes :	1. Conditionnement de l'échantillon	1. Immédiatement après la fin de la cure humide, la surface des

	<ol style="list-style-type: none"> 1.1. L'épaisseur et le diamètre des échantillons sont pris avec un pied à coulisse. 1.2. Une protection étanche est appliquée sur le pourtour de l'échantillon, en laissant libre les deux surfaces transversales 1.3. Une saturation sous vide à l'aide d'une solution de NaOH, durant 72h, se fait selon les sous-étapes suivantes : <ol style="list-style-type: none"> 1.3.1. Mettre l'échantillon dans le récipient sous vide, en s'assurant de garder toutes les faces libres. 1.3.2. Abaisser la pression jusqu'à 2.5 kPa et garder cette pression pendant 4 h ± 0.5h. 1.3.3. Bien vérifier que l'échantillon soit complètement dégazé, en coupant la succion de la pompe à vide et en s'assurant que la pression reste stable. 1.3.4. En reconnectant la pompe à vide, introduire la solution de NaOH à une vitesse telle permettant de recouvrir l'échantillon de 20 mm en 15 minutes. 1.3.5. Maintenir la pression pendant 68h. 1.3.6. À la fin de la période de 68h, débrancher la pompe et ouvrir le récipient. 2. L'essai de migration de chlore accéléré se fait en suivant les étapes suivantes : <ol style="list-style-type: none"> 2.1. L'échantillon est placé entre les deux compartiments amont et aval, en remplissant les compartiments avec les solutions suivantes : 	<ol style="list-style-type: none"> 1.1. Bouillir 1 l d'eau, fermer le contenant hermétiquement et laisser refroidir. 1.2. Laisser l'échantillon sécher à l'air libre pour au moins 1h. Appliquer une couche de <i>revêtement</i> (coating) sur la surface latérale de l'échantillon. 1.3. Placer l'échantillon dans le contenant qui sera mis sous vide. Les deux faces doivent être exposées. 1.4. Sceller le contenant et partir la pompe. La pression doit descendre à moins de 6650 Pa. 1.5. Faire fonctionner la pompe pendant 3h. 1.6. Avec l'eau, couvrir l'échantillon d'eau. Ne pas faire entrer d'air dans le contenant sous vide. 1.7. Laisser la pompe fonctionner pendant 1h. 1.8. Fermer la pompe et laisser l'air entrer dans le contenant. 1.9. En utilisant la même eau préparée plus tôt, couvrir l'échantillon et laisser tremper pendant 18h. 	<p>échantillons doit être préparée, selon l'usage prévu :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.1. Si l'utilisation de l'élément prévoit une abrasion continue pour la durée de vie de l'ouvrage, la surface supérieure doit être abrasée avec une technique sèche, sur les premiers 3.2 mm ± 1.6 mm. 1.2. Si l'utilisation de l'élément ne prévoit pas une abrasion pour la durée de vie de l'ouvrage, la surface supérieure de l'échantillon ne doit pas être abrasée. 2. Placer, sur le périmètre de 3 échantillons, un rebord imperméable de 19 mm x 13 mm de large. 3. Replacer les échantillons dans la chambre de conditionnement pour une durée supplémentaire de 13 jours. 4. Recouvrir la surface supérieure de l'échantillon avec une solution de chlorure de sodium à une concentration de 3%, d'une profondeur de 13 mm. La surface est maintenue recouverte pendant 90 jours, en prenant bien soin de garder l'épaisseur de la solution constante. Une plaque de verre doit être placée sur l'échantillon afin de prévenir
--	---	--	--

	<p>2.1.1. Compartiment amont : [NaCl 0.5 mol L⁻¹ + NaOH 0.1 mol L⁻¹] ou [NaCl 1 mol L⁻¹ + NaOH 0.1 mol L⁻¹]</p> <p>2.1.2. Compartiment aval : NaOH 0.1 mol L⁻¹</p> <p>2.2. Un courant de 20 à 30 V est appliqué et maintenu de façon constante pendant toute la durée de l'essai.</p> <p>2.3. L'intensité du courant est mesurée en continue pendant toute la durée de l'essai, et la température est prise dans les compartiments amont et aval à toutes les 24h.</p> <p>2.4. L'intensité du courant et la durée de l'essai sont choisies de façon à respecter l'équation suivante :</p> <p style="text-align: center;">2.4.1.1.1. $3 \times 10^5 \frac{As}{m^2} \leq I \times \frac{\Delta t}{S} \leq 9 \times 10^5 \frac{As}{m^2}$</p> <p>3. La détermination de la profondeur de pénétration moyenne est faite selon les étapes suivantes :</p> <p>3.1. L'emplacement des compartiments amont et aval est indiqué sur les échantillons.</p> <p>3.2. Les échantillons sont ensuite fendus selon l'axe longitudinal, avec un essai de fendage brésilien ou par sciage.</p> <p>3.3. La pénétration de chlorure est déterminée par pulvérisation de la solution de nitrate d'argent sur les faces coupées de l'échantillon. Le front de pénétration apparaît après quelques minutes suivantes la pulvérisation, en donnant au béton une teinte plus claire lorsqu'il contient des chlorures.</p> <p>3.4. La profondeur de pénétration est mesurée en 8 points différents à l'aide du pied à</p>	<p>2. Placer l'échantillon dans la cellule d'essai</p> <p>2.1. Utiliser un joint d'étanchéité en caoutchouc dans chaque moitié de la cellule.</p> <p>2.2. Placer l'échantillon et joindre les deux moitiés de la cellule ensemble.</p> <p>3. Remplir la moitié de la cellule qui sera connectée à la borne négative avec une solution à 3% de NaCl.</p> <p>4. Remplir la moitié de la cellule qui sera connectée à la borne positive avec une solution à 0,3 N de NaOH.</p> <p>5. Faire les connexions électriques et mettre en marche l'alimentation à 60 V.</p> <p>6. Prendre en note le courant initial.</p> <p>7. La température de l'échantillon, de la cellule et des solutions doit être de 20 à 25°C.</p> <p>8. Prendre en note le courant à tous les 30 min.</p> <p>9. Terminer l'essai après 6h ou si la température excède 90°C.</p>	<p>l'évaporation de la solution, sans empêcher le contact avec l'atmosphère de la chambre de conditionnement.</p> <p>5. Après l'essai de 90 jours, la solution est jetée, les échantillons sont mis à sécher et la surface supérieure est nettoyée à la brosse.</p> <p>6. Des échantillons, pour l'analyse d'ions chlorure, doivent être pris aux profondeurs suivantes :</p> <p>6.1. De 1.6 mm à 13 mm</p> <p>6.2. De 13 mm à 25 mm</p> <p>7. L'analyse de la teneur en ions chlorure se fait en accord avec la norme T 260.</p> <p>8. La teneur de base en ions chlorure des échantillons se fait en prenant la moyenne des résultats des essais suivants :</p> <p>8.1. Pour les échantillons avec la solution de 3%, de 1.6 mm à 13 mm</p> <p>8.2. Pour l'échantillon de contrôle, de 13 mm à 25 mm</p> <p>9. Le taux de chlorure absorbé par échantillon est déterminé en prenant la différence entre le contenu total en ions chlorure de l'échantillon et la teneur de base obtenue à l'étape 8.</p>
--	---	---	--

	<p>coulisse. Les deux valeurs extrêmes sont retirées de l'analyse et la profondeur moyenne de pénétration est prise comme la moyenne des 6 valeurs restantes.</p> <p>4. Le calcul du coefficient de diffusion des ions chlorure se fait comme suit :</p> <p>4.1. Le coefficient de diffusion apparent se calcule avec l'équation suivante :</p> <p style="text-align: center;">4.1.1.1.1. $D_{app} = \frac{RT}{ZF \Delta E} \frac{X_d - \alpha \sqrt{X_d}}{\Delta t}$</p> <p>4.2. Le terme α se calcule selon la formule suivante :</p> <p>5. $\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{ZF \Delta E} \frac{X_d - \alpha \sqrt{X_d}}{\Delta t}} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - 2 \frac{c_d}{c_s} \right)$</p>		
--	--	--	--

Source : XP P18-462 (2012), ASTM C1202 (2017), AASHTO T256 (2017)

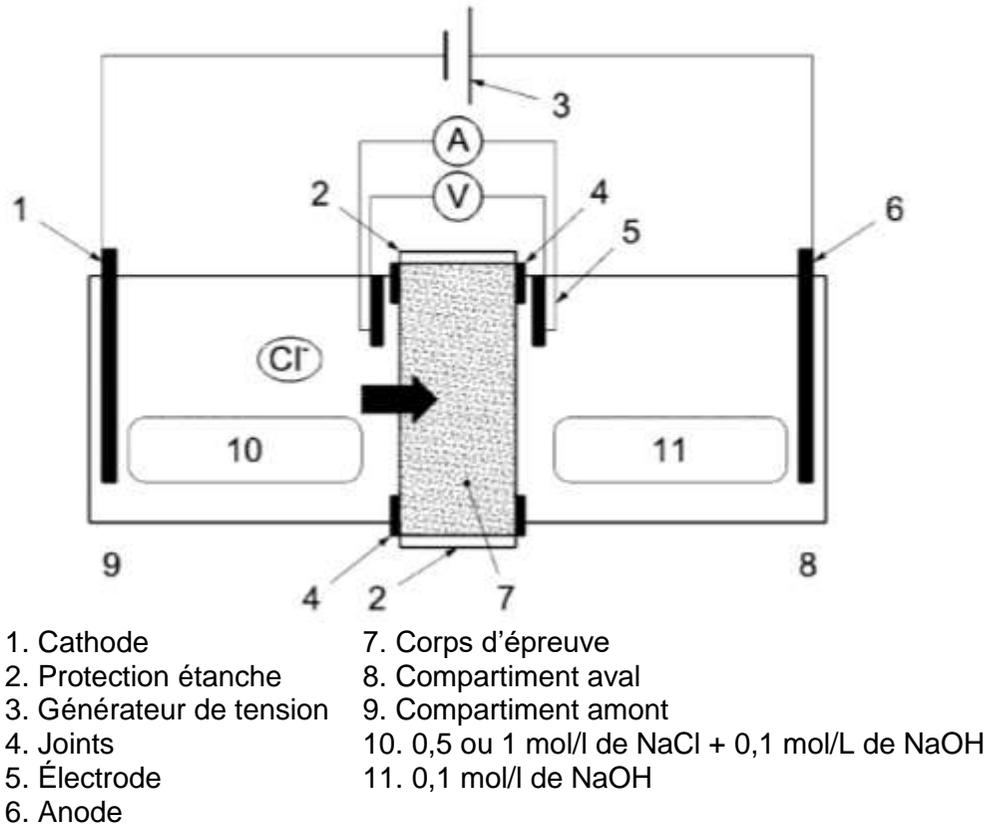


Figure 76 Disposition pour l'essai de migration accéléré de chlore, selon la norme XP P18-462
Source : XP P18-462 (2012)

Annexe 11

Essai de résistance à la compression

Essai	Fournisseur	Identifiant	Masse (g)	Longueur (mm)				Diamètre (mm)			Aire moyenne (mm ²)	Masse volumique (kg/m ³)
				L ₁	L ₂	L ₃	L _{moy.}	d ₁	d ₂	d _{moy.}		
Compression - 4 jours	A	1	1769.70	146.72	146.74	146.76	146.74	77.62	77.55	77.59	4728	2551
		2	1766.60	148.08	147.69	147.53	147.77	77.47	77.71	77.59	4728	2528
		3	1659.50	142.43	142.29	142.66	142.46	76.25	76.67	76.46	4592	2537
		4	1706.30	142.46	142.42	142.47	142.45	77.30	78.13	77.72	4744	2525
	B	1	1652.60	153.02	153.09	153.06	153.06	76.34	76.21	76.28	4569	2363
		2	1591.80	144.98	145.03	144.97	144.99	77.01	76.04	76.53	4599	2387
		3	1692.40	153.63	153.63	153.66	153.64	76.78	77.05	76.92	4646	2371
	C	1	1737.20	152.92	152.59	153.04	152.85	77.59	77.08	77.34	4697	2420
		2	1687.20	151.85	152.06	152.02	151.98	76.36	75.85	76.11	4549	2440
		3	1671.30	150.48	150.51	150.57	150.52	76.70	76.64	76.67	4617	2405
	D	1	1603.10	144.64	144.62	144.60	144.62	77.34	77.74	77.54	4727	2345
		2	1813.10	164.73	164.79	164.68	164.73	77.28	77.48	77.38	4701	2341
		3	1723.90	160.98	160.91	160.93	160.94	76.94	76.39	76.67	4613	2322
		4	1634.80	146.82	146.73	146.58	146.71	77.67	77.38	77.53	4716	2363
		5	1639.30	147.07	147.18	147.11	147.12	77.77	77.63	77.70	4740	2351
		6	1831.20	165.87	165.82	165.78	165.82	77.47	77.89	77.68	4725	2337

Essai	Fournisseur	Identifiant	Masse (g)	Longueur (mm)				Diamètre (mm)			Aire moyenne (mm ²)	Masse volumique (kg/m ³)
				L ₁	L ₂	L ₃	L _{moy.}	d ₁	d ₂	d _{moy.}		
Compression - 28 jours	A	1	1846.90	154.26	154.26	154.10	154.21	77.32	78.01	77.67	4737	2528
		2	1868.10	150.80	150.80	150.91	150.84	77.02	76.99	77.01	4657	2659
		3	1805.50	149.28	149.26	149.21	149.25	77.85	77.35	77.60	4729	2558
		4	1766.80	144.39	145.18	145.10	144.89	77.86	78.44	78.15	4797	2542
	B	1	1622.90	147.42	147.34	147.26	147.34	77.24	77.57	77.41	4706	2341
		2	1666.70	147.47	147.52	147.29	147.43	77.88	77.64	77.76	4749	2381
		3	1666.40	147.93	148.08	147.97	147.99	77.44	77.40	77.42	4708	2392
	C	1	1686.00	151.17	151.21	151.24	151.21	76.20	77.00	76.60	4608	2420
		2	1711.70	153.14	153.80	153.82	153.59	77.20	76.53	76.87	4640	2402
		3	1641.30	147.48	147.51	147.58	147.52	76.90	76.96	76.93	4648	2394
		4	1738.70	156.76	156,75	156,76	156.76	76.11	76.80	76.46	4591	2416
		5	1724.80	150.03	150.06	150.16	150.08	77.25	77.30	77.28	4690	2450
		6	1679.90	150.16	149.94	150.14	150.08	76.96	77.00	76.98	4654	2405
		7	1683.40	146.10	146.42	145.96	146.16	77.44	77.80	77.62	4732	2434
	D	1	1633.20	151.03	151.00	150.98	151.00	76.66	76.54	76.60	4608	2347
		2	1657.50	152.41	152.47	152.43	152.44	76.77	76.32	76.55	4602	2363
		3	1611.80	148.67	148.59	148.62	148.63	77.01	76.32	76.67	4616	2349

Essai	Fournisseur	Identifiant	Masse (g)	Longueur (mm)				Diamètre (mm)			Aire moyenne (mm ²)	Masse volumique (kg/m ³)
				L ₁	L ₂	L ₃	L _{moy.}	d ₁	d ₂	d _{moy.}		
Compression - Traitement thermique	A	1	1727.10	148.07	148.10	148.10	148.09	76.51	76.47	76.49	4595	2538
		2	1781.50	149.32	149.38	149.37	149.36	76.22	77.01	76.62	4610	2587
		3	1727.10	149.43	149.34	149.37	149.38	76.31	76.56	76.44	4589	2520
	B	1	1724.90	153.55	153.51	153.65	153.57	77.07	76.48	76.78	4629	2426
		2	1696.90	151.47	151.51	151.55	151.51	76.28	76.77	76.53	4599	2435
		3	1693.80	149.75	149.85	149.77	149.79	76.92	76.65	76.79	4631	2442
	C	1	1852.50	165.58	165.86	165.52	165.65	76.47	76.54	76.51	4597	2433
		2	1986.60	172.30	172.40	172.43	172.38	77.01	77.19	77.10	4669	2469
		3	1902.40	166.68	166.78	166.79	166.75	77.11	76.12	76.62	4610	2475
	D	1	1882.80	166.84	166.93	166.81	166.86	76.02	76.83	76.43	4587	2460
		2	1769.70	160.40	160.33	160.49	160.41	76.95	77.31	77.13	4672	2361
			3	1774.10	160.12	160.17	160.42	160.24	76.42	76.83	76.63	4611

Annexe 12

Essai de module élastique

Essai	Fournisseur	Identifiant	Masse (g)	Longueur (mm)				Diamètre (mm)			Aire moyenne (mm ²)	Masse volumique (kg/m ³)
				L ₁	L ₂	L ₃	L _{moy.}	d ₁	d ₂	d _{moy.}		
Module élastique	A	1	3594.00	176.51	176.18	176.10	176.26	101.60	100.21	100.91	7997	2550
		2	3800.60	182.38	182.46	182.38	182.41	101.51	102.44	101.98	8167	2551
		3	3821.50	181.41	181.44	181.64	181.50	101.49	102.69	102.09	8186	2572
	B	1	3557.70	196.67	196.84	196.66	196.72	99.02	98.29	98.66	7644	2366
		2	3626.80	187.65	187.51	187.67	187.61	102.71	102.44	102.58	8264	2339
		3	3372.00	179.57	179.55	179.50	179.54	101.73	100.97	101.35	8067	2328
	C	1	3736.90	190.38	190.36	190.45	190.40	100.59	101.37	100.98	8009	2451
		2	3784.90	193.42	193.49	193.57	193.49	100.67	100.64	100.66	7957	2458
		3	3753.60	188.60	188.62	188.64	188.62	102.00	102.07	102.04	8177	2434
	D	1	3437.10	181.50	181.58	181.60	181.56	100.55	102.39	101.47	8087	2341
		2	3458.00	188.24	188.12	188.15	188.17	99.27	99.64	99.46	7769	2366
		3	3642.90	186.89	186.88	186.67	186.81	102.27	102.20	102.24	8209	2375

Annexe 13

Essai de résistance à la flexion à 3 points sur prismes entaillés

Fournisseur	Identifiant	Masse (g)	Longueur 1 (mm)	Longueur 2 (mm)	Largeur 1 (mm)	Largeur 2 (mm)	Hauteur 1 (mm)	Hauteur 2 (mm)	Aire moyenne (mm ²)	Volume (mm ³)	Masse volumique (kg/m ³)
A	150518A4	10286	401	401	101.39	102.44	100.74	100.48	10254	4111721	2502
	150518A5	10318	400	401	102.39	101.54	100.7	100.76	10271	4113509	2508
	150518A6	10123	401	401	100.85	98.95	100.1	99.91	9990	4006190	2527
	150518A7	10270	400	400	99.67	102.52	100.2	101.11	10176	4070287	2523
	150518A8	10278	400	400	100.1	101.12	100.46	100.64	10116	4046534	2540
	150518A9	10215	400	401	100.2	101.96	100.5	100.64	10166	4071329	2509
B	220818B2-4	9407	402	401	100.68	100.69	99.42	99.47	10013	4020067	2340
	220818B2-5	9203	401	401	98.57	99.14	100.43	100.37	9925	3979942	2312
	220818B2-6	9250	401	401	99.28	99.74	100.05	99.86	9947	3988555	2319
	220818B2-7	9299	402	402	100.25	99.96	100.06	99.71	9999	4019593	2313
	220818B2-8	9352	401	401	99.86	99.7	100.31	100.38	10012	4014982	2329
	B2-230719	9389.2	401	401	101.24	101.59	100.26	100.14	10162	4074875	2304
C	140518C1*	10299	400	400	108.19	108.19	104	104.26	11266	4506330	2285
	140518C4	9817	400	400	101.49	101.09	100.08	100.01	10134	4053423	2422
	140518C6	9665	400	400	99.22	101.19	99.35	99.41	9958	3983349	2426
	140518C7	9824	401	401	102.58	101.36	99.71	99.67	10165	4076321	2410
	140518C8	9977	401	401	103	101.96	100.47	100.84	10315	4136365	2412
	140518C9	9993	401	401	103.73	102.03	100.28	100.08	10307	4132914	2418

Fournisseur	Identifiant	Masse (g)	Longueur 1 (mm)	Longueur 2 (mm)	Largeur 1 (mm)	Largeur 2 (mm)	Hauteur 1 (mm)	Hauteur 2 (mm)	Aire moyenne (mm ²)	Volume (mm ³)	Masse volumique (kg/m ³)
D	D1	9482	400	400	100.99	100.38	99.82	99.96	10057	4022970	2357
	D2	9391	400	400	100.29	99.77	100.00	100.05	10006	4002200	2347
	D3	9496	400	400	99.87	100.94	100.22	101.18	10111	4044313	2348
	D4	9640	400	400	101.01	99.91	102.59	100.65	10209	4083498	2361
	D5	9526	400	400	100.77	100.74	99.92	100.44	10094	4037454	2359

Annexe 14

Essai de résistance à la flexion à 4 points sur prismes non entaillés

Fournisseur	Identifiant	Masse (g)	Longueur 1 (mm)	Longueur 2 (mm)	Hauteur 1 (mm)	Hauteur 2 (mm)	Largeur 1 (mm)	Largeur 2 (mm)	Aire moyenne (mm ²)	Volume (mm ³)	Masse volumique (kg/m ³)
A	150518A1	10103	401	401	100.18	100.17	99.35	101.15	10043	4027060	2509
	150518A2	10042.8	401	401	101.27	100.17	97.95	100.35	9986	4004542	2508
	150518A3	10289.8	401	401	103.24	103.02	99.39	103.03	10438	4185553	2458
	A1-220719	10114.4	400	400	100.2	100.28	101.25	102.25	10199	4079768	2479
	A2-220719	9804.6	400	400	99.68	99.53	100.08	99.35	9932	3972845	2468
B	220818B2-1	9539	402	402	100.4	100.4	100.68	100.82	10115	4066351	2346
	220818B2-2	9554	401	401	100.26	100.32	101.06	101.13	10139	4065666	2350
	220818B2-3	9388	401	401	99.65	99.61	100.24	100.59	10004	4011743	2340
	B1-230719	9416.8	401	401	100.45	100.63	101.35	101.97	10221	4098579	2298
	B2-230719	9389.2	401	401	100.26	100.14	101.24	101.59	10162	4074875	2304
	B4-240719	9171.6	400	400	99.91	99.92	100.2	100.32	10017	4006991	2289
C	140518C2	9752	401	401	100.54	100.69	103.17	102.29	10336	4144808	2353
	140518C3	9968	401	401	100.37	100.59	101.01	101.78	10188	4085456	2440
	140518C5	9814	401	401	100.59	100.4	100.2	100.66	10093	4047178	2425

Fournisseur	Identifiant	Masse (g)	Longueur 1 (mm)	Longueur 2 (mm)	Hauteur 1 (mm)	Hauteur 2 (mm)	Largeur 1 (mm)	Largeur 2 (mm)	Aire moyenne (mm ²)	Volume (mm ³)	Masse volumique (kg/m ³)
D	041018D1	9390.8	400	400	100.84	100.41	100.82	100.78	10143	4057200	2315
	041018D2	9623.4	400	400	100.18	100.17	101.64	101.49	10174	4069710	2365
	041018D3	9305	400	400	100.38	100.43	99.73	99.73	10013	4005356	2323
	D1-220719	9290.8	400	400	100.33	100.31	100.72	99.92	10064	4025641	2308
	D2-220719	9226.6	400	400	99.81	99.94	99.78	100.09	9981	3992403	2311

Annexe 15

Essai de résistance à la flexion à 4 points sur dalles minces

Fournisseur	Identifiant	Masse (g)	Longueur (mm)		Largeur (mm)		Hauteur (mm)		Masse volumique (kg/m ³)
A	A2-1	3743.1	500	500	99.92	100.00	30.56	30.07	2470
	A2-2	3722.6	500	500	99.25	99.30	30.82	30.65	2440
	A2-3	3946.1	501	500	99.86	100.54	31.43	31.42	2504
	A3-230719	3881.5	500	500	100.22	99.52	31.15	30.96	2503
B	B2-1	3450.8	500	500	100.24	99.86	29.23	29.62	2344
	B2-2	3419.2	500	500	99.60	99.70	29.18	29.65	2333
	B2-3	3540.1	500	500	99.86	100.55	30.79	30.30	2313
C	C2-1	4020	500	499	99.89	100.75	33.88	33.99	2364
	C2-2	4021	500	500	99.78	99.49	33.75	33.35	2406
	C2-3	3942.6	500	500	100.12	100.06	32.62	32.72	2411
D	D1-1	3431.4	500	500	99.72	99.38	28.73	30.03	2346
	D1-2	3722.9	500	500	100.19	100.25	31.22	32.10	2347
	D1-3	3431.1	500	500	99.64	100.02	29.18	29.29	2351
	D3-240719	3678.6	500	500	100.11	100.35	32.31	32.32	2271
	D4-230719	3787.6	500	500	101.02	99.8	33.42	33.01	2271

Analyse inverse avec essais de flexion à 4 points sur plaques minces

Tableau 65 Relation entre les paramètres α_i et λ_i

λ_i	α_i	λ_i	α_i	λ_i	α_i	λ_i	α_i
0,00	0,988	0,25	0,674	0,50	0,500	0,75	0,326
0,01	0,941	0,26	0,666	0,51	0,493	0,76	0,319
0,02	0,915	0,27	0,658	0,52	0,487	0,77	0,311
0,03	0,896	0,28	0,651	0,53	0,480	0,78	0,303
0,04	0,879	0,29	0,644	0,54	0,473	0,79	0,295
0,05	0,863	0,30	0,636	0,55	0,467	0,80	0,287
0,06	0,850	0,31	0,629	0,56	0,460	0,81	0,279
0,07	0,838	0,32	0,622	0,57	0,453	0,82	0,270
0,08	0,826	0,33	0,615	0,58	0,446	0,83	0,261
0,09	0,815	0,34	0,608	0,59	0,440	0,84	0,253
0,10	0,804	0,35	0,601	0,60	0,433	0,85	0,244
0,11	0,794	0,36	0,594	0,61	0,426	0,86	0,235
0,12	0,784	0,37	0,587	0,62	0,419	0,87	0,226
0,13	0,774	0,38	0,580	0,63	0,412	0,88	0,216
0,14	0,764	0,39	0,574	0,64	0,406	0,89	0,206
0,15	0,755	0,40	0,567	0,65	0,399	0,90	0,196
0,16	0,746	0,41	0,560	0,66	0,392	0,91	0,185
0,17	0,738	0,42	0,553	0,67	0,385	0,92	0,174
0,18	0,729	0,43	0,547	0,68	0,378	0,93	0,161
0,19	0,721	0,44	0,540	0,69	0,370	0,94	0,149
0,20	0,712	0,45	0,533	0,70	0,363	0,95	0,135
0,21	0,705	0,46	0,527	0,71	0,355	0,96	0,120
0,22	0,697	0,47	0,520	0,72	0,348	0,97	0,104
0,23	0,689	0,48	0,513	0,73	0,341	0,98	0,082
0,24	0,681	0,49	0,507	0,74	0,334	0,99	0,060

Source : (SIA 2016)

Essais de la teneur en eau, de la densité, de l'absorption et de la porosité

Tableau 66 Résultats des essais de la teneur en eau, de la densité, de l'absorption et de la porosité

Identifiant	Contenu en eau	Absorption après immersion	Absorption après immersion et ébullition	Masse volumique à l'équilibre	Masse volumique après séchage au four	Masse volumique après immersion	Masse volumique après immersion et ébullition	Volume des vides
	(%)	(%)	(%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)
A-1	1,51	1,11	1,25	2 559,78	2 534,86	2 563,05	2 566,57	3,17
A-2	1,47	1,02	1,06	2 590,59	2 565,07	2 591,34	2 592,34	2,73
A-3	1,55	1,03	1,10	2 654,85	2 626,69	2 653,81	2 655,63	2,89

Identifiant	Contenu en eau	Absorption après immersion	Absorption après immersion et ébullition	Masse volumique à l'équilibre	Masse volumique sèche (au four)	Masse volumique après immersion	Masse volumique après immersion et ébullition	Volume des vides
	(%)	(%)	(%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)
B-1	3,02	1,64	1,86	2 352,94	2 296,66	2 334,28	2 339,37	4,27
B-2	2,84	1,58	1,78	2 384,43	2 330,17	2 367,06	2 371,68	4,15
B-3	2,94	1,64	0,88	2 460,64	2 403,24	2 442,74	2 424,27	2,10

ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP) AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)

Identifiant	Contenu en eau	Absorption après immersion	Absorption après immersion et ébullition	Masse volumique à l'équilibre	Masse volumique sèche (au four)	Masse volumique après immersion	Masse volumique après immersion et ébullition	Volume des vides
	(%)	(%)	(%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)
C-1	2,17	1,44	1,41	2 470,37	2 432,27	2 467,38	2 466,63	3,44
C-2	2,26	1,50	1,49	2 449,33	2 410,01	2 446,15	2 445,91	3,59
C-3	2,25	1,45	1,42	2 469,59	2 430,41	2 465,69	2 464,96	3,45

Identifiant	Contenu en eau	Absorption après immersion	Absorption après immersion et ébullition	Masse volumique à l'équilibre	Masse volumique sèche (au four)	Masse volumique après immersion	Masse volumique après immersion et ébullition	Volume des vides
	(%)	(%)	(%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)
D-1	2,79	2,11	2,06	2 317,46	2 324,14	2 373,16	2 372,04	4,79
D-2	2,82	2,10	1,93	2 427,62	2 323,20	2 372,10	2 367,96	4,48
D-3	2,76	2,05	1,99	2 632,72	2 433,26	2 483,13	2 481,61	4,83

Essai modifié de migration accélérée

Tableau 67 Résultats des essais modifiés de migration accélérée

	Profondeur de la couche (mm)			Profondeur de la couche (mm)	
BFUP-A	0,00	1,00	BUP-A	0,00	2,78
	1,00	7,00		2,78	4,12
	7,00	10,00		4,12	5,59
	10,00	12,00		5,59	7,64
BFUP-B1	0,00	10,00	BUP-A	7,64	11,32
	10,00	18,00		11,32	14,63
	18,00	25,00		14,63	20,40
	25,00	32,00			
BFUP-B2	0,00	6,00	BUP-B	0,00	2,32
	6,00	13,00		2,32	4,24
	13,00	19,00		4,24	4,94
	19,00	23,00		4,94	9,18
BFUP-C1	0,00	7,00		9,18	16,01
	7,00	12,00		16,01	20,77
	12,00	16,00	20,77	29,62	
	16,00	22,00			
BFUP-C2	0,00	6,00	BUP-C	0,00	2,12
	6,00	8,00		2,12	3,90
	8,00	12,00		3,90	5,11
	12,00	12,00		5,11	6,92
BFUP-D1	0,00	5,00		6,92	11,21
	5,00	9,00		11,21	15,18
	9,00	12,00	15,18	19,93	
	12,00	15,00			
BFUP-D2	0,00	5,00	BUP-D	0,00	3,01
	5,00	9,00		3,01	4,28
	9,00	12,00		4,28	5,98
	12,00	16,00		5,98	8,75
		8,75		16,59	
		16,59		22,65	
		22,65	33,79		

Essai de caractérisation du réseau de bulles d'air

Procédure B - BFUP A

Calculate the total traverse Length

$$Tt = St * l \quad 1397$$

$$Tt = 1437,58621$$

Air Content

$$A = Sa * 100 / St$$

$$A = 3,86983289$$

Void Frequency

$$n = N / Tt$$

$$n = 0,10295035$$

Paste content [%]

$$p = Sp * 100 / St$$

$$p = 96,1301671$$

Paste-air ratio

$$P/A = Sp / Sa \quad 4,342$$

$$P/A = 24,8409091 > 4,342$$

Average Chord length (l.barre=l)

$$l = Sa * l / N$$

$$\text{OR } l = A / 100n$$

$$l = 0,37589313$$

$$\text{OR } l = 0,37589313$$

specific area surface

$$\alpha = 4 / L$$

$$\text{OR } \alpha = 400n / A$$

$$\alpha = 10,6413223$$

$$\text{OR } \alpha = 10,6413223$$

Spacing Factor (L.barre=L)

$$1) \text{ If } P/A \leq 4,342 \quad 4.342 \bar{L} = \frac{P}{400n}$$

$$2) \text{ If } P/A > 4,342 \quad 4.342 \bar{L} = \frac{3}{\alpha} \left[1.4 \left(1 + \frac{P}{A} \right)^{1/3} - 1 \right]$$

$$1) L = 0,53762823$$

$$2) L = 0,20381194$$

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

Procedure B - BFUP B

Calculate the total traverse Length

$$T_t = St \cdot l \quad L_{min} = 1397 \text{ mm}$$

$$T_t = 1455$$

Air Content

$$A = Sa \cdot 100 / St$$

$$A = 3,39347079$$

Void Frequency

$$n = N / T_t$$

$$n = 0,13883162$$

Paste content [%]

$$p = Sp \cdot 100 / St$$

$$p = 96,6065292$$

Paste-air ratio

$$P/A = Sp / Sa \quad 4,342$$

$$P/A = 28,46883544 > 4,342$$

Average Chord length (l.barre=l)

$$l = Sa \cdot l / N$$

OR $l = A / 100n$

$$l = 0,24443069$$

OR $l = 0,24443069$

specific area surface

$$\alpha = 4 / L$$

OR $\alpha = 400n / A$

$$\alpha = 16,364557$$

OR $\alpha = 16,364557$

Spacing Factor (L.barre=L)

1) If $P/A \leq 4,342$ $4.342 \bar{L} = \frac{P}{400n}$

2) If $P/A > 4,342$ $4.342 \bar{L} = \frac{3}{\alpha} \left[1.4 \left(1 + \frac{P}{A} \right)^{1/3} - 1 \right]$

1) $L = 0,4006529$

2) $L = 0,1403538$

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

Procedure B - BFUP C

Calculate the total traverse Length

$$Tt = St * l$$

$$Tt = 1347,6 \text{ mm}$$

Air Content

$$A = Sa * 100 / St$$

$$A = 13,6242208$$

Void Frequency

$$n = N / Tt$$

$$n = 0,37102998 \text{ mm}^{-1}$$

Paste content [%]

$$p = Sp * 100 / St$$

$$p = 72,7070347$$

Paste-air ratio

$$P/A = Sp / Sa = 4,342$$

$$P/A = 6,33986928 > 4,342$$

Average Chord length (l.barre=l)

$$l = Sa * l / N$$

OR $l = A / 100n$

$$l = 0,3672 \text{ mm}$$

OR $l = 0,3672 \text{ mm}$

specific area surface

$$\alpha = 4 / l$$

OR $\alpha = 400n / A$

$$\alpha = 10,8932462$$

OR $\alpha = 10,8932462$

Spacing Factor (L.barre=L)

$$1) \text{ If } P/A \leq 4,342 \quad 4.342 \bar{L} = \frac{P}{400n}$$

$$2) \text{ If } P/A > 4,342 \quad 4.342 \bar{L} = \frac{3}{\alpha} \left[1.4 \left(1 + \frac{P}{A} \right)^{1/3} - 1 \right]$$

$$1) L = 0,11282819$$

$$2) L = 0,10914286$$

Procedure B - BFUP D

Calculate the total traverse Length

$$Tt = St * l$$

$$Tt = 1425,07463$$

Air Content

$$A = Sa * 100 / St$$

$$A = 3,8961039$$

Void Frequency

$$n = N / Tt$$

$$n = 0,11648513$$

Paste content [%]

$$p = Sp * 100 / St$$

$$p = 96,1038961$$

Paste-air ratio

$$P/A = Sp / Sa = 4,342$$

$$P/A = 24,6666667 > 4,342$$

Average Chord length (l.barre=l)

$$l = Sa * l / N$$

OR $l = A / 100n$

$$l = 0,33447222$$

OR $l = 0,33447222$

specific area surface

$$\alpha = 4 / l$$

OR $\alpha = 400n / A$

$$\alpha = 11,9591398$$

OR $\alpha = 11,9591398$

Spacing Factor (L.barre=L)

$$1) \text{ If } P/A \leq 4,342 \quad 4.342 \bar{L} = \frac{P}{400n}$$

$$2) \text{ If } P/A > 4,342 \quad 4.342 \bar{L} = \frac{3}{\alpha} \left[1.4 \left(1 + \frac{P}{A} \right)^{1/3} - 1 \right]$$

$$1) L = 0,47502963$$

$$2) L = 0,18081454$$

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

Procédure B - Tableau Récapitulatif

	BFUP A	BFUP B	BFUP C	BFUP D
N	148.000	202.000	500.000	166.000
St	2274.000	2328.000	2246.000	2387.000
Sa	88.000	79.000	306.000	93.000
Sp	2186.000	2249.000	1633.000	2294.000
l [mm]	0.632	0.625	0.600	0.597
Tt [mm]	1437.586	1455.000	1347.600	1425.075
A	3.870	3.393	13.624	3.896
n [mm ⁻¹]	0.103	0.139	0.371	0.116
p	96.130	96.607	72.707	96.104
p/A	24.841	28.468	6.340	24.667
l.barre [mm]	0.376	0.244	0.367	0.334
α [mm ⁻¹]	10.641	16.365	10.893	11.959
L.barre [mm]	0.204	0.140	0.109	0.181

Analyse inverse selon la norme CSA S6 Annexe 8 pour un BFUP
 de type TH-FRC

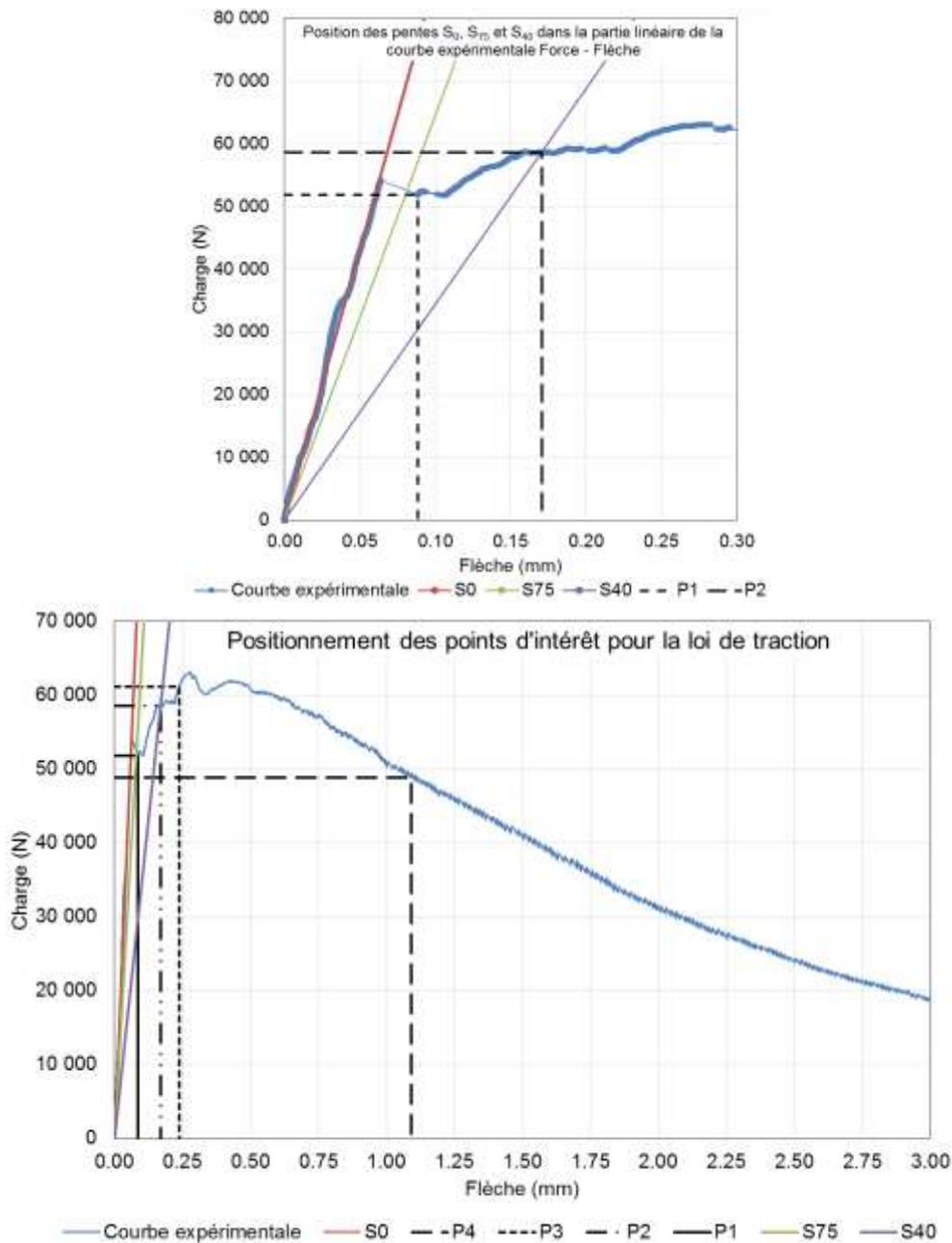


Figure 77 Échantillon A1

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

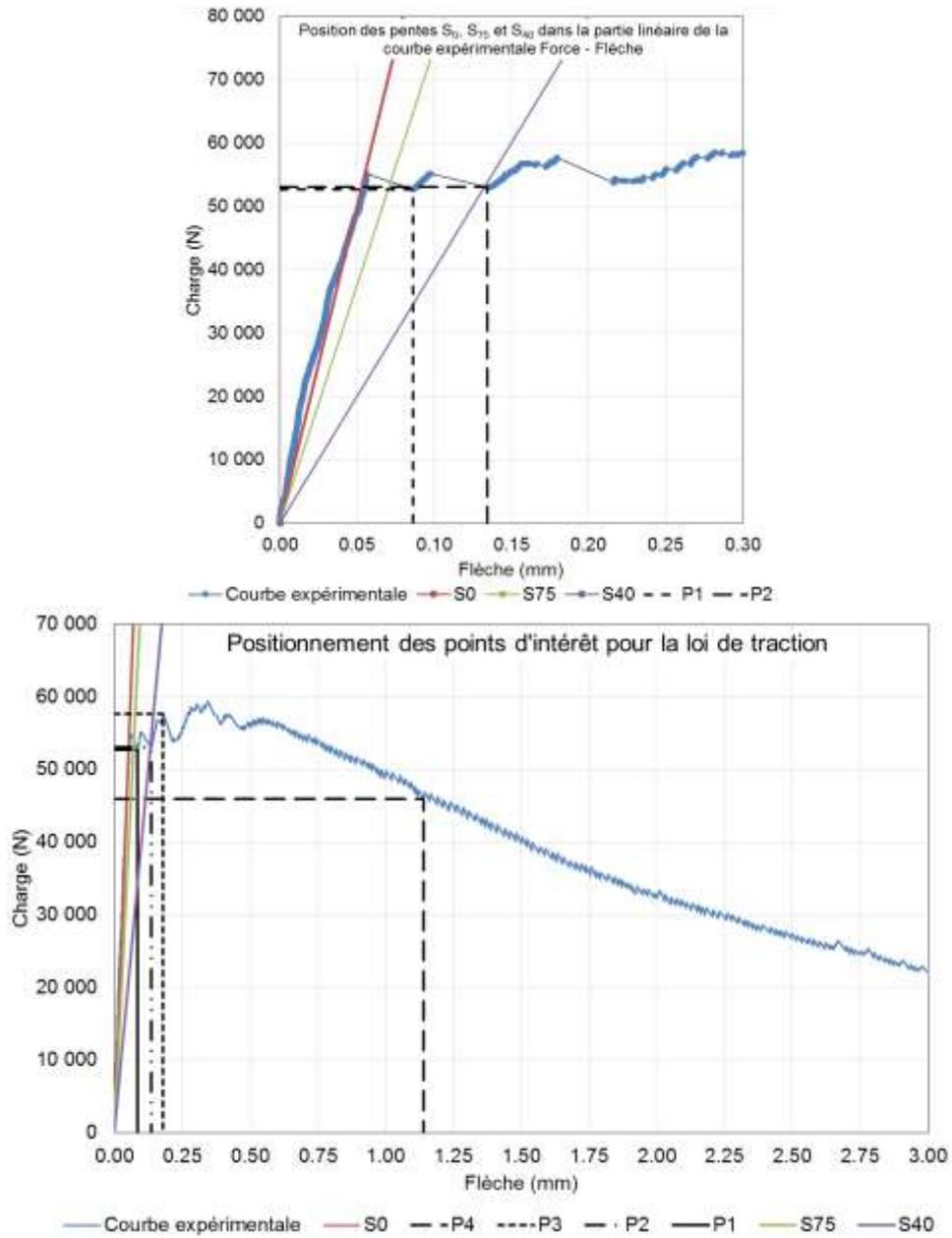


Figure 78 Échantillon A2

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

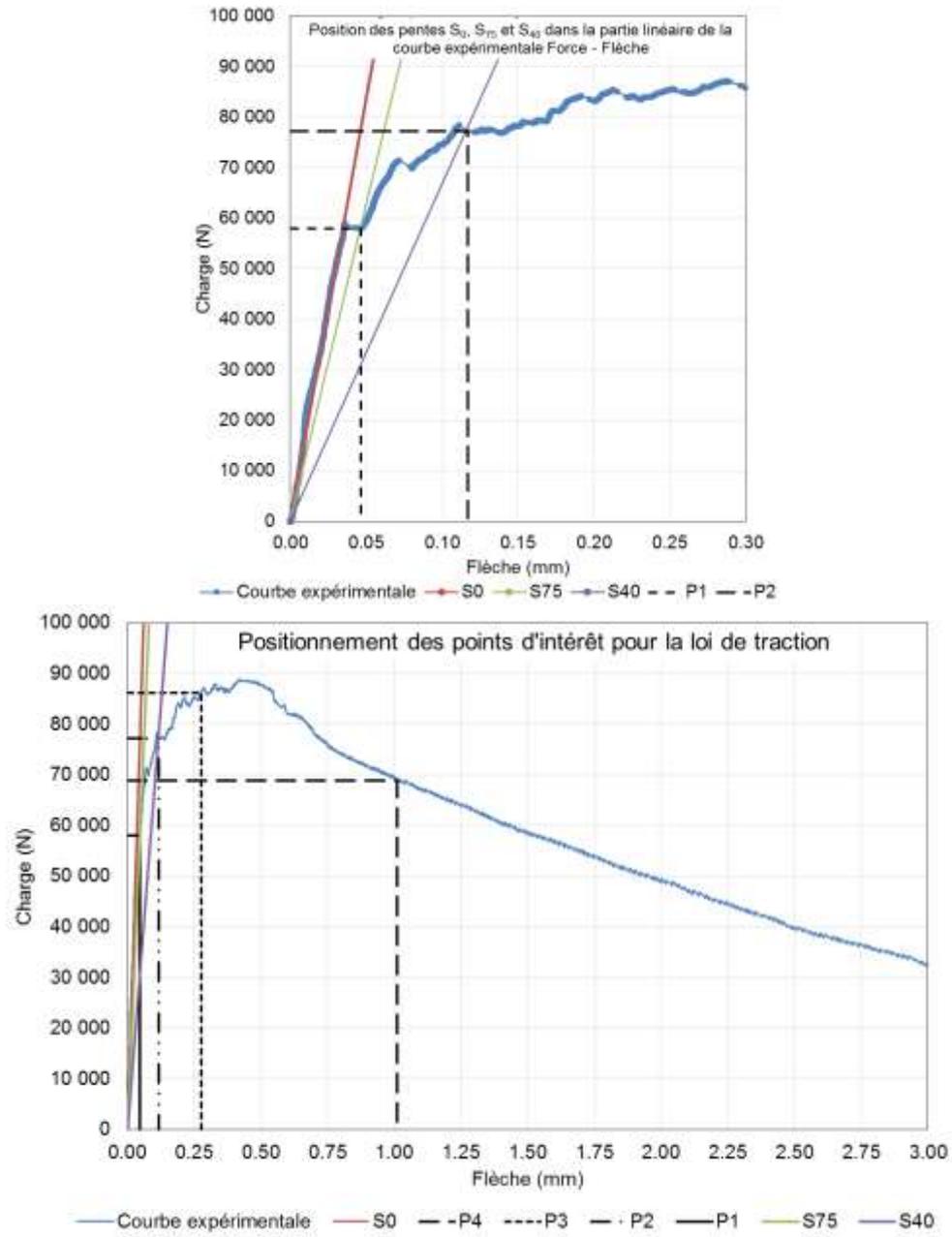


Figure 79 Échantillon A3

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

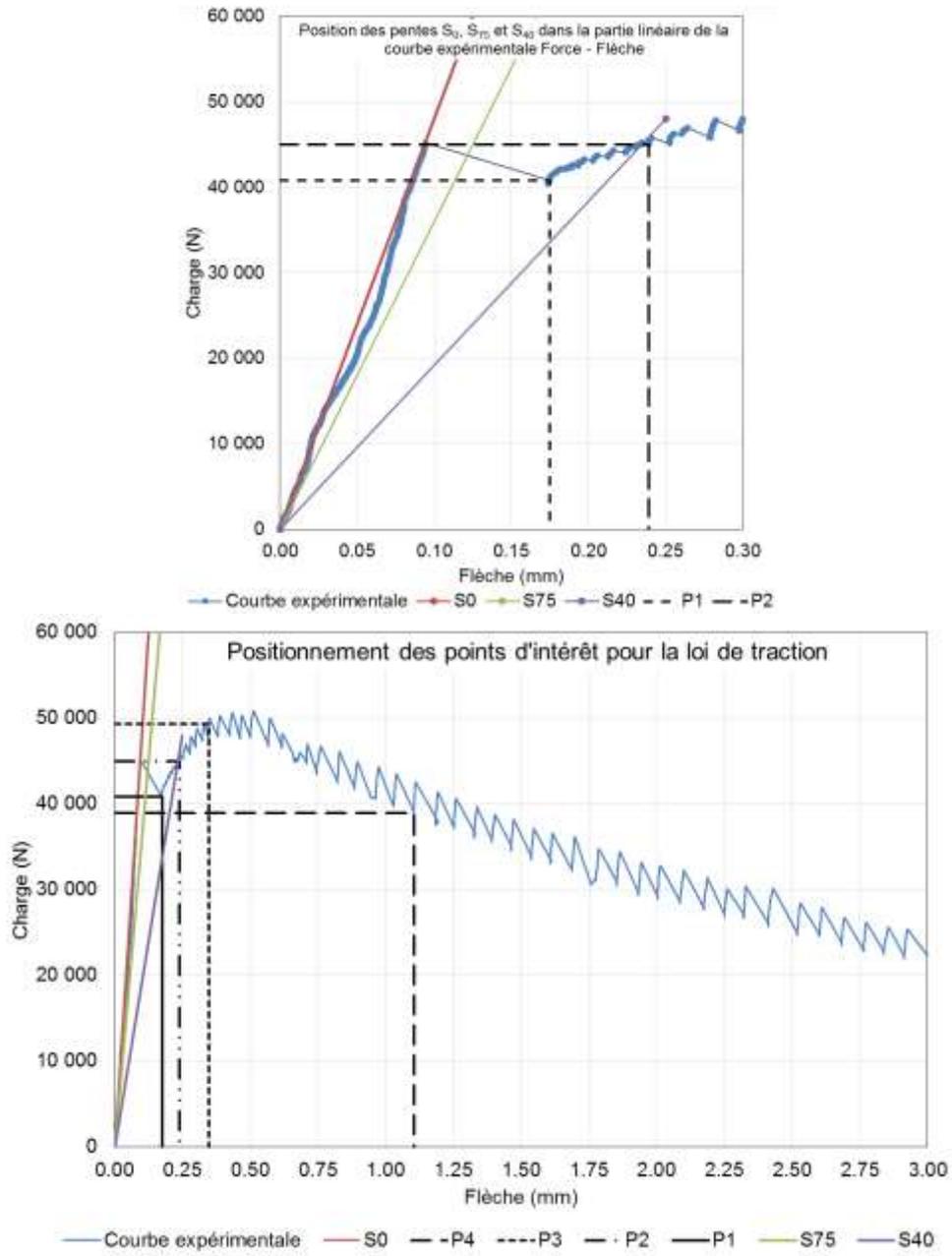


Figure 80 Échantillon B3

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

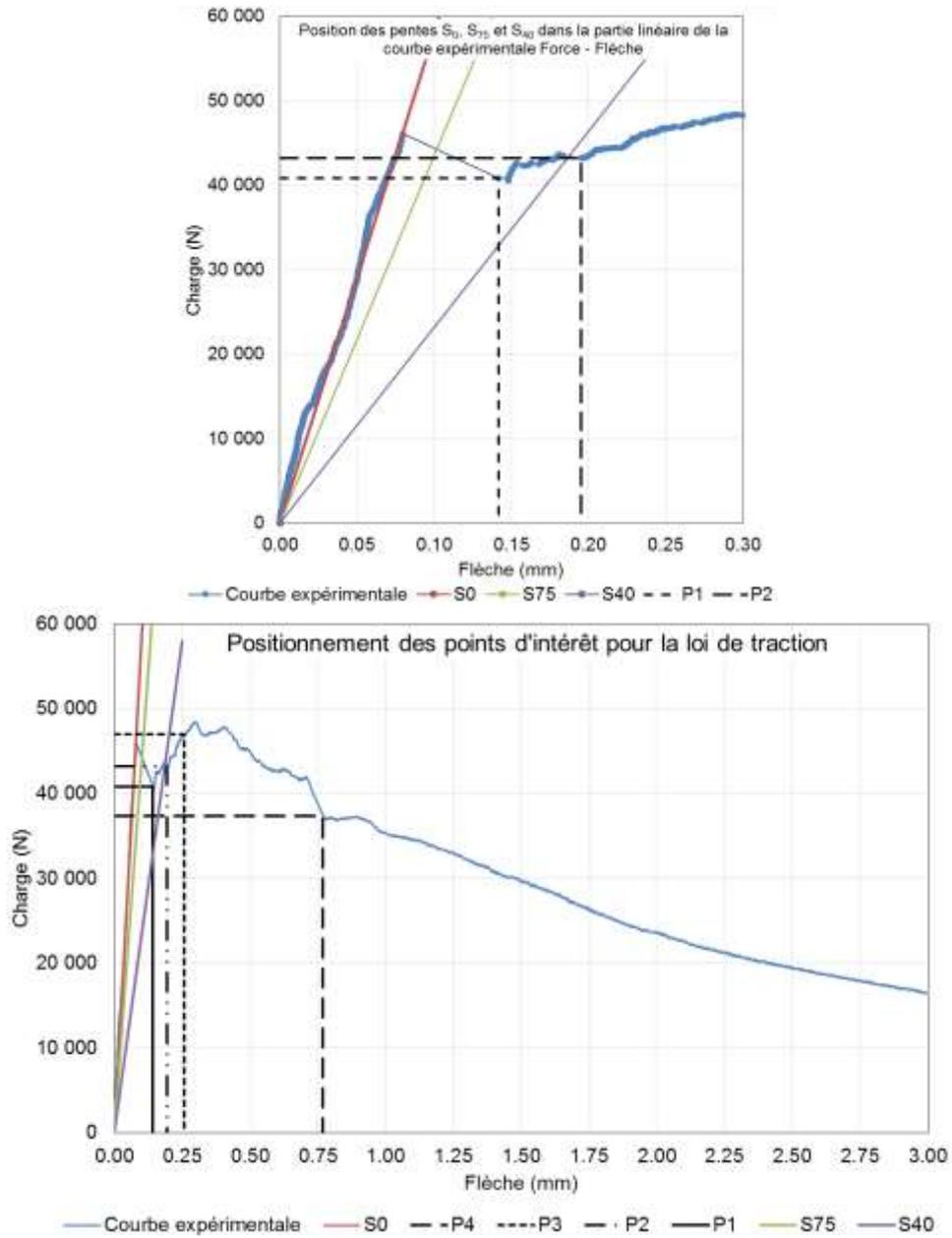


Figure 81 Échantillon D1

**ENCADREMENT DE L'UTILISATION DU BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT (BFUP)
AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**

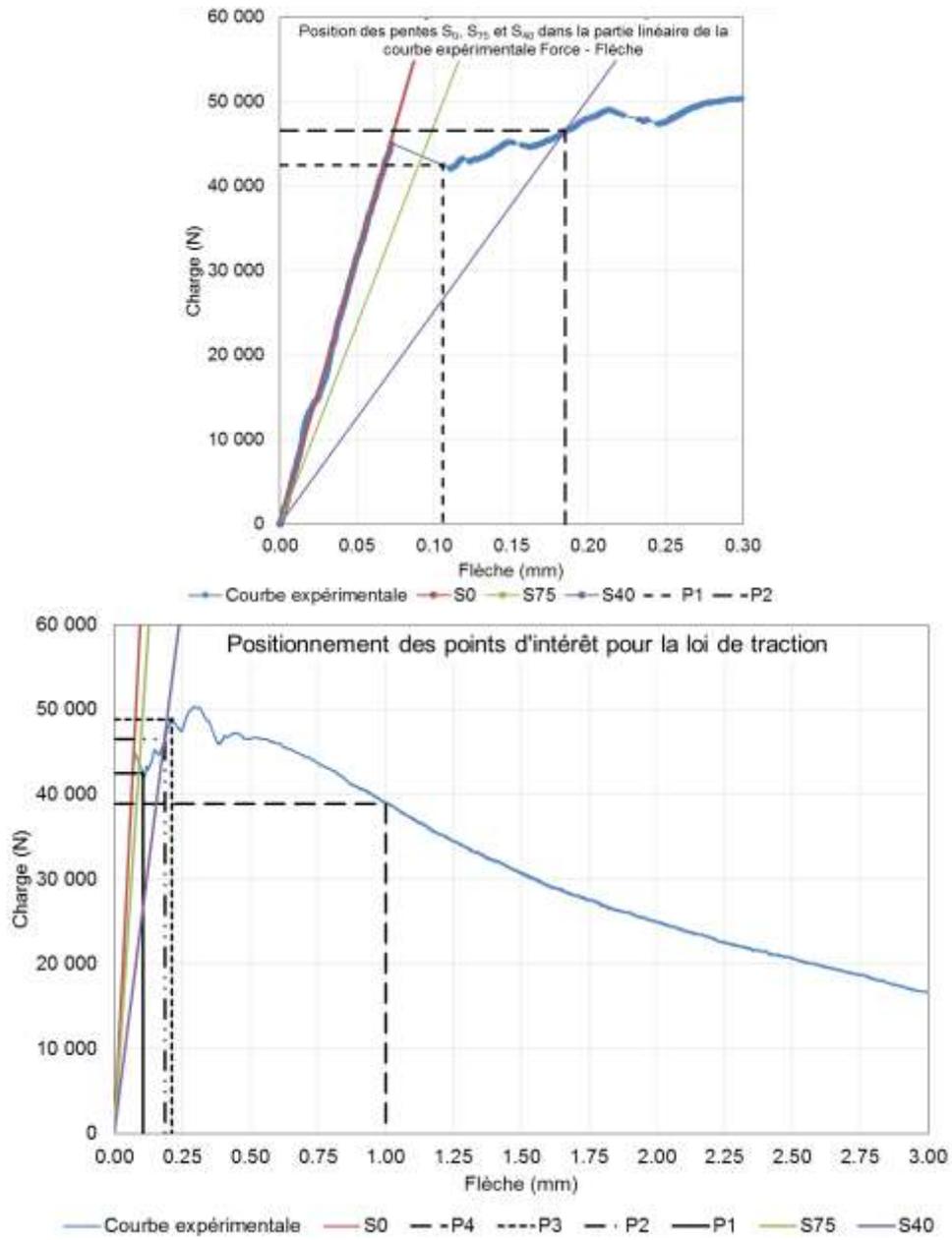


Figure 82 Échantillon D2