

Titre: Caractérisation de la performance en service des chapes minces en bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) pour dalles de pont et industrielles
Title:

Auteur: Samia Meftah
Author:

Date: 2025

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Meftah, S. (2025). Caractérisation de la performance en service des chapes minces en bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) pour dalles de pont et industrielles [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/65566/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/65566/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Jean-Philippe Charron
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

Affiliée à l'Université de Montréal

Caractérisation de la performance en service des chapes minces en bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) pour dalles de pont et industrielles

SAMIA MEFTAH

Département des génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie civil

Avril 2025

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

Affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Caractérisation de la performance en service des chapes minces en bétons
fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) pour dalles de pont et industrielles**

présentée par **Samia MEFTAH**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Bruno MASSICOTE, président

Jean-Philippe CHARRON, membre et directeur de recherche

Pierre LÉGER, membre

DÉDICACE

Je dédie ce travail de mémoire à mes chers parents Hamid Meftah et Aicha Sabbahi, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mon parcours d'études,

À mon précieux offre du Dieu, mon mari, Aymane Timilla,

À mes frères, Souhail Meftah et Saâd Meftah, pour leurs encouragements et leur soutien inconditionnel qui m'ont donné la force de persévérer.

Enfin, je dédie ce travail à ceux qui m'estiment et même ceux qui m'ont oublié et dont je me rappelle toujours et à tous ceux qui m'ont aidé pour la réalisation finale de ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Il est d'usage de commencer la rédaction d'un mémoire par une page de remerciements car ce travail n'aurait pu aboutir sans la contribution de nombreuses personnes qui ont toujours répondu à mes sollicitations avec indulgence et leurs encouragements m'ont permis de finaliser ce projet de maîtrise.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, le professeur Jean-Philippe Charron, ainsi qu'à son associée de recherche, Clélia Desmettre. Leur confiance, leur expertise, leur encadrement scientifique rigoureux, ainsi que leur accompagnement constant tout au long de ce projet ont été essentiels à la réussite de ce mémoire. Leurs conseils avisés, leur sens critique, leurs relectures attentives et leurs encouragements ont grandement enrichi ma réflexion et m'ont permis de surmonter les différentes étapes de ce travail avec sérénité. Je leur suis également très reconnaissante pour leur disponibilité, leur bienveillance et l'attention qu'ils ont portée à mes nombreuses sollicitations. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance la plus sincère.

Je souhaite également remercier l'EHTP et l'École Polytechnique de Montréal pour m'avoir permis de réaliser ce double diplôme.

Un grand merci à toute l'équipe technique du Laboratoire des Structures de l'École Polytechnique de Montréal pour leur soutien précieux dans la réalisation des travaux expérimentaux. Leur savoir-faire, leur rigueur, leur implication ainsi que leur bonne humeur ont largement contribué à rendre les séances de laboratoire à la fois efficaces et agréables.

Je tiens à remercier nos partenaire et sponsors pour les dons de matériels et la bourse accordée dans la réalisation du présent projet. En particulier la Ville de Montréal, et l'équipe technique du laboratoire de la division de l'expertise et du soutien technique de la Ville de Montréal, je souligne l'apport important de David Landry et Sylvie Roberge à me transférer beaucoup d'informations sur les procédures en laboratoire et m'aider à les réaliser.

Je remercie également les professeurs Bruno Massicote et Pierre Léger d'accepter d'évaluer ce mémoire de maîtrise.

Enfin, merci à toutes les personnes, qui de près ou de loin, m'ont aidé pour la réalisation de mes travaux de laboratoire.

RÉSUMÉ

Depuis plusieurs décennies, le Québec est confronté à une dégradation accélérée de ses infrastructures, notamment les dalles de béton soumises à un trafic routier intense et à l'usage intensif de sels de déglacage en période hivernale. Ces conditions provoquent des dégradations par gel-dégel, abrasion et la corrosion des armatures, compromettant la durabilité des structures.

Afin d'améliorer la performance et la longévité des dalles de pont et industrielles, ce projet de maîtrise explore la caractérisation de la performance en service des chapes minces en bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP). Ces chapes visent à offrir une surface de roulement durable et étanche, sans recours à une membrane d'étanchéité et un enrobé bitumineux. Les propriétés mécaniques exceptionnelles du BFUP, notamment sa résistance élevée à la traction et sa faible perméabilité, en font un candidat idéal pour ce type d'application.

Deux programmes expérimentaux ont été menés. Le premier programme a évalué les performances de chapes avec différentes surfaces de roulement en BFUP et en béton ordinaire (BO) selon des critères de résistance à l'écaillage et à l'abrasion de même que d'adhérence selon les normes CSA A23.2-22C (2019), ASTM C944 (2019) et ASTM E303 (2022) respectivement. Trois types de finitions de surface ont été testés pour le BFUP (lisse, rainurée, et à granulats/fibres exposés), tandis que seul la finition lisse a été étudiée pour le BO. L'étude a clairement démontré la supériorité de la chape en BFUP par rapport à celle en BO en matière de durabilité face aux sollicitations environnementales et mécaniques. En ce qui concerne l'écaillage, les chapes en BFUP ont affiché des performances nettement supérieures, avec des pertes de masse réduites de 83 % pour la surface lisse après 56 cycles de gel-dégel en présence de sels. Toutes les finitions de BFUP ont présenté des pertes bien en-dessous de la limite normative de 0,5 kg/m², même si les surfaces à granulats/fibres exposés et rainurées ont présenté des pertes plus importantes atteignant respectivement 15 fois et 2.2 fois celles de la surface lisse. Du point de vue de la résistance à l'abrasion, la chape en BFUP a également démontré une performance nettement supérieure, avec des pertes de masse 76 % inférieures à celles du BO en surface lisse. Même après un endommagement préalable par écaillage, la chape en BFUP conserve un avantage notable avec une résistance à l'abrasion 61 % plus élevée. Cependant, les finitions plus rugueuses ont montré une réduction de la résistance à l'abrasion, notamment la surface rainurée, dont les pertes atteignent jusqu'à 6.8 fois celles de la surface lisse. En ce qui concerne le critère d'adhérence, toutes les

surfaces testées ont respecté la limite minimale suggérée par la Ville de Montréal ($BPN \geq 55$), avec des indices similaires pour les surfaces lisses en BFUP et BO (environ 70). La meilleure adhérence a été mesurée sur la finition rainurée transversalement ($BPN = 91$), bien que cette configuration soit moins adaptée aux zones urbaines en raison du bruit qu'elle génère.

Le deuxième programme a étudié la performance des joints de construction (droits, inclinés, en escalier) à l'aide de tirants en béton armé, soumis à des essais de traction et de perméabilité à l'eau simultanément. Les chapes en BFUP sans joint ont démontré une performance exceptionnelle en termes de résistance mécanique et d'étanchéité. Lorsque soumises au chargement en traction uniaxiale, les chapes en BFUP n'ont présenté aucune fissuration localisée jusqu'à la plastification de l'armature (au-delà de 40 kN), et ont conservé une rigidité élevée tout au long du chargement. Sur le plan de la perméabilité, leur coefficient est resté inférieur à 5×10^{-10} m/s, soit au minimum l'équivalent de celui de la matrice d'un béton ordinaire sain. En comparaison, les chapes en BO sans joint ont fissuré dès 23 kN et perdu leur étanchéité à 25 kN, atteignant une perméabilité ultime de 1.1×10^{-7} m/s. Ensuite, la présence de joints froids influence fortement le comportement de la chape. Les joints inclinés dans la chape en BFUP sont les plus performants, assurant une rigidité en traction environ 2.7 fois supérieure à celle des joints droits, et une perméabilité extrêmement faible ($< 5 \times 10^{-10}$ m/s), soit plus de 8 400 fois inférieure à celle du joint droit en BFUP ($K_w = 4.2 \times 10^{-6}$ m/s). Les joints en escalier offrent un bon compromis, bien que leur rigidité soit plus faible (jusqu'à 5.9 fois inférieure à celle du joint incliné), ils conservent une étanchéité satisfaisante. En revanche, les joints droits en BFUP sont à éviter. Leur ouverture est rapide sous chargement de traction, leur rigidité chute rapidement, et leur perméabilité augmente significativement, elle demeure cependant 7.4 fois inférieure à celle d'un joint droit en BO ($K_w = 3.1 \times 10^{-5}$ m/s).

En conclusion, les résultats des essais complétés dans ce projet montrent qu'une chape en BFUP bien mise en œuvre, en zone continue et aux joints froids de coulées, offre un excellent comportement mécanique et une durabilité prolongée qui ne requiert pas de membrane d'étanchéité, même sous fortes sollicitations mécaniques et en conditions sévères d'exposition. Une chape en BFUP avec rainures longitudinales et joints inclinés est recommandée.

ABSTRACT

For several decades, Quebec has been facing accelerated degradation of its infrastructure, particularly concrete slabs exposed to heavy road traffic and intensive use of de-icing salts. These conditions cause freeze-thaw damage, abrasion, and reinforcement corrosion, compromising the durability of the structures.

To improve the performance and longevity of concrete pavement slabs for road and industrial use, this master's project explores the characterization of the service performance of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPC) thin overlays. These overlays are designed to deliver a long-lasting, waterproof riding surface, eliminating the need for an additional waterproofing membrane and an asphalt overlay. Thanks to its exceptional mechanical properties particularly high tensile strength and low permeability, UHPC is an ideal material for such applications.

Two experimental programs were conducted. The first program evaluated the performance of UHPC and ordinary concrete (OC) overlays with various surface finishes, based on scaling resistance, abrasion resistance, and skid resistance, in accordance with CSA A23.2-22C (2019), ASTM C944 (2019), and ASTM E303 (2022), respectively. Three types of surface finishes were tested for the UHPC (smooth, grooved, and exposed aggregates/fibers), while only the smooth finish was studied for the OC. The study clearly demonstrated the superiority of the UHPC overlay compared to the OC one under environmental and mechanical stresses. In terms of scaling, UHPC showed significantly better performance, with mass loss reduced by 83% for the smooth surface after 56 freeze-thaw cycles with de-icing salts. All UHPC finishes exhibited losses well below the normative limit of 0.5 kg/m², although the exposed aggregates/fibers and grooved surfaces showed higher losses, reaching 15 times and 2.2 times those of the smooth surface, respectively. In terms of abrasion resistance, the UHPC overlay also demonstrated significantly superior performance, with mass losses 76% lower than those of the smooth OC surface. Even after prior scaling damage, the UHPC overlay maintained a notable advantage, with abrasion resistance 61% higher. However, rougher finishes showed a reduction in abrasion resistance, particularly the grooved surface, whose losses reached up to 6.8 times those of the smooth surface. Regarding skid resistance, all tested surfaces met the minimum threshold suggested by the City of Montreal ($BPN \geq 55$), with comparable values around 70 for smooth UHPC and OC surfaces. The best skid resistance was

recorded for the transversely grooved finish (BPN = 91), though it is less suitable in urban settings due to noise generation.

The second experimental program investigated the performance of construction joints (straight, inclined, and stepped) using reinforced concrete tie specimens subjected to simultaneous tensile and water permeability tests. UHPC overlays without joints demonstrated exceptional mechanical strength and watertightness. When subjected to uniaxial tensile loading, UHPC overlays exhibited no localized cracking up to the yielding of the reinforcement (beyond 40 kN), and maintained high stiffness throughout the loading. In terms of permeability, their coefficient remained below 5×10^{-10} m/s, which is at least equivalent to that of a healthy ordinary concrete matrix.

In comparison, jointless OC overlays cracked as early as 23 kN and lost watertightness at 25 kN, reaching a final permeability of 1.1×10^{-7} m/s. Furthermore, the presence of cold joints strongly influences the behavior of the overlay. Inclined joints in UHPC overlays proved to be the most effective, providing tensile stiffness approximately 2.7 times greater than that of straight joints, and extremely low permeability ($< 5 \times 10^{-10}$ m/s), more than 8 400 times lower than that of straight UHPC joints ($K_w = 4.2 \times 10^{-6}$ m/s).

Stepped joints offered a good compromise: although their stiffness was lower (up to 5.9 times less than that of inclined joints), they maintained satisfactory watertightness. On the other hand, straight joints in UHPC are not recommended. They open rapidly under tensile loading, lose stiffness quickly, and their permeability increases significantly although it still remains 7.4 times lower than that of a straight joint in OC ($K_w = 3.1 \times 10^{-5}$ m/s).

In conclusion, the test results obtained in this project show that a well-executed UHPC overlay, placed continuously with optimized cold joints, provides excellent mechanical behavior and long-term durability, eliminating the need for a waterproofing membrane even under high mechanical stress and severe exposure conditions. A UHPC overlay with longitudinal grooves and inclined joints is recommended.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES.....	XV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XXII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Objectifs du projet.....	6
1.3 Méthodologie	6
1.3.1 Évaluation de la performance en service de la surface de roulement en BFUP...6	
1.3.2 Évaluation du comportement en service des joints de construction.....7	
1.4 Portée.....	7
1.5 Organisation du mémoire	8
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	9
2.1 Béton Fibré à Ultra-Hautes Performances (BFUP).....	9
2.1.1 Historique	9
2.1.2 Composition	10
2.1.3 Comportement mécanique.....	12
2.1.4 Retrait	17
2.1.5 Durabilité.....	19
2.1.6 Propriétés de transport à l'état fissuré	22
2.1.7 Autres avantages du BFUP	23

2.1.8	Synthèse sur les propriétés et avantages du BFUP	30
2.2	Chapes en béton	31
2.2.1	Concepts des chapes en béton	31
2.2.2	Étapes de réalisation d'une chape mince en BFUP	33
2.2.3	Retour d'expérience sur les chapes en BFUP	51
2.2.4	Synthèse	61
CHAPITRE 3 PERFORMANCE EN SERVICE DE LA SURFACE DE ROULEMENT DE LA CHAPE EN BFUP		63
3.1	Bétons à l'étude	63
3.1.1	Composition	63
3.1.2	Propriétés à l'état frais	65
3.1.3	Propriétés à l'état durci	66
3.2	Comportement à l'écaillage	70
3.2.1	Programme expérimental	70
3.2.2	Développement de l'essai	72
3.2.3	Résultats du programme expérimental	81
3.2.4	Conclusions sur le comportement à l'écaillage	90
3.3	Comportement à l'abrasion	91
3.3.1	Programme expérimental	91
3.3.2	Développement de l'essai	93
3.3.3	Résultats du programme expérimental	99
3.3.4	Conclusions sur le comportement à l'abrasion	112
3.4	Comportement à l'adhérence	113
3.4.1	Programme expérimental	113
3.4.2	Méthode d'essai	113
3.4.3	Mesures d'adhérence préliminaires sur des surfaces de BO ayant différentes rugosités	115
3.4.4	Résultats du programme expérimental	117

3.4.5	Conclusions sur le comportement à l'adhérence	119
3.5	Synthèse des résultats	120
CHAPITRE 4 PERFORMANCE EN SERVICE DES JOINTS DE LA CHAPE EN BFUP ...		
	122
4.1	Procédure expérimentale	122
4.1.1	Géométrie des tirants	122
4.1.2	Bétons à l'étude	124
4.1.3	Types de joints	125
4.1.4	Production des tirants	126
4.1.5	Dispositif de perméabilité à l'eau	129
4.1.6	Dispositif de chargement en traction	133
4.2	Programmes expérimentaux	134
4.2.1	Programme préliminaire	134
4.2.2	Programme principal	135
4.3	Résultats du programme expérimental préliminaire	136
4.3.1	Comportement en traction des tirants	136
4.3.2	Perméabilité à l'eau des tirants	137
4.3.3	Analyse et conclusions	138
4.4	Résultats du programme expérimental principal	139
4.4.1	Méthode d'analyse du comportement en traction des tirants	140
4.4.2	Comportement en traction des tirants sans joint	140
4.4.3	Comportement en traction des tirants avec joint	142
4.4.4	Méthode d'analyse de la perméabilité à l'eau des tirants	148
4.4.5	Perméabilité à l'eau sous chargement des tirants sans joint	148
4.4.6	Perméabilité à l'eau sous chargement des tirants avec joint	150
4.4.7	Analyse et conclusions	154
CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		159
5.1	Rappel des objectifs	159

5.2	Performance en service de la chape en BFUP.....	159
5.2.1	Résistance à l'écaillage	159
5.2.2	Résistance à l'abrasion	160
5.2.3	Mesures d'adhérence	162
5.2.1	Bilan	163
5.3	Performance en service des joints de la chape en BFUP	163
5.3.1	Comportement entre les joints de construction	163
5.3.2	Comportement aux joints de construction.....	164
5.4	Recommandations et perspectives	165
5.4.1	Optimisation de la finition de la chape en BFUP	165
5.4.2	Optimisation de la forme des joints froids en BFUP	166
5.4.3	Programme d'essais complémentaires	167
5.4.4	Modèles numériques	168
RÉFÉRENCES.....		169

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Caractéristiques des catégories de béton considérées (Charron & Desmettre, 2013)	11
Tableau 2.2 Indicateurs de durabilité à l'état non fissuré, pour différentes gammes de bétons (Charron & Desmettre, 2013).....	20
Tableau 2.3 Comparaison des coûts du cycle de vie pour un pont avec chape mince en BFUP en comparaison à une chape au béton modifié au latex ou à un nouveau tablier de pont préfabriqué, selon différentes méthodes de mise en œuvre des chapes (McDonagh, 2022).	25
Tableau 3.1 Composition du BO.....	64
Tableau 3.2 Composition du BFUP	65
Tableau 3.3 Propriétés à l'état frais du BO et BFUP (G1&G2)	66
Tableau 3.4 Essais de caractérisation à l'état durci pour le BO et BFUP	66
Tableau 3.5 Propriétés à l'état durci des BO et BFUP produits.....	69
Tableau 3.6 Conditions testées en écaillage selon la norme CSA A23.2-22C (2019).....	70
Tableau 3.7 Pertes en écaillage mesurées à chacune des pesées effectuées (en kg/m ²) sur le BFUP et BO à fini de surface lisse.....	82
Tableau 3.8 Pertes en écaillage cumulatives (en kg/m ²) du BFUP et BO à fini de surface lisse..	82
Tableau 3.9 Pertes en écaillage cumulatives du BFUP pour les finis de surface avec granulats/fibres exposés et rainuré	86
Tableau 3.10 Pertes en écaillage cumulatives du BFUP pour le fini de surface granulas/fibres exposés, avec considération ou non des fibres présentes dans les débris	86
Tableau 3.11 Moyennes des pertes en écaillage cumulatives du BFUP, pour les finis de surface lisse, rainuré et granulas/fibres exposés, avec considération ou non des fibres présentes dans les débris.....	87
Tableau 3.12 Conditions testées en abrasion selon la norme ASTM C944 (2019)	93

Tableau 3.13 Pertes de masse cumulatives moyennes (en grammes) des plaques de BFUP et de BO lisses, intacts ou avec écaillage durant les trois cycles d'abrasion.....	101
Tableau 3.14 Pertes moyennes de masse par cycle d'abrasion des plaques de BFUP et de BO lisses, intacts ou avec écaillage	103
Tableau 3.15 Effet de l'écaillage sur les pertes de masse cumulatives moyennes (en grammes) des spécimens en BFUP pour les différents finis de surface étudiés.....	106
Tableau 3.16 Effet du fini de surface sur les pertes de masse cumulatives moyennes (en grammes) des spécimens en BFUP intacts ou avec écaillage	107
Tableau 3.17 Pertes moyennes de masse par cycle d'abrasion des spécimens de BFUP, intacts ou pré-écaillés, granulats/fibres exposés et rainuré.....	109
Tableau 3.18 Conditions testées en adhérence selon la norme ASTM E303 (2022)	113
Tableau 3.19 Indices BPN obtenus sur différents finis CSP en BO	117
Tableau 3.20 Indices BPN pour le BO et BFUP avec un fini lisse	117
Tableau 3.21 Indices BPN pour le BFUP avec différents finis de surface	118
Tableau 4.1 Tirants en BFUP testés lors du programme préliminaire	135
Tableau 4.2 Tirants en BFUP et BO testés lors du programme principal	135
Tableau 4.3 Rigidités élastique, en service et ultime des tirants sans joint (en kN/mm)	141
Tableau 4.4 Rigidités élastique, en service et ultime des tirants en BO et BFUP avec joint droit (en kN/mm)	143
Tableau 4.5 Rigidités élastiques, en service et ultime des tirants avec différentes configurations de joints (en kN/mm)	146
Tableau 4.6 Forces de perte d'étanchéité (en kN) et coefficients de perméabilité à l'eau (en m/s) en service et à l'ultime des tirants en BFUP et BO sans joint	149
Tableau 4.7 Forces de perte d'étanchéité (en kN) et coefficients de perméabilité à l'eau (en m/s) en service et à l'ultime des tirants en BFUP et BO avec joint droit	151
Tableau 4.8 Forces de perte d'étanchéité et des coefficients de perméabilité à l'eau en service et ultimes des tirants du BFUP avec différentes configurations de joints.....	153

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Exemples de dégradations observées dans les dalles en béton armé (Sritharan et al., 2018).....	2
Figure 1.2 Zone détériorée sur la voie en direction ouest du Laporte Road à Iowa, États-Unis (FHWA-HRT-17-096, 2017)	3
Figure 1.3 Réparation de dalle de pont à l'aide du a) BFUP pour protection (durabilité) ou b) du BFUP armé pour renforcement, c) Viaduc de Chillon (Sritharan et al., 2018), d) Pont Blackbird Station Road (Abellán-García et al., 2024a)	4
Figure 2.1 Illustrations de la composition des a) BO, b) BHP, c) BFHP et d) BFUP, pour un même volume de béton (Charron)	10
Figure 2.2 Comportement en compression du BFUP avec et sans fibres (Hassan et al., 2012) ...	13
Figure 2.3 Comportement en traction du BFUP : a) Courbes contraintes-déformations moyennes obtenues à différentes échéances sur des os (5x10x70 cm) d'un BFUP contenant 2.5 % vol. de fibres et b) paramètres extraits ces courbes (Kamen, 2007).....	14
Figure 2.4 Pertes de masse par abrasion (en grammes) obtenues selon la norme (ASTM C944, 1999, 2019) par a) Graybeal et Tanesi (2007) et b) Ralli (2023).....	16
Figure 2.5 Effet des fibres d'acier sur le retrait du BFUP (Zhang et al., 2019).....	18
Figure 2.6 Résistance à l'écaillage du BFUP a) Perte de masse selon la (CSA A23.2:19, 2019) et l'(ASTM C672, 2016) b) Évaluation visuelle de l'écaillage après 50 cycles c) Résidu cumulatif d'écaillage pour les tests selon les deux normes (Ralli, 2023)	22
Figure 2.7 Composition typique du BFUP avec les coûts de production associés (Abellán-García et al., 2024a)	24
Figure 2.8 Comparaison de l'impact environnemental des deux conceptions de ponts, dont l'une avec du BFUP (Batoz & Rivallain, 2010).....	28

Figure 2.9 a) Passerelle Bouveret à proximité de l'embouchure du Rhône dans le Lac Léman (Suisse), b) Passerelle Martinet en ruche d'abeille à Lausanne (Suisse) (Bertola et al., 2021)	29
Figure 2.10 a) Chape mince en BFUP (Piérard, 2008) b) zoom sur le BFUP superposé sur du BO montrant la différence apparente entre les deux matériaux (Bertola et al., 2021)	33
Figure 2.11 Surface de tablier préparée par hydrodémolition a) (FHWA-HRT-22-065, 2022) b) (Khayat et al., 2023)	35
Figure 2.12 Résultats avec l'hydrodémolition a) Apparence des surfaces de substrat préparé par hydrodémolition b) Agrégats intacts dans le substrat du béton traité par hydrodémolition (Haber et al., 2018)	36
Figure 2.13 Configuration du test de traction directe utilisé par Haber et al. (2018) et Al-Basha et al. (2019)	37
Figure 2.14 Scarification a) Apparence des surfaces de substrat préparées par scarification b) Granulats détériorés dans le substrat en béton ordinaire préparé par scarification (Haber et al., 2018)	38
Figure 2.15 Surface de rupture d'un échantillon avec substrat en béton scarifié testé en traction directe (Haber et al., 2018)	39
Figure 2.16 a) Finition de surface par grenaillage b) Équipement utilisé (Helsel et al., 2023)	40
Figure 2.17 Finition de surface par sablage a) rugosité du substrat obtenue b) Équipement utilisé (Helsel, 2023)	40
Figure 2.18 Meulage au diamant de la surface du pont Z (Khayat et al., 2023)	41
Figure 2.19 Caractérisation de la rugosité de surface du substrat pour différentes méthodes de préparation : classement de la surface la plus rugueuse à la moins rugueuse selon l'échelle CSP de l'ICRI (Helsel et al., 2023)	42
Figure 2.20 Mise en place du BFUP a) nettoyage de la surface en béton après l'hydrodémolition, b) épaisseur prévue de la chape en BFUP (1.5 pouces), c) pré-humidification du substrat avant la coulée du revêtement pour avoir un état SSS, d) mise en place du BFUP, e) matériaux secs	

dans des gros sacs,f) chargement des matériaux dans le malaxeur et g) finition de la surface du BFUP avec des râtaux, une règle vibrante et des truelles (Khayat, 2023)	45
Figure 2.21 Mise en place de la chape en BFUP à l'aide d'un mini camion-benne et son compactage avec une règle truelle vibrante (Haber et al., 2018)	46
Figure 2.22 Finition avec fibres exposées sur un joint de construction de BFUP (FHWA-HRT-22-065, 2022).....	47
Figure 2.23 Détail du joint de construction en escalier pour une chape mince en BFUP, a) Schéma, b) Photo du joint de la chape en BFUP du pont I-295 au-dessus de Mantua Creek à Paulsboro, et de sa préparation de surface avec fibres exposées (FHWA-HRT-22-065, 2022)	48
Figure 2.24 Cure du BFUP, a) Application d'un retardateur d'évaporation au BFUP fini, b) Toile de jute humide et feuille de plastique (Khayat, 2023).....	50
Figure 2.25 Apparition de fissures sur la 1 ^{ère} coulée d'une chape mince de BFUP (Alvarez et al., 2024).....	50
Figure 2.26 Finition de surface du BFUP à l'aide de la scarification (Wibowo & Sritharan, 2018)	51
Figure 2.27 Résistance de l'adhérence en traction entre les revêtements en BFUP et le substrat en béton (Helsel, 2023)	52
Figure 2.28 Exemple de différents niveaux d'exposition des granulats, a) faible exposition, b) exposition moyenne, c) exposition élevée (FHWA-HRT-16-081)	53
Figure 2.29 Résistance d'adhérence en traction directe d'un coulis cimentaire sans retrait et d'un BFUP en fonction du niveau d'exposition des granulats (FHWA-HRT-16-081)	53
Figure 2.30 Adhérence au substrat, résultats des tests en laboratoire et in-situ (Haber et al., 2018)	54
Figure 2.31 Fissures apparentes en surface des chapes mince en BFUP sur le pont, a) Route Z, b) Route M (Khayat et al., 2023).....	56
Figure 2.32 État des maquettes du pont m : a) Surface intacte de la maquette A, b) Vue rapprochée des fissure observées à la surface des revêtements en BFUP de la maquette B (Khayat et al., 2023).....	57

Figure 2.33 Effet de la rugosité sur la performance du joint sous, a) les contraintes de traction, b) les contraintes de cisaillement (Semendary et al., 2022)	59
Figure 2.34 Différentes préparations de surfaces du substrat du joint, a) Surface lisse (SM), b) Surface sablée (SB), c) Surface traitée à l'aiguille (NS), d) Surface lavée sous pression (PW), e) Surface rainurée (GR) (Semendary et al., 2022)	59
Figure 2.35 Finition de surface de roulement du BFUP a) peu après la mise en place b) après 2 ans en service (FHWA-HRT-22-065, 2022)	60
Figure 3.1 Dimension des spécimens de traction directe en BFUP et positions des capteurs de déplacement LVDTs (Beaudoin, 2021)	68
Figure 3.2 Comportement en traction du BFUP à l'étude : a) Courbe Contrainte- Déformation (pré-pic), b) Courbe Contrainte-Ouverture de fissure (post-pic)	70
Figure 3.3 Surfaces de béton soumises à l'écaillage : a) BO lisse, b) BFUP lisse, c) BFUP avec granulats et fibres exposés et d) BFUP rainuré	71
Figure 3.4 Préparation de la membrane Foilskin qui servira à la fabrication de la digue recueillant la solution saline.....	73
Figure 3.5 Méthodes d'application de la colle et de mise en place de la membrane Foilskin autour du spécimen.....	73
Figure 3.6 Pré-conditionnement des spécimens a) Spécimen avec la solution saline sur la surface exposée, b) Schématisation de la plaque d'écaillage (Valenza II et Scherer (2007) et c) Mise en place du polythène sur le spécimen	74
Figure 3.7 Photo de l'appareil de conditionnement utilisé pour l'application des cycles de gel-dégel	75
Figure 3.8 Plaque d'écaillage positionnées à l'intérieur de l'appareil de conditionnement	76
Figure 3.9 Premier test de la programmation de l'appareil de conditionnement.....	77
Figure 3.10 Consigne de la température du thermocouple et celle ambiante à l'intérieur de la chambre selon la norme CSA A23.2 22C (2019).....	78

Figure 3.11 Enregistrement des variations des températures pendant les premiers 70h de l'essai d'écaillage	79
Figure 3.12 Processus de récupération des débris détachés par lavage au-dessus du tamis de 2.5 mm	80
Figure 3.13 Processus de récupération des débris détachés par rinçage dans le tamis de 80 μ m .	80
Figure 3.14 Processus de séchage et pesée des débris détachés.....	81
Figure 3.15 Évolution des pertes cumulatives par écaillage au cours des cycles de gel-dégel pour les plaques de BFUP et BO avec fini lisse	83
Figure 3.16 État des surfaces exposées des plaques de BO et BFUP à surface lisse à la fin de l'essai d'écaillage, pour a) BO1, b) BO2, c) BO3, d) BFUP1, e) BFUP2 et f) BFUP3.....	85
Figure 3.17 Évolution des pertes cumulatives des spécimens de BFUP avec différents finis de surface, a) avec considération des débris de fibres pour le BFUP avec retardateur de prise, b) sans considération de ces fibres	87
Figure 3.18 Évolution des pertes cumulatives moyennes par écaillage au cours des cycles de gel dégel, pour les spécimens en BO avec fini lisse et en BFUP avec différents finis de surfaces	89
Figure 3.19: État des spécimens de BFUP à la fin de l'essai d'écaillage : (a) BFUP G/F exposé 1, (b) BFUP G/F exposé 2, (c) BFUP G/F exposé 3, (d) BFUP rainuré 1, (e) BFUP rainuré 2 et (f) BFUP rainuré 3.....	90
Figure 3.20 Détails de conception de la perceuse à colonne extrait de la norme ASTM C944 (2019)	92
Figure 3.21 Outil rotatif utilisé pour l'essai d'abrasion : a) schéma extrait de la norme ASTM C944 (2019) et b) outil fabriqué à l'interne	94
Figure 3.22 Méthodes de fixation du spécimen : a) Serrage direct, b) Serrage indirect	95
Figure 3.23 Application de la charge sur la surface d'abrasion : a) Configuration de la charge appliquée à l'aide d'une cellule de charge, b) Application de la charge à l'aide d'un poids suspendu au levier de la perceuse lors d'un essai d'abrasion	96

Figure 3.24 Ajustements pour le contrôle de la charge durant l'essai d'abrasion : a) cellule de charge, b) intégration de la cellule de charge dans le système de fixation avec plaque d'acier au-dessus pour y déposer le spécimen, c) application manuelle de la charge.....	97
Figure 3.25 Montage du groupe de recherche sur le ciment et le béton de l'Université de Sherbrooke : a) Vue d'ensemble b) Zoom sur le spécimen mis en place	99
Figure 3.26 Évolution des pertes de masse cumulatives des plaques de BFUP et de BO lisses, intacts ou avec écaillage, durant les trois cycles d'abrasion	100
Figure 3.27 Pertes de masse par cycle d'abrasion des plaques de BFUP et de BO lisses, intacts ou avec écaillage	103
Figure 3.28 État des spécimens de BFUP et BO lisses après 6 min d'abrasion : a) BO intact, b) BO avec écaillage, c) BFUP intact, d) BFUP avec écaillage	105
Figure 3.29 Évolution des pertes de masse cumulatives des spécimens de BFUP lisse, avec granulats/fibres exposés et rainuré, intacts ou avec écaillage durant les trois cycles d'abrasion	106
Figure 3.30 Pertes de masse par cycle d'abrasion des spécimens de BFUP, intacts ou avec écaillage, avec fini lisse, granulats/fibres exposés et rainuré	109
Figure 3.31 État des spécimens de BFUP, intacts ou pré-écaillés, et avec différents finis de surface, après 6min d'abrasion : BFUP Lisse : a) intact, b) pré-écaillé, BFUP granulats exposés : c) intact, d) pré-écaillé, BFUP rainuré : e) intact, f) avec écaillage	111
Figure 3.32 Pendule britannique, a) schématisation et détails de ses composants (Boulet et al., 2006), b) appareil de la Ville de Montréal utilisé pour ce projet	114
Figure 3.33 Fabrication de surfaces de béton de différentes rugosité CSP, a) plaques CSP positionnées dans les coffrages, b) finis de surface CSP obtenus sur le béton	115
Figure 4.1 Schématisation des tirants.....	123
Figure 4.2 Photographies des tirants après démoulage	123
Figure 4.3 Zones de la chape mince simulées avec les tirants avec et sans joint.....	124

Figure 4.4 Types de joints froids, a) droit, b) incliné, c) escalier configuration 1, d) escalier configuration 2	126
Figure 4.5 État de la surface du joint, a) après démoulage (photos de gauche), b) après le jet d'eau sous pression (photos de droite associées aux joints représentés à gauche)	128
Figure 4.6 Dispositif de perméabilité : a) Cellule de perméabilité et b) Le système en entier (Hubert et al., 2015).....	129
Figure 4.7 Cellule de perméabilité : a) Vue éclatée : a) Tiges filetées , b) Système de serrage, c) Réservoir d'eau en aluminium, d) Béton exposé, e) Membrane étanche et b) Photo de la cellule de perméabilité	132
Figure 4.8 Tirant positionné dans la presse a) sans la cellule de perméabilité, b) avec la cellule de perméabilité.....	134
Figure 4.9 Comportement force-déplacement en traction des tirants en BFUP avec a) joint droit et b) joint escalier configuration 1	136
Figure 4.10 Courbes force-perméabilité d'un tirant en BFUP avec joint droit.....	138
Figure 4.11 Comportement en traction des tirants en BO et BFUP sans joint.....	141
Figure 4.12 Comportement en traction des tirants en BO et BFUP avec joint droit.....	143
Figure 4.13 Visualisation du joint du tirant en BFUP joint droit2 (après essai et après humidification du tirant)	144
Figure 4.14 Courbes de traction des tirants du BFUP avec différentes configurations de joints	145
Figure 4.15 Perméabilité à l'eau des tirants en BFUP et BO sans joint.....	149
Figure 4.16 Perméabilité à l'eau des tirants du BFUP et BO avec joint droit	151
Figure 4.17 Perméabilité à l'eau des tirants du BFUP des différentes configurations de joints.	153
Figure 4.18 Comportement des tirants en BFUP sans joint et avec joint droit ou incliné : a) comportement en traction, b) comportement en perméabilité.....	155
Figure 4.19 Comportement des tirants en BO sans joint et avec joint droit : a) comportement en traction, b) comportement en perméabilité	156

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ABRÉVIATIONS

ASTM	American society for testing and materials
BFUP	Béton fibré à ultra-hautes performances
BNQ	Bureau de Normalisation du Québec
BO	Béton ordinaire
BPN	British Pendulum Number
CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
E/C	Rapport eau sur ciment
FHWA	Federal Highway Administration
GRS	Groupe de Recherche en génie des Structure de l'école Polytechnique
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MTQ	Ministère des Transports du Québec
SCRIM	Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine
SSS	Surface saturée superficiellement sèche
TWPD	Three-Wheel Polishing Device
VMSTL	Voie Maritime du Saint-Laurent

SYMBOLES

A	Aire de la surface exposée, normale à la direction du flux
E_c	Module élastique du béton (aussi appelé module de Young)
E_s	Module élastique de l'acier (aussi appelé module de Young)
F_{perte} <i>d'étanchéité</i>	Force de perte d'étanchéité
f'_c	Résistance à la compression du béton

f_t	Résistance à la traction du béton
K_w	Coefficient de perméabilité à l'eau
$K_{service}$	Coefficient de perméabilité à l'eau en service
K_{ultime}	Coefficient de perméabilité à l'eau à l'ultime
L	Longueur traversée par le flux
Q	Débit d'eau
$R_{élastique}$	Rigidités élastique
$R_{service}$	Rigidités en service
R_{ultime}	Rigidités à l'ultime
Δh	Hauteur d'eau différentielle entre l'entrée et la sortie du spécimen

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Au Québec, et plus largement, en Amérique du Nord, les dalles de ponts et dalles industrielles en béton armé sont soumises à des conditions d'exposition sévères (gel-dégel, épandage de sels de déglacage, abrasion dû au passage de véhicules lourds, etc.) (FHWA-HRT-17-096, 2017). Ces conditions d'exposition entraînent souvent des déficiences fonctionnelles ou de durabilité prématurées telles que la corrosion des armatures, la délamination, le gonflement et l'éclatement du béton (Sritharan et al., 2018), qui peuvent à terme causer des déficiences structurales. Les Figure 1.1 et Figure 1.2 illustrent certaines de ces dégradations.

De nombreuses dalles doivent alors être réparées, ce qui représente des enjeux importants en termes de gestion du réseau routier et d'impacts sociaux-économiques. Le coût de réhabilitation et de renouvellement des ponts en Amérique du Nord est estimé à des centaines de milliards de dollars (Lachemi et al., 2007).

La méthode de réparation conventionnelle actuelle pour les surfaces supérieures des dalles endommagées consiste à enlever l'enrobé bitumineux, la membrane d'étanchéité ainsi que le béton détérioré et les armatures corrodées si requis. Ces différents éléments enlevés sont ensuite tour à tour remis à neuf. En plus de comporter de nombreuses étapes, ce type de réparation présente une durabilité limitée nécessitant des réparations récurrentes (Brühwiler & Denarié, 2018). Selon les données de la Federal Highway Administration aux États-Unis (FHWA-HRT-22-065, 2022), les réparations en béton conventionnel sur les ponts doivent être refaites tous les 10 à 15 ans en moyenne. L'utilisation de techniques de réparations plus simples et plus durables, notamment via l'utilisation de matériaux de réparation plus durables, s'impose donc en vue d'allonger la durabilité de ce type de réparation et d'en limiter les impacts sociaux-économiques.

À ce titre, le béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) se présente comme un bon candidat pour ce type d'application. En comparaison au béton ordinaire (BO), le BFUP se distingue entre-autre par ses propriétés mécaniques exceptionnelles, son excellente durabilité (perméabilité plus de 1000 fois inférieure qu'au BO), un meilleur contrôle de la fissuration, une meilleure capacité de cicatrisation, une faible possibilité de délaminage et une meilleure résistance à l'abrasion (Oosterlee

et al., 2008). C'est pourquoi le BFUP est de plus en plus utilisé dans plusieurs domaines d'applications (ponts, routes, bâtiments, ouvrages hydrauliques, etc.) pour répondre à différents besoins, principalement liés à la durabilité, à la réparation et/ou au renforcement des structures (Toutlemonde et al., 2009). Plusieurs resurfaçages de dalles ont été réalisés avec du BFUP au cours des dernières années, tant en Europe de l'Ouest (Louis Guingot 2013), qu'en Asie (Behloul & Lee, 2003), en Australie (Rebentrost & Wight, 2009) et aux États-Unis (FHWA-HRT-22-065, 2022).

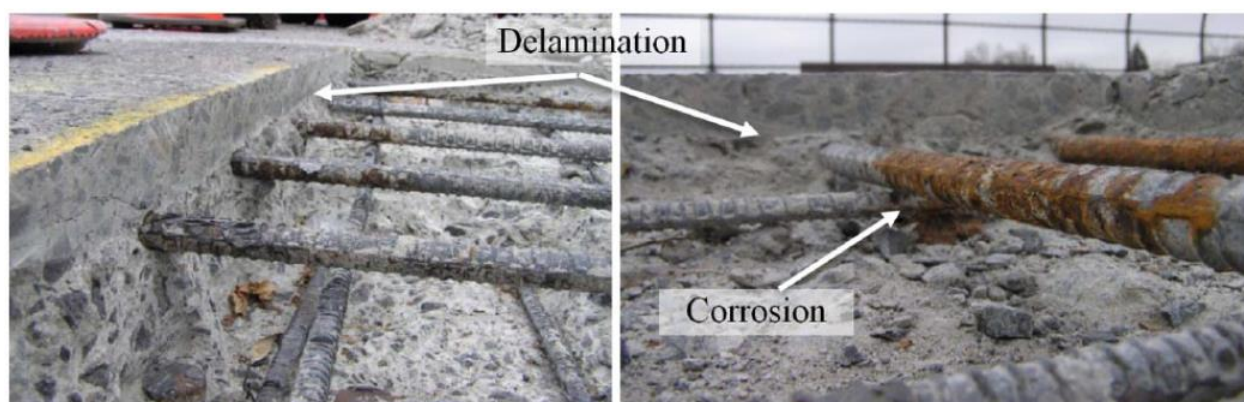


Figure 1.1 Exemples de dégradations observées dans les dalles en béton armé (Sritharan et al., 2018)



Figure 1.2 Zone détériorée sur la voie en direction ouest du Laporte Road à Iowa, États-Unis
(FHWA-HRT-17-096, 2017)

Ces resurfaçages consistent à enlever l'enrobé bitumineux, puis une profondeur plus ou moins importante de béton, selon l'état de détérioration de ce dernier et selon l'objectif de la réparation (Haber et al., 2017). Lorsque l'objectif est d'améliorer la durabilité de la dalle, notamment en empêchant la corrosion des armatures, une couche de BFUP non armé, généralement mince, est appliquée (Figure 1.3a). Lorsqu'un renforcement de la dalle est souhaité, en plus du gain de durabilité, une couche légèrement plus épaisse de BFUP avec de nouvelles barres d'armature peut être mise en place (Figure 1.3b) (Sritharan et al., 2018). Le BFUP est mis en place sans réinstaller de nouvelle membrane d'étanchéité, le BFUP faisant office de barrière d'étanchéité dû à sa très faible perméabilité. Par la suite, selon les applications, soit une couche d'enrobé bitumineux est réinstallée au-dessus du BFUP pour créer la surface de roulement, soit un fini de surface est appliqué à la surface supérieure du BFUP de telle sorte à ce que celle-ci devienne directement la surface de roulement.

La première application d'importance de réhabilitation à l'aide du BFUP a été la réfection d'une surface de 52 000 m² du tablier du viaduc de Chillon en Suisse en 2015 (Figure 1.3c) (Sritharan et al., 2018). Cette application comprenait une épaisseur de BFUP de 45 mm, qui a été recouverte d'une couche d'enrobé bitumineux de 80 mm. Une analyse du coût du cycle de vie du viaduc Chillon a montré que l'utilisation du BFUP pour le renforcer permettait de réduire

considérablement les coûts de maintenance à long terme (Brühwiler & Bastien Masse, 2015). D'autres exemples d'applications sont disponibles dans la littérature (Abellán-García et al., 2024a). La Figure 1.3d représente la reconstruction du pont Blackbird Station Road au Delaware (États-Unis) une couche de BFUP de 25 mm d'épaisseur a été coulée et ensuite scarifiée pour servir de surface de roulement sécuritaire. Pour d'autres cas, tel que les ponts Laporte Road et Mud Creek en Iowa (Haber et al., 2017), les chapes mince en BFUP non armé de 38 mm d'épaisseur ont été installées sans membrane et enrobé bitumineux. La surface de roulement en BFUP a subi la même finition que pour le pont Blackbird Station Road. Ce type de resurfaçage de dalle (chape mince en BFUP) présente un grand potentiel en termes de durabilité, grâce aux avantages du BFUP énumérés précédemment, ainsi qu'en terme de simplicité de réparation, en comparaison aux réparations conventionnelles des surfaces supérieures de dalles qui implique l'installation d'une membrane d'étanchéité et d'un enrobé.

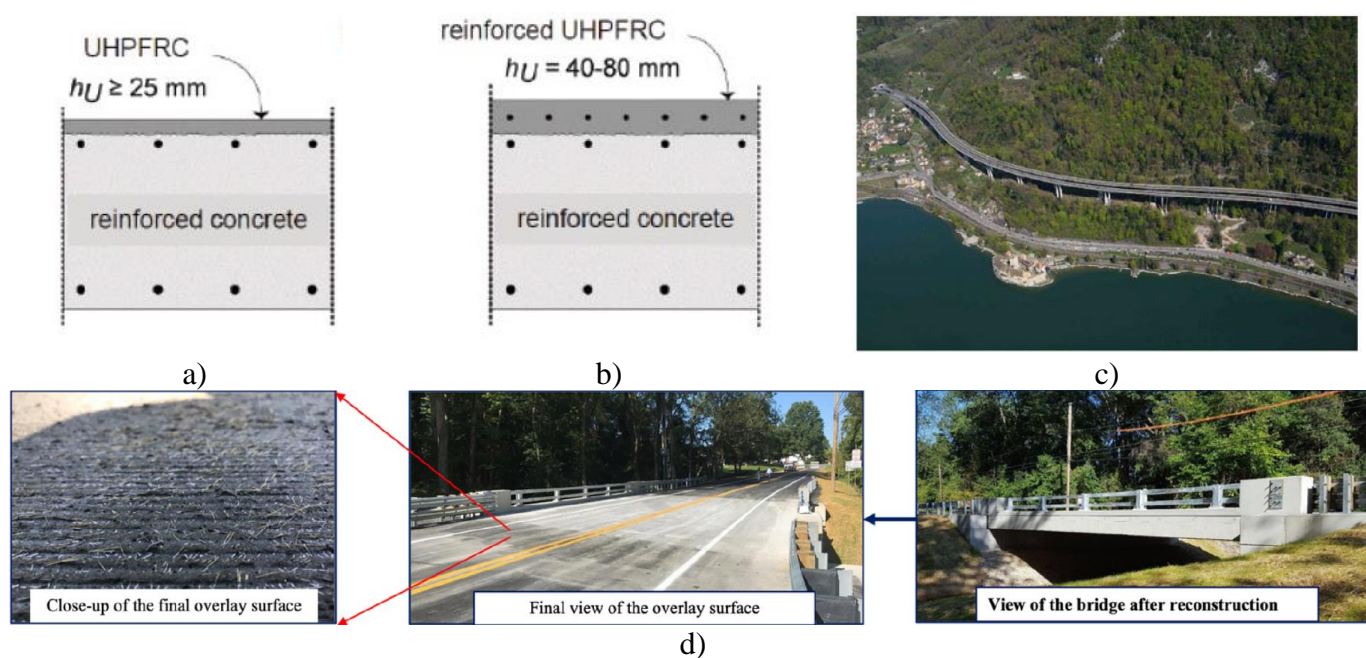


Figure 1.3 Réparation de dalle de pont à l'aide du a) BFUP pour protection (durabilité) ou b) du BFUP armé pour renforcement, c) Viaduc de Chillon (Sritharan et al., 2018), d) Pont Blackbird Station Road (Abellán-García et al., 2024a)

Bien que les applications telles que celles réalisées sur les ponts Laporte Road et Mud Creek à Iowa, sans membrane d'étanchéité et enrobé bitumineux, deviennent de plus en plus fréquentes, en particulier aux États-Unis, elles restent assez récentes. Le retour d'expérience sur la performance en service de ces chapes reste donc limité, même si les premiers résultats semblent indiquer un excellent comportement (Abellán-García et al., 2024a). Il est donc intéressant de continuer à étudier le comportement en service attendu à long terme pour ce type de chapes et à optimiser le dimensionnement de ces chapes (Wibowo & Sritharan, 2018).

La performance en service d'une chape dépend de plusieurs critères tel que la résistance à la fissuration dû au retrait du béton, l'adhérence offerte au véhicule, la résistance au gel-dégel et à l'écaillage, et la perméabilité à l'eau. La présence de joints de construction sur les chapes peut également influencer son comportement mécanique et l'étanchéité offerte. En effet, ces joints s'imposent notamment lors de la réfection de grandes surfaces, il est nécessaire de procéder par voie afin de maintenir la circulation. En plus, les volumes de production de BFUP demeurent limités.

La résistance à la fissuration du BFUP face au retrait restreint a été étudié récemment à Polytechnique dans le projet d'Abid (Abid, 2021) et s'est avérée excellente, le retrait restreint n'exploitant qu'une partie négligeable du comportement écrouissant en traction du BFUP et ne provoquant aucune fissuration.

Ce projet de recherche se focalise donc plus sur les autres aspects du comportement en service de la chape. Il vise à étudier la durabilité de la surface de roulement en BFUP vis-à-vis des sollicitations environnementales et du passage des véhicules (écaillage, adhérence, abrasion) ainsi que le comportement, sur le plan mécanique et de la durabilité (étanchéité), des joints de construction qui sont requis lors de la réfection de surfaces importantes.

Les résultats de ce projet permettront d'apporter des recommandations quant à ces aspects, afin de concevoir des chapes minces en BFUP étanches et durables, permettant l'élimination de la membrane d'étanchéité, et ayant une surface de roulement en BFUP adaptée aux passages des véhicules. Ce projet s'inscrit dans le cadre d'un partenariat de recherche avec différents acteurs de l'industrie (CRSNG, Mitacs, Sika, Corporation de Gestion de la Voie Maritime du Saint-Laurent, Ville de Montréal, Euclid Canada, les ponts Jacques Cartier et Champlain Incorporée, et Béton Préfabriqué Du Lac)

1.2 Objectifs du projet

L'objectif général de ce projet est d'étudier le comportement en service des chapes minces en BFUP sans membrane d'étanchéité et sans enrobé. De façon plus spécifique, le projet s'intéressera en particulier au comportement de la surface de roulement en BFUP ainsi qu'au comportement des joints de construction d'une telle chape mince. Les objectifs spécifiques du projet sont donc les suivants :

1. Évaluer l'adhérence, de résistance à l'écaillage et de résistance à l'abrasion de la surface de roulement en BFUP;
2. Évaluer le comportement en traction et la perméabilité à l'eau de différentes configurations de joints froids de chape mince en BFUP;
3. Proposer des recommandations concernant la finition de la surface de roulement en BFUP ainsi que la conception des joints froids en BFUP.

1.3 Méthodologie

Cette section présente la méthodologie générale adoptée afin d'atteindre les objectifs spécifiques énoncés dans la section précédente.

1.3.1 Évaluation de la performance en service de la surface de roulement en BFUP

Des méthodes d'essais normées seront tout d'abord sélectionnées afin d'évaluer l'adhérence, la résistance à l'écaillage ainsi que la résistance à l'abrasion de la surface de roulement en BFUP. Une fois sélectionnées, ces méthodes d'essais et dispositifs associés devront être développés puis validés, avant de pouvoir les utiliser pour réaliser le premier programme expérimental principal, associé au premier objectif spécifique.

Ce premier programme expérimental principal aura pour objectifs de:

- comparer l'adhérence, la résistance à l'écaillage ainsi qu'à l'abrasion du BFUP en comparaison au béton ordinaire (BO);

- évaluer ces propriétés pour différents finis de la surface en BFUP;
- couplage de l'abrasion et l'écaillage.

1.3.2 Évaluation du comportement en service des joints de construction

Il n'existe aucun essai normé pour évaluer la perméabilité à l'eau de joints froids. Un premier enjeu consistera donc à concevoir un dispositif d'essai permettant de réaliser des mesures de perméabilité d'un joint BFUP-BFUP sollicité simultanément en traction. Ce type d'essai permettra d'évaluer la performance mécanique du joint, tout en caractérisant la perméabilité du joint à mesure que celui-ci est chargé en traction. Une fois le dispositif d'essai développé et validé, il pourra être utilisé dans le deuxième programme principal, associé au deuxième objectif spécifique.

Ce deuxième programme expérimental aura pour objectifs de :

- comparer le comportement en traction et la perméabilité à l'eau d'un joint BFUP-BFUP en comparaison à une configuration sans joint, ainsi qu'en comparaison à un joint BO-BO;
- évaluer la performance de différentes configurations de joints en BFUP.

1.4 Portée

Ce projet se concentre sur la performance en service d'une chape mince en BFUP durable, sans membrane d'étanchéité et sans enrobé bitumineux, pour réparer les surfaces supérieures de dalles endommagées. Une telle chape en BFUP doit entre-autre offrir un bon niveau d'étanchéité ainsi qu'une surface de roulement qui permet une adhérence sécuritaire pour les véhicules et qui ne présente pas de dégradation importante dans le temps par abrasion et/ou écaillage. La démarche scientifique initiée dans ce projet vise à répondre à ces enjeux spécifiques en étudiant l'adhérence fournie par différents finis de surface du BFUP, le comportement du BFUP à l'écaillage et abrasion ainsi qu'en étudiant le comportement et le niveau d'étanchéité fourni par différentes configurations de joints froids, lieux plus propices à d'éventuelles infiltrations d'eau et autres agents agressifs. Les résultats de cette étude permettront d'optimiser la conception de ce type de réparation novatrice, axée sur la durabilité, l'efficacité opérationnelle et la diminution des coûts économiques et sociaux à court et/ou moyen termes. Une telle réparation permettra à l'industrie de la réparation du béton du Québec et d'ailleurs d'appliquer une solution plus robuste, durable et résiliente, mettant à profit les innovations réalisées en technologie du béton.

1.5 Organisation du mémoire

Ce mémoire est divisé en 5 chapitres. Le présent chapitre introduit ce projet de recherche. Le chapitre 2 est une revue de littérature qui se focalise sur les chapes minces en BFUP, leurs étapes de réalisation ainsi que leur suivi de performance. Le chapitre 3 traite la performance en service de la surface de roulement de la chape en BFUP. Le chapitre 4 présente la performance en service des joints de la chape. Finalement, le chapitre 5 détaille les conclusions du projet de recherche ainsi que les recommandations pour des travaux futurs.

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Béton Fibré à Ultra-Hautes Performances (BFUP)

2.1.1 Historique

Les premiers Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances (BFUP) ont été mis au point dans les années 1970 au Danemark par le professeur Bache (Petitjean & Resplendino, 2002b). Le développement du matériau s'est ensuite poursuivi dans les années 1990 en France. Les travaux de Pierre Richard et de Bouygues ont conduit au Ductal, un BFUP commercialisé par Lafarge et utilisé à travers le monde pour des applications structurales et décoratives (Hajar et al., 2004). D'autres BFUP ont ensuite été développés et ont été utilisés dans des applications structurales en Europe (Petitjean & Resplendino, 2002a).

Dans les années 2000, les recherches internationales sur le BFUP se sont intensifiées. Le Japon a construit des ouvrages emblématiques en BFUP tel que le pont Kayogawa, le premier pont ferroviaire au monde réalisé en BFUP (Okuma, 2006), tandis que l'Australie l'a adopté pour des constructions de ponts et des panneaux de protection contre les explosions (Cavill & Chirgwin, 2003). L'Allemagne a également lancé un programme de recherche d'envergure sur les BFUP, toutefois le nombre d'applications concrètes ayant été réalisées demeure limité (Toutlemonde et al., 2008). En Suisse, les premières applications du BFUP ont vu le jour en 2003, avec la réhabilitation de ponts historiques, tels que les ponts Dalvazza à Luzein et Guillermaux à Payerne, ainsi que pour la construction d'ouvrages innovants, comme la passerelle Martinet à Lausanne et le renforcement du Viaduc de Chillon. Grâce à une étroite collaboration entre l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) et l'industrie, plus de 280 projets ont été menés à bien avec du BFUP et ont permis de démontrer la durabilité, l'esthétisme et l'apport économique de ce matériau (Bertola et al., 2021). En Amérique du Nord, le BFUP a fait son entrée dans les années 2000 avec des projets marquants, comme la passerelle de Sherbrooke au Québec et le pont de Mars Hill dans l'État du Maine, aux États-Unis. Plus récemment au Québec et au Canada, le BFUP a été intégré dans plusieurs projets d'infrastructures, notamment pour la fabrication de dalles de ponts (passerelle Isabey-Darnley à Montréal), la connexion de dalles de ponts préfabriquées et pour renforcer des colonnes de ponts (Benoît Marleau, 2018). Ces initiatives nord-américaines soulignent l'intérêt

croissant pour les avantages durables et économiques du BFUP dans les environnements froids et exigeants (FHWA-HRT-17-096, 2017).

Le développement des BFUP et l'intérêt grandissant envers ce type de béton sont motivés par la nécessité de prolonger la durée de vie des infrastructures et de minimiser les interventions d'entretien, en particulier dans les environnements exposés à des conditions extrêmes (Brühwiler & Denarié, 2013). En effet, le BFUP se démarque des bétons conventionnels par son apport structural et sa durabilité largement supérieurs, liés à sa composition particulière. La composition du BFUP ainsi que ses propriétés mécaniques, de durabilité et d'autres avantages du BFUP sont détaillés dans les sections suivantes.

2.1.2 Composition

La Figure 2.1 et le Tableau 2.1 illustrent les différences de composition des BFUP par rapport au bétons plus conventionnels (béton ordinaire (BO), béton à hautes performances (BHP) et béton fibré à hautes performances (BFHP)).

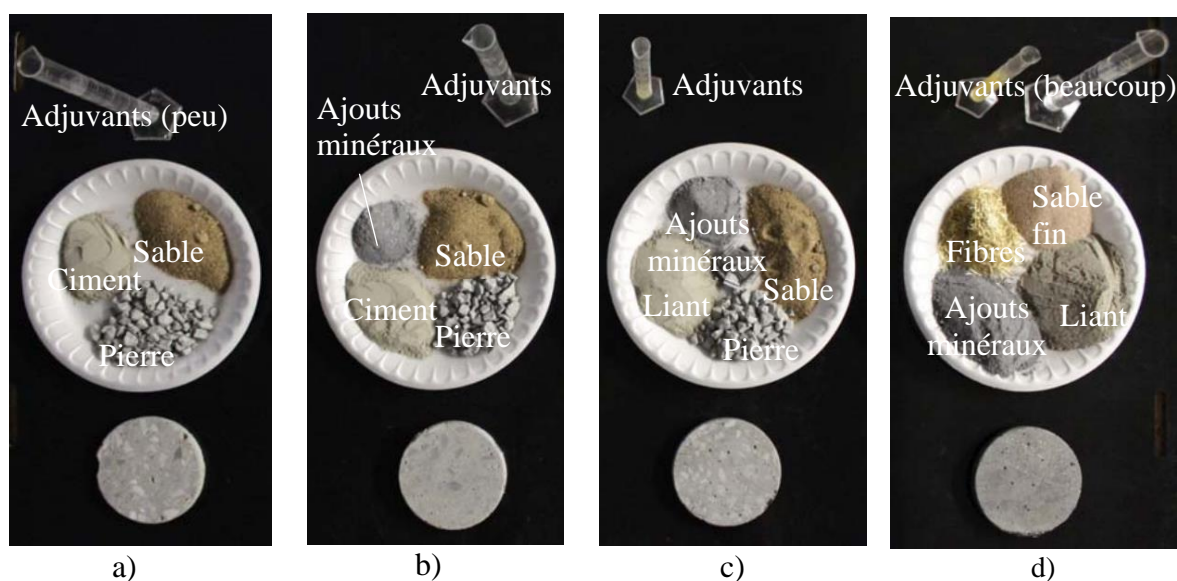


Figure 2.1 Illustrations de la composition des a) BO, b) BHP, c) BFHP et d) BFUP, pour un même volume de béton (Charron)

Tableau 2.1 Caractéristiques des catégories de béton considérées (Charron & Desmettre, 2013)

Composition	BO	BHP	BFHP *	BFUP
Rapport eau/liant	≥ 0.40	0.30 à 0.40	0.30 à 0.40	0.15 à 0.25
Liant	300-400 kg/m ³	350 à 450 kg/m ³	350 à 550 kg/m ³	800 à 1000 kg/m ³
Ajouts minéraux	Parfois	Oui	Oui	Oui
Sable	Oui	Oui	Oui	Oui
Pierre	Oui	Oui	Oui	Non
Fibres	Non	Non	40 à 120 kg/m ³ (0.5 à 1.5 %-vol.)	160 à 480 kg/m ³ (2 à 6 %-vol.)
Propriétés	BO	BHP	BFHP *	BFUP
Compression - f'_c	20 à 40 MPa	50 à 90 MPa	50 à 90 MPa	120 à 180 MPa
Traction - f'_t	1.5 à 2.5 MPa	3.0 à 4.5 MPa	3.0 à 4.5 MPa	7 à 15 MPa
Module - E_c	20 à 25 GPa	25 à 35 GPa	25 à 35 GPa	30 à 45 GPa

* : Dosage en fibre minimal de 0.5% pour réduction de perméabilité et apport structural significatifs

La composition des BFUP (Figure 2.1d et colonne de droite du Tableau 2.1) se distingue de celle des bétons conventionnels sur plusieurs aspects.

Tout d'abord, les BFUP ont un rapport eau/liant (E/L) beaucoup plus faible, entre 0.15 et 0.25, et contiennent une proportion plus importante de ciment, allant de 800 à 1000 kg/m³, soit plus du double de la quantité utilisée dans le BO (Eide & Hisdal, 2012).

Les BFUP incorporent également une quantité importante (généralement 20 à 50 % massique) d'ajouts minéraux de différentes natures, comme de la fumée de silice, des cendres volantes, du laitier et des fillers calcaires (Hassan et al., 2012).

Aussi, contrairement aux bétons conventionnels, les BFUP ne contiennent pas de gros granulats (pierre) et ils utilisent du sable plus fin (< 1 mm). Le faible ratio E/L, ainsi que la présence d'ajouts minéraux et de granulats très fins, permettent d'obtenir une matrice très dense et compacte (Androuët & Charron, 2021; Charron & Desmettre, 2013; Eide & Hisdal, 2012).

À cette matrice dense est ajouté un dosage élevé (2 à 6 % volumique) de fibres de petite taille (0.1 à 0.3 mm de diamètre, 5 à 20 mm de longueur). Ces fibres, le plus souvent en acier pour atteindre des propriétés optimales, ou d'origine synthétiques, procurent au matériau une résistance accrue en

traction, en permettant de distribuer les contraintes et de limiter la propagation des fissures (Graybeal & Tanesi, 2007).

Finalement, les BFUP sont majoritairement autoplaçants, même si des BFUP thixotropiques peuvent être produits lorsque cela est requis pour la réalisation de pente ou autre enjeu de finition (Bertola et al., 2021). Afin d'obtenir une excellente maniabilité malgré le très faible rapport E/L et la présence des fibres, les adjuvants superplastifiants sont des éléments essentiels dans la composition des BFUP. D'autres adjuvants peuvent également être ajoutés pour améliorer d'autres propriétés telles que le retrait, la viscosité, le temps de prise, etc. (Du et al., 2022).

Les particularités de composition des BFUP leur permettent d'atteindre des propriétés mécaniques et de durabilité exceptionnelles, même dans des conditions climatiques rigoureuses ou sous de fortes sollicitations mécaniques.

2.1.3 Comportement mécanique

Les sections qui suivent détaillent les principales propriétés à l'état durci des BFUP, qui sont notamment mises à profit dans l'application visée par ce projet, soit les chapes minces en BFUP.

2.1.3.1 *Comportement en compression*

De par son très faible rapport E/L, la présence d'ajouts minéraux, sa composition granulaire très fine et son pourcentage de pâte cimentaire important, le BFUP présente des résistances à la compression très élevées, supérieures à 120 MPa (Figure 2.2) (Charron & Desmettre, 2013; CSA A23.1:19 Annexe U, 2019).

Les fibres n'ont, quant à elles, pas d'impact significatif sur la résistance à la compression. Certaines études obtiennent une résistance similaire avec ou sans fibres, alors que d'autres obtiennent des résistances légèrement supérieures ou inférieures en présence de fibres, dépendamment des BFUP étudiés et du dosage en fibres (Yang et al., 2022). Les fibres permettent cependant d'obtenir un comportement post-pic en compression ductile, en comparaison au comportement fragile observé en l'absence des fibres (El-Helou et al., 2022). Les courbes de comportement en compression obtenues par Hassan et al. (2012), pour un même BFUP contenant 2 % en volume de fibres d'acier

(UHPFRC) ou sans fibres (UHPC), et testé à différentes échéances, illustrent le gain de ductilité apporté par les fibres (Figure 2.2). Ce gain de ductilité varie selon les fibres utilisées (nature, dosage, géométrie, propriétés mécaniques, orientation, etc.) (Eide & Hisdal, 2012).

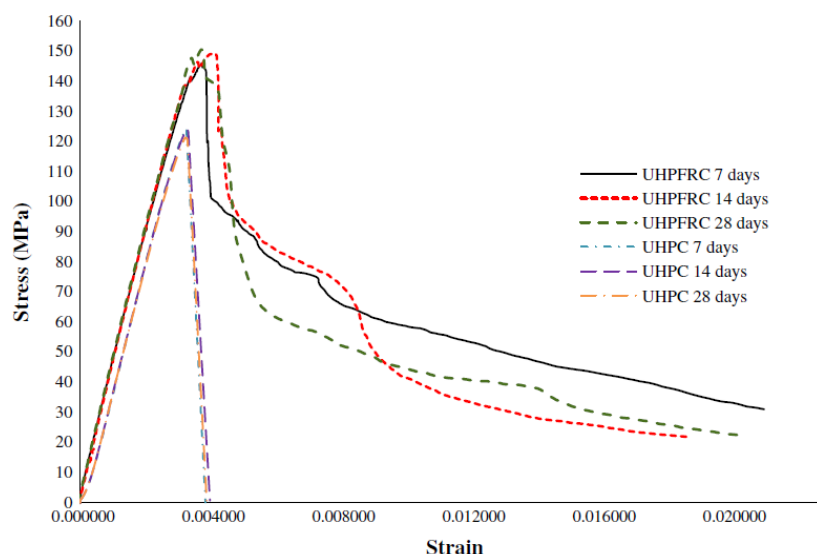
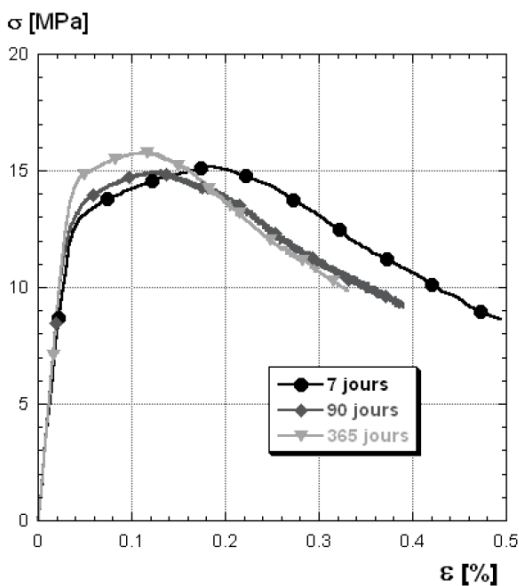


Figure 2.2 Comportement en compression du BFUP avec et sans fibres (Hassan et al., 2012)

2.1.3.2 Comportement en traction

La Figure 2.3, provenant d'essais réalisés par Kamen Aicha (2007), illustre le comportement contrainte-déformation en traction uniaxiale du BFUP. Ce comportement est d'abord linéaire jusqu'à la contrainte de fissuration (nommée f_{ela} Figure 2.3b). Ensuite, une phase de comportement écrouissant débute et pendant laquelle se forment de multiples microfissures, soit des fissures très fines, généralement de l'ordre de 50 μm (Beaudoin, 2021) et ayant donc très peu d'impact sur la durabilité du BFUP. Une fois la résistance à la traction maximale atteinte (f_{\max}), la phase de comportement post-pic adoucissant s'amorce avec la localisation d'une macrofissure dans le spécimen qui s'ouvre jusqu'à la rupture.



a)

Propriétés	Age [jours]		
	7	90	365
f_{tmax} [MPa]	15.3	15.0	15.8
ϵ_{pic} [%]	0.19	0.13	0.12
$f_{éla}$ [MPa]	12.4	12.3	14.2
Module [GPa]	39.2	46.7	47

b)

Figure 2.3 Comportement en traction du BFUP : a) Courbes contraintes-déformations moyennes obtenues à différentes échéances sur des os (5x10x70 cm) d'un BFUP contenant 2.5 % vol. de fibres et b) paramètres extraits ces courbes (Kamen, 2007)

Pour le BFUP présenté à la Figure 2.3, qui comprend 2.5 % en volume de microfibres d'acier, la résistance à la traction (f_{tmax}) est de 15.3 MPa à 7 jours, soit 4 à 5 fois supérieure à celle d'un béton conventionnel, et ce grâce à l'introduction des fibres et un rapport E/L faible (Kamen Aicha, 2007). La déformation maximale correspondante (ϵ_{pic}) est de 0.2 % (Figure 2.3b), soit une déformation équivalente à la plastification d'une barre d'armature conventionnelle. La résistance en traction ainsi que la capacité de déformation associée peuvent varier d'un BFUP à l'autre, selon la composition du BFUP ainsi que selon le type et le pourcentage de fibres. De manière générale, pour les BFUP avec fibres en acier, qui sont les plus courants, les résistances sont généralement comprises entre 10 et 15 MPa et les déformations associées entre 0.2 % et 0.3 % (FHWA-HRT-22-065, 2022).

La résistance à la traction post-pic, soit en présence d'une macrofissure localisée, est également nettement supérieure à celle des bétons conventionnels en raison des fibres qui permettent un excellent contrôle de la fissuration, améliorant par le fait même sa durabilité face aux contraintes mécaniques et environnementales.

2.1.3.3 Adhérence à un substrat

Une autre particularité mécanique du BFUP, par rapport aux bétons conventionnels, est l'adhérence supérieure qu'il procure avec le béton de substrat. Cette propriété est particulièrement importante dans un contexte de réparation de structure, pour éviter la délamination entre le béton de réparation et le substrat, et ainsi éviter les problèmes de durabilité associés.

Étant donné l'absence des gros granulats, le BFUP s'infiltrer mieux dans les cavités de la surface du substrat, renforçant ainsi la liaison. Il est aussi capable de résister à des contraintes de compression et de traction très élevées, et présente une bonne capacité de fluage, ce qui améliore la performance de la liaison avec le substrat en résistant mieux aux différences de dilatation ou de contraction avec le béton existant. Les risques de fissuration à l'interface et la réflexion des fissures présentes dans le substrat sont également extrêmement réduits en raison de sa faible porosité et de son bon comportement mécanique (Al-Osta et al., 2022).

Tout comme pour les bétons conventionnels, la préparation de surface du substrat reste un élément clé pour assurer une adhérence optimale, étant donné que la texture rugueuse du substrat de béton améliore l'interverrouillage mécanique entre celui-ci et le BFUP (Liu et al., 2020).

Les propriétés d'adhérence des BFUP selon le type de préparation de surface du substrat seront détaillées à la section 2.2.2.1, qui s'intéressera aux recherches effectuées à ce sujet dans le contexte des chapes minces en BFUP.

2.1.3.4 Résistance à l'abrasion

Les BFUP se distinguent également des bétons conventionnels par leur résistance à l'abrasion supérieure. La Figure 2-4 présente les pertes de masse (en grammes) obtenues sur différents spécimens de BFUP âgés de 28 jours et testés selon la procédure (ASTM C944, 2019) par GrayBeal et Tanesi (2007) (Figure 2.4a), ainsi que par Ralli (2023) (Figure 2.4b). Il est à noter que cette procédure est celle recommandée dans la norme (CSA A23.1:19 Annexe U, 2019).

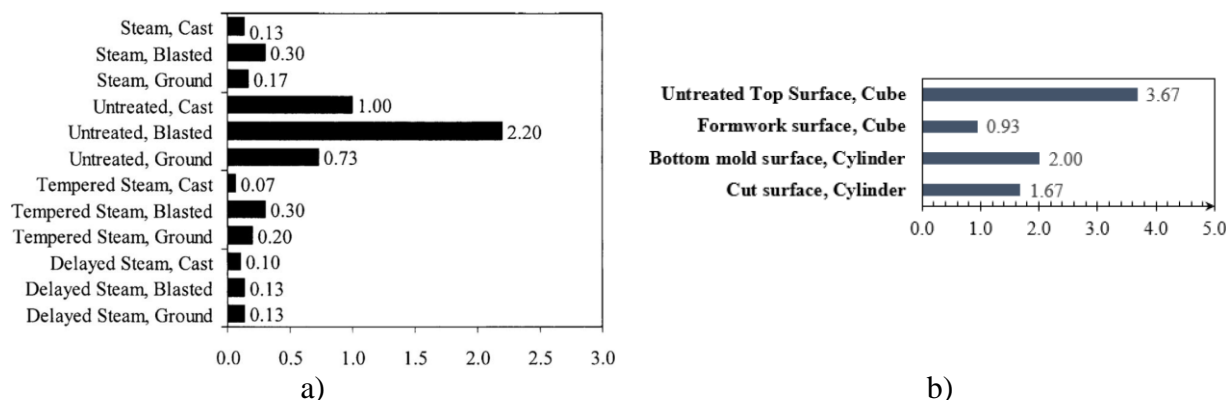


Figure 2.4 Pertes de masse par abrasion (en grammes) obtenues selon la norme (ASTM C944, 1999, 2019) par a) Graybeal et Tanesi (2007) et b) Ralli (2023)

Graybeal et Tanesi (2007) ont étudié l'effet des traitements thermiques et de la finition de surface sur la résistance à l'abrasion des BFUP (Figure 2.4a). Les pertes par abrasion des spécimens non traités (*Untreated* sur la Figure 2.4a) varient selon la finition de la surface abrasée. Une perte de 1 g a été obtenue pour les surfaces coffrées (surface lisse obtenue directement après démoulage) en comparaison à 2.2 g pour les surfaces sablées (obtenues par projection de sable) et 0.73 g pour les surfaces polies (par meulage). L'application d'un traitement thermique à 90 °C pendant 48 heures (*Steam* sur la Figure 2.4a) a permis de considérablement réduire les pertes, à 0.13 g pour les surfaces coffrées et polies, et 0.30 g pour les surfaces sablées. En conséquence, une microstructure améliorée, une porosité réduite et une surface lisse offrent une meilleure résistance à l'abrasion.

Dans le cas de Ralli (2023) (Figure 2.4b), les spécimens de BFUP ont été soumis à une cure humide conventionnelle de 28 jours. La perte de masse par abrasion obtenue sur les surfaces coffrées/lisses (*formwork surface*, Figure 2.4b) est très proche des résultats obtenus par Graybeal et Tanesi (2007) sur une surface coffrée non traitée (0.93 g versus 1 g respectivement). Aussi, tout comme Graybeal et Tanesi (2007), Ralli (2023) observe des pertes différentes selon le fini de surface. Les surfaces truellées enregistrent des pertes de 3.67 g, tandis que les surfaces moulées et sciées présentent des pertes de 2.00 g et 1.67 g respectivement. Ces variations soulignent l'influence cruciale des caractéristiques de surface sur la durabilité face à l'abrasion.

Malgré les différences de résistance à l'abrasion qui peuvent être observées selon le fini de surface et la cure appliquée au BFUP, cette résistance reste, dans tous les cas, bien supérieure à celle des

bétons conventionnels. (Lee et al., 2007) ont réalisé des essais d'abrasion selon l'(ASTM C131, 2006) sur des BFUP ainsi que sur des bétons ordinaires (BO) et des bétons à hautes performances (BHP). Les BFUP ont présenté des pertes de masse limitées (8 % de la masse totale du spécimen après 1000 cycles), nettement inférieures à celles des BHP (20 %) et des BO (jusqu'à 67 %). Ces performances supérieures du BFUP sont attribuées à leur microstructure très dense, offrant une résistance exceptionnelle, même après des cycles prolongés d'abrasion.

Li et al. (2021) ont également réalisé des essais d'abrasion sous eau selon la norme (ASTM C1138, 2019), sur des BFUP avec différents dosages en fibres d'acier. Ces essais leur ont permis de confirmer que la résistance à l'abrasion d'un BFUP contenant 3 % en volume de fibres est nettement supérieure à celle de bétons sans fibres. En augmentant le volume de fibres, la résistance à l'abrasion augmente. Dans leur cas, les pertes sont passées de $131 \text{ h} \cdot (\text{kg/m}^2)^{-1}$ pour le BFUP contenant 3 % volumique de fibres à $146 \text{ h} \cdot (\text{kg/m}^2)^{-1}$ pour le même mélange sans fibres. Il est à noter que l'unité $\text{h} \cdot (\text{kg/m}^2)^{-1}$ correspond à une mesure du temps nécessaire pour enlever une quantité spécifique de matériau sur une surface donnée.

2.1.4 Retrait

Dans un contexte de réparation, lorsqu'un nouveau béton est mis en place sur un béton existant, le retrait du nouveau béton est partiellement restreint par le béton de substrat plus rigide. Cette restriction induit des contraintes de traction dans le nouveau béton qui, si elles dépassent sa résistance en traction, encore faible au jeune âge, risque de fissurer le béton nouvellement mis en place et amener une dégradation prématurée de l'adhérence avec le substrat. Toutefois, dans le cas des chapes minces, l'épaisseur de la couche du matériau mise en place est réduite, ce qui fait en sorte que les effets du retrait sont minimisés (Abdal et al., 2023). Cependant, avec une section plus faible, il y a plus de risque de fissuration, il est donc intéressant de porter une attention particulière au retrait des bétons dans un contexte de réparation.

En raison de son très faible rapport eau/liant, le BFUP présente un retrait endogène élevé, qui a majoritairement lieu au jeune âge (Kamen Aicha, 2007). Ce retrait peut atteindre plus de $800 \mu\epsilon$ lorsqu'aucune technique de mitigation du retrait n'est utilisée (Du et al., 2021), ce qui représente des valeurs plus importantes que pour les bétons conventionnels (Rossi et al., 2014). Il existe cependant plusieurs techniques de mitigation du retrait, telles que l'utilisation d'adjuvants

réducteur de retrait, d'agents expansifs, de polymères super-absorbants (SAP) de granulats poreux pour réaliser une cure interne, qui permettent de significativement diminuer le retrait endogène des BFUP et s'approcher des retraits obtenus avec des bétons conventionnels (Abid, 2021; Du et al., 2021). Li et al. (2021), par exemple, ont observé une réduction du retrait endogène d'environ 58 % en combinant une technique de cure interne et l'utilisation d'agents expansifs.

Les fibres d'acier jouent également un rôle crucial dans la réduction du retrait. La Figure 2.5 montre des réductions du retrait du BFUP de 19.8 %, 29.2 % et 39.1 % avec l'utilisation de 1, 1.5 et 2.5 % vol. de fibres respectivement, en comparaison au même mélange sans fibre. Le mécanisme de réduction du retrait est, dans ce cas, expliqué par l'adhérence interfaciale entre les fibres et la matrice qui renforce la résistance aux déformations (Zhang et al., 2019). L'augmentation du dosage en fibres dans le BFUP permet également de mieux supporter les efforts de traction générés par la restriction. Un dosage en fibres d'acier de 3 % vol. représente un bon compromis pour un bon contrôle du retrait et une bonne capacité à reprendre les contraintes de traction générées par la restriction sans risque de fissuration (Leboeuf, 2016). Un tel dosage est généralement adopté dans les chapes minces en BFUP, tel que cela sera présenté à la section 2.2.

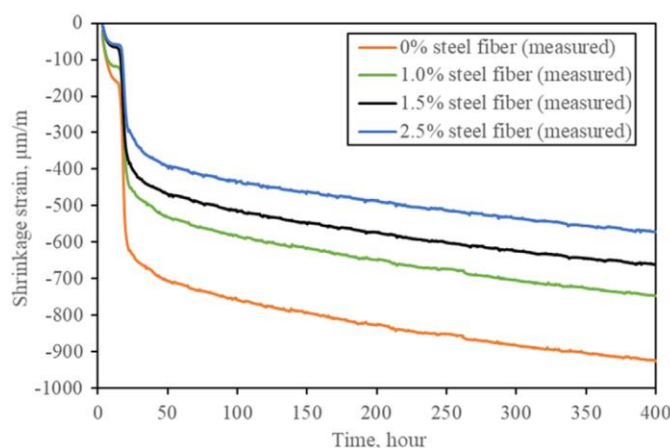


Figure 2.5 Effet des fibres d'acier sur le retrait du BFUP (Zhang et al., 2019)

Malgré un retrait endogène qui peut être plus élevé pour le BFUP que pour les bétons conventionnels, la bonne capacité du BFUP à éviter les problèmes de fissuration précoce dû au

retrait restreint a été démontré dans plusieurs études. Grâce à son comportement écrouissant et à l'action des fibres, les travaux de Charette (2017) ont montré que le retrait restreint du BFUP ne mobilisait qu'une faible portion de sa capacité en traction, ce qui lui permet de résister aux contraintes induites sans provoquer de fissuration précoce. Dans le même sens, l'étude menée par Abid (2021) à l'aide d'un essai à l'anneau retreint, a indiqué que le retrait restreint du BFUP n'exploitait qu'une partie négligeable de son comportement écrouissant en traction, ne provoquant ainsi aucune fissuration précoce et laissant encore une grande marge de déformation disponible pour reprendre les autres efforts auxquels il pourrait être soumis. En comparaison, un anneau de béton à haute performance (BHP), testé dans les mêmes conditions de retrait restreint que le BFUP durant cette même étude, a fissuré sous l'effet seul du retrait restreint.

2.1.5 Durabilité

Alors que les précédentes sections s'intéressaient aux propriétés mécaniques et déformationnelles du BFUP, cette section met de l'avant les caractéristiques de durabilité du BFUP. Différentes caractéristiques seront abordées, tels que les propriétés de transport à l'état non fissuré, la résistance au gel-dégel et à l'écaillage, les propriétés de transport à l'état fissuré et la capacité d'autocicatrisation.

2.1.5.1 *Propriétés de transport à l'état non fissuré*

Le Tableau 2.2 compare plusieurs indicateurs classiques de durabilité du BFUP non fissuré par rapport aux mêmes indicateurs obtenus pour les BO, BHP et BFHP. Les indicateurs de durabilité relatifs donnent un aperçu de la réduction des indicateurs en utilisant les bétons plus durables. On y constate que le BFUP présente des indicateurs de durabilité largement inférieurs à ceux des autres bétons, illustrant sa durabilité exceptionnelle.

Tableau 2.2 Indicateurs de durabilité à l'état non fissuré, pour différentes gammes de bétons
(Charron & Desmettre, 2013)

Indicateur de durabilité	BO	BHP et BFHP *	BFUP
Perméabilité à l'air, K_{air} (m^2) [20, 22, 40, 41]	$10^{-15} - 10^{-16}$	10^{-17}	$< 10^{-19}$
Perméabilité à l'eau, K_{eau} (m/s) [15, 42-44]	$10^{-11} - 10^{-12}$	10^{-13}	$< 5 \times 10^{-14}$
Diffusion effective, D_{eff} (m^2/s) [22, 45, 46]	$2 \times 10^{-11} - 2 \times 10^{-12}$	$2 \times 10^{-12} - 2 \times 10^{-13}$	2×10^{-14}
Sorptivité, S ($kg/m^2/s^{1/2}$) [15, 47-49]	0.01-0.03	0.003-0.01	0.0003
Vitesse de corrosion, C ($\mu m/an$) [45]	1.20	0.25	< 0.01
Porosité à l'eau, ϕ (%) [22, 42, 45, 48]	12 - 16	8 - 12	1 - 6
Indicateur de durabilité relatif	BO	BHP et BFHP *	BFUP
$K_{air}/K_{air BO}$	1	0.018	< 0.0002
$K_{eau}/K_{eau BO}$	1	0.018	< 0.0091
$D_{eff}/D_{eff BO}$	1	0.100	0.0018
S/S_{BO}	1	0.325	0.0150
C/C_0	1	0.208	< 0.0083
Indicateur de durabilité relatif critique	1	≤ 0.325	≤ 0.015

* : En condition non fissuré le BFHP devrait avoir des indicateurs de durabilité similaires à ceux du BHP.

Avec une perméabilité à l'eau et une diffusion effective pouvant être plus de 500 fois plus faibles que celles du BO (Tableau 2.2), la pénétration de l'eau, des chlorures, des sulfates, et d'autres agents agressifs sont fortement limitées (Li et al., 2020). Bamonte et al. (2007) ont étudié la diffusion des ions chlorures sur des prismes de BFUP et de BO conservés 5 ans dans un environnement marin, le coefficient de diffusion des ions chlorures était inférieur à $2 \times 10^{-14} m^2/s$ pour le BFUP, en comparaison à $1 \times 10^{-11} m^2/s$ pour le béton ordinaire.

La très faible perméabilité à l'air limite beaucoup la pénétration de l'oxygène (O_2) et dioxyde de carbone (CO_2). Le risque de corrosion des armatures dû à la pénétration des chlorures ou par carbonatation est ainsi largement réduit. (Sritharan et al., 2017) arrivent à la même constatation. Dans leur cas, ils ont obtenu un coefficient de diffusion des ions chlorures du BFUP 30 fois inférieur à celui du BHP et 55 fois inférieur à celui du BO. En l'absence d'armatures dans le BFUP, l'utilisation d'une couche de BFUP au niveau des surfaces exposées reste tout aussi intéressante en offrant une couche d'étanchéité qui protège le béton sous-jacent de la pénétration d'agents non-souhaités, augmentant ainsi la durabilité de la structure et, par le fait même, les besoins de réparation, d'entretien et d'intervention (Abellán-García et al., 2024a).

2.1.5.2 Résistance au gel-dégel et à l'écaillage

De par son excellente résistance aux différents modes de transports présentés à la section 2.1.5.1, associée à son excellent comportement en traction (section 2.1.3.2), le BFUP présente une excellente résistance aux cycles de gel-dégel et à l'écaillage (Missemer, 2011).

La Figure 2.6 illustre les résultats d'essais d'écaillage menés par Ralli (2023) sur des BFUP contenant 2 % vol. de microfibres d'acier. Dans cette étude, les spécimens ont été soumis à des cycles de gel/dégel en présence de sels de déglacage selon deux normes distinctes. La norme canadienne (CSA A23.2:19, 2019) utilise une solution de NaCl à 3 % en masse et démarre les essais à 28 jours, tandis que la norme américaine (ASTM C672, 2016) utilise une solution de CaCl₂ à 4 % en masse et débute les essais aux 56 jours du BFUP. Quelle que soit la norme utilisée, les échantillons exposés aux solutions salines ont eu de très faibles pertes de masse dues à l'écaillage, (pertes cumulatives de $17 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$ et $22 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$ après 50 cycles, avec les normes CSA et ASTM respectivement, Figure 2.6b). Piérard et al. (2012), en réalisant des essais d'écaillage selon la spécification technique européenne (CEN/TS 12390-9, 2006) sur des échantillons exposés à de l'eau déminéralisée et d'autres à une solution de NaCl à 3 % en masse, ont également obtenu des pertes de masse par écaillage très faibles pour le BFUP. Après 112 cycles, les pertes par écaillage étaient de $22 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^2$ pour l'exposition à l'eau et $27 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^2$ en présence de la solution saline.

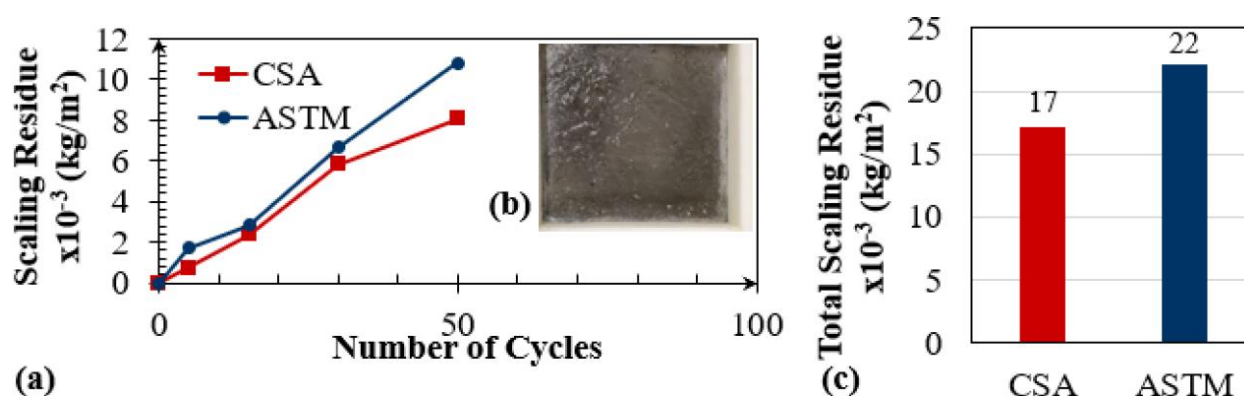


Figure 2.6 Résistance à l'écaillage du BFUP a) Perte de masse selon la (CSA A23.2:19, 2019) et l'(ASTM C672, 2016) b) Évaluation visuelle de l'écaillage après 50 cycles c) Résidu cumulé d'écaillage pour les tests selon les deux normes (Ralli, 2023)

2.1.6 Propriétés de transport à l'état fissuré

La présence d'une grande quantité de fibres dans les BFUP permet un excellent contrôle de la fissuration avec seulement des microfissures attendues en condition de service, versus des macrofissures allant jusqu'à 0.25 mm (CSA S6:19, 2019) et 0.3 mm d'ouverture (CSA A23.4-16, 2016) pour les autres types de bétons, en cas d'exposition environnementale sévère.

Hubert et al. (2015) ont étudié la perméabilité d'un tirant en béton armé de 610 mm de longueur sollicité en traction directe, pour différents types de béton (BHP sans fibres, BRF avec 0.75 ou 1.5 % vol. de macrofibres en acier et BFUP avec 2 % vol. de microfibres d'acier). La perméabilité à l'eau est le mode de transport le plus influencé par la présence de fissure étant donné qu'elle évolue selon le cube de l'ouverture de fissure en comparaison à la diffusion qui évolue linéairement avec l'ouverture de fissure (Ollivier & Torrenti, 2008). Dans les travaux de Hubert et al. (2015), le tirant en BFUP, en condition de service, a présenté 21 microfissures de moins de 30 μm et une perméabilité 99 % plus faible que le tirant en BHP. Les tirants en BRF contenant 0.75 % et 1.5 % de fibres ont, eux, présentés 3 et 7 macrofissures d'ouvertures maximales de 146 et 106 μm respectivement et des perméabilités associées 31 % et 92 % plus faibles que le BHP (Hubert et al., 2015).

2.1.6.1 *Auto cicatrisation des fissures*

L'autocicatrisation est la capacité intrinsèque d'une fissure à se colmater partiellement ou totalement dû à différents phénomènes physico-chimiques. Alors que le principal phénomène responsable de l'autocicatrisation dans le cas d'un béton conventionnel mature en présence d'eau est la formation de calcite (CaCO_3), l'hydratation continue du ciment anhydre (non-hydraté) semble prédominant dans le cas des bétons très jeunes ou de faible rapport E/L, comme le BFUP (Brühwiler & Denarié, 2013; Charron & Desmettre, 2013; Ferrara et al., 2016).

En plus de la grande quantité de ciment anhydre disponible dans le BFUP, qui est prêt à réagir lorsqu'une fissure se crée et que de l'eau pénètre dans la fissure, le BFUP a l'autre avantage de ne présenter que de très fines fissures en service en comparaison aux bétons conventionnels et, ce, grâce à l'action des fibres (cf. section 2.1.3). Or, il a été démontré dans plusieurs études que des fissures plus fines cicatrisent plus rapidement (Lauch, 2021), ce qui est un atout supplémentaire pour le BFUP. À titre d'exemple, Ferrara et al. (2016) ont étudié la cicatrisation de spécimens de BFUP pré-fissurés à 28 jours puis immergés dans l'eau. Les spécimens qui avaient une ouverture de fissure initiale de 0.5 mm ont présenté des indices de refermeture moyenne des fissures allant jusqu'à 92 % après 6 mois d'immersion, en comparaison à des refermetures plus limitées, entre 54 % et 68 % pour les spécimens ayant des fissures initiales de 1 ou 2 mm d'ouverture.

Grâce au faible rapport E/L du BFUP et au bon contrôle de la fissuration, des cicatrisations très importantes, voire complètes selon l'état initial du BFUP fissuré, ont aussi été observées dans plusieurs études. De tels niveaux de cicatrisation permettent d'assurer l'étanchéité du BFUP en condition de service. En plus de cet aspect de durabilité, certaines études ont également mis de l'avant le comportement mécanique similaire voire supérieur du BFUP cicatrisé en comparaison au même BFUP non fissuré (Ferrara et al. (2016)).

2.1.7 Autres avantages du BFUP

Les propriétés avantageuses des BFUP, présentées dans les sections précédentes, permettent de réaliser des structures et/ou réparations plus durables, permettant ainsi de réduire les coûts de maintenance et les impacts environnementaux associés. Elles permettent également, dans plusieurs cas, tel que celui des chapes minces sur lesquelles porte ce projet de recherche, de simplifier la

réalisation des travaux. Ces différents aspects seront tour à tour mis de l'avant dans les sous-sections qui suivent, en se focalisant sur des résultats liés aux chapes minces en BFUP.

2.1.7.1 Réduction des coûts de maintenance

Le coût de production du BFUP est généralement 5 à 10 fois plus élevé que celui du béton conventionnel (Savino et al., 2019). Ce coût est principalement dû au coût élevé des fibres en acier, suivi du coût du ciment, des ajouts minéraux et des adjuvants, tous utilisés en grandes quantités comparativement aux bétons conventionnels (Figure 2.7).

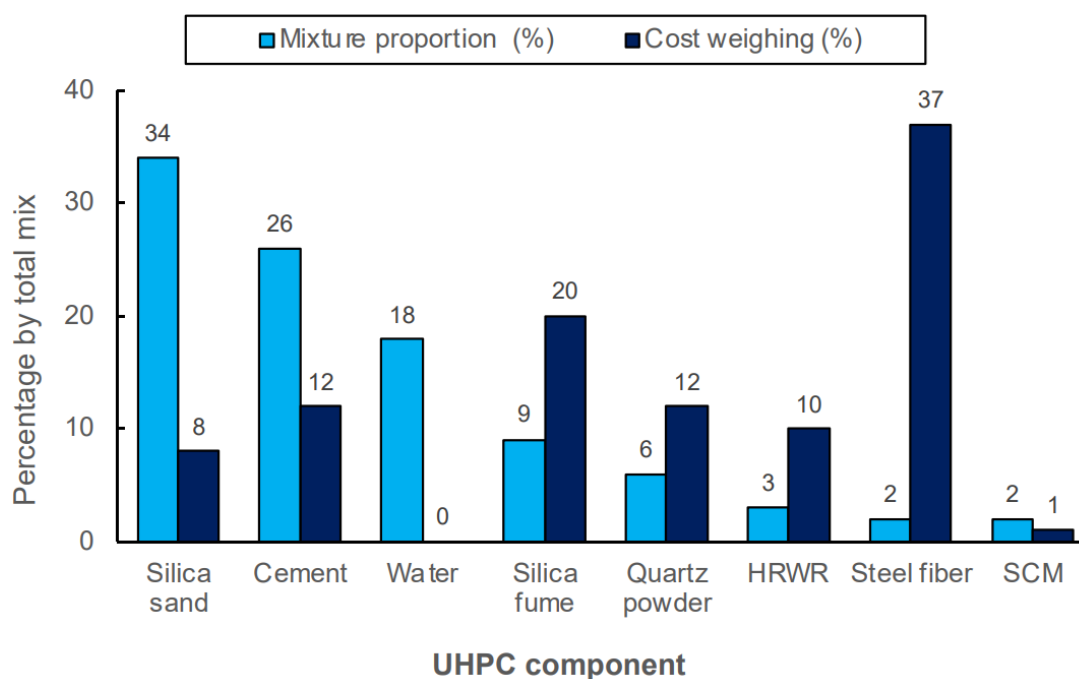


Figure 2.7 Composition typique du BFUP avec les coûts de production associés (Abellán-García et al., 2024a)

Dans le cadre de nouvelles structures ou de réhabilitation de structures existantes, l'utilisation de BFUP permet de réduire les volumes de matériaux requis (béton et armatures en acier). Cette réduction de matériaux permet déjà d'absorber une portion du coût initial plus élevé du BFUP.

Pour le reste, même si le coût initial reste plus élevé, l'utilisation du BFUP est largement justifiée par les économies réalisées à long terme grâce à la grande durabilité du BFUP et à la réduction des besoins en maintenance associés (Zhang et al., 2022).

McDonagh (2022) a réalisé une analyse du coût de cycle de vie d'une chape mince en BFUP, en comparaison à une chape plus conventionnelle, en béton modifiée au latex (LMC), ou encore à l'option de remplacer le tablier de pont par un nouveau préfabriqué. Pour les chapes minces, différentes méthodes de mise en place ont été étudiées. Les résultats de cette analyse économique sont résumés au Tableau 2.3.

Tableau 2.3 Comparaison des coûts du cycle de vie pour un pont avec chape mince en BFUP en comparaison à une chape au béton modifié au latex ou à un nouveau tablier de pont préfabriqué, selon différentes méthodes de mise en œuvre des chapes (McDonagh, 2022)

Material/Deck Type	UHPC	UHPC	UHPC	LMC	LMC	New Precast Concrete Deck
Overlay installation strategy	Method 1	Method 2	Method 3	Method 1	Method 2	—
Estimated service life = L_S	30 yr	50 yr	45 yr	12 yr	25 yr	75 yr
Total initial cost = C_{TI}^c (Yr 0 costs)	\$40.3M	\$80.0M	\$70.0M	\$22.7M	\$31.5M	\$171.8M
Yr 5 costs	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Yr 10 costs	\$0	\$0	\$1.6M ^b	\$0	\$0	\$0
Yr 12 costs	\$0	\$0	\$0	\$141.6M ^a	\$0	\$0
Yr 20 costs	\$0	\$0	\$1.4M ^b	\$0	\$0	\$0
Yr 25 costs	\$0	\$0	\$0	\$0	\$116.6M ^a	\$0
Yr 30 costs	\$108.3M ^a	\$0	\$1.2M ^b	\$0	\$0	\$0
Yr 35 costs	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Yr 40 costs	\$0	\$0	\$1.0M ^b	\$0	\$0	\$0
Yr 45 costs	\$0	\$0	\$86.7M ^a	\$0	\$0	\$0
Yr 50 costs	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Total future cost (C_{TF})	\$108.3M	\$0	\$91.9M	\$141.6M	\$116.6M	\$0
RV	\$59.8M	\$0	\$76.2M	\$40.3M	\$54.4M	\$26.1M
C_{NP}	\$88.7M	\$80.0M	\$85.8M	\$124.0M	\$93.7M	\$145.7M

Cette analyse a montré que les chapes minces en BFUP (UHPC) prolongent la durée de vie des tabliers de ponts (*Estimated service life* = L_S au Tableau 2.3) et amènent une réduction des interventions de maintenance dans le temps (*Yr x costs*), ce qui réduit leur coût à long terme (C_{NP})

sur une période d'analyse de 50 ans, justifiant ainsi leur investissement initial. En effet, comparé au béton modifié au latex (LMC) et au nouveau tablier préfabriqué, le BFUP présente un coût initial variant entre 40.3 et 80 millions de dollars, contre 22.7 millions pour le LMC et 171.8 millions pour un pont préfabriqué. Cependant, avec sa durée de vie prolongée, estimée à 50 ans dans certaines configurations, soit 4 fois celle du LMC (12 ans) et ses besoins réduits en maintenance, la solution de chape en BFUP devient la plus économique à long terme. De plus, l'analyse du C_{NP} démontre que, malgré un investissement initial plus élevé, le BFUP permet de minimiser les coûts de maintenance et de remplacement, rendant ainsi son adoption plus avantageuse sur le cycle de vie du pont. Son faible besoin d'interventions et sa résistance accrue aux agressions environnementales limitent les interruptions de trafic et les coûts indirects associés aux travaux d'entretien (McDonagh, 2022). Ainsi, en tenant compte des coûts globaux sur 50 ans, de la réduction des perturbations et de la performance à long terme, les chapes en BFUP s'imposent comme une alternative optimale, alliant résistance, rentabilité et durabilité, et justifiant pleinement leur utilisation pour la réhabilitation des tabliers de ponts.

2.1.7.2 Réduction des impacts environnementaux

Tout comme pour le coût économique, le coût environnemental initial du BFUP est supérieur à celui des bétons conventionnels, même s'il a le potentiel écologique d'intégrer des matériaux « recyclés » (ajouts minéraux divers, granulats recyclés, etc.) (Zhang et al., 2022). Son bilan carbone important est principalement dû à la grande quantité de fibres et de ciment, qui demandent tous deux beaucoup d'énergie pour être produits. Bouhaya et al. (2009) ont mené une étude qui évalue l'impact énergétique et les émissions de CO_2 d'un pont mixte bois-BFUP. Avec une consommation de 73.4 % de l'énergie primaire totale consommée, ils mettent de l'avant l'impact environnemental majeur de la production du BFUP en comparaison aux phases de transport, de construction, de maintenance et de démolition du pont qui, dans cette étude, ne représentent respectivement que 0.9 %, 2.2 %, 20.7 % et 2.8 % de l'énergie primaire totale consommée.

Étant donné le bilan environnemental initialement moins favorable du BFUP, pour un volume donné de béton, il est important de favoriser son utilisation de manière optimale, en ciblant les éléments dans lesquels il sera utilisé à bon escient (structures hybrides, par exemple) et en optimisant les épaisseurs requises de matériau pour assurer une durabilité accrue tout en assurant

également le comportement mécanique recherché. Les quantités moindres de matériaux (béton, armatures) utilisés avec le BFUP et l'augmentation de la durabilité permettent de compenser le bilan environnemental initialement moins favorable du BFUP (Abellán-García et al., 2024a). Dans le cas du pont Guillermaux situé à Payerne en Suisse, et réhabilité en 2015 à l'aide d'une chape mince de BFUP d'une épaisseur de 50 mm, une évaluation du cycle de vie a montré que l'intervention en BFUP avait un impact environnemental 50 % plus faible que la réparation traditionnelle avec une chape plus épaisse (Bertola et al., 2021).

D'autres études ont mis de l'avant l'avantage d'une construction avec BFUP sur le plan environnemental, dans d'autres contextes que les chapes minces. Batoz et Rivallain (2010), par exemple, ont comparé le bilan environnemental d'un pont mixte (treillis en acier avec tablier en béton conventionnel) couramment utilisé en Amérique de Nord avec un autre pont de même longueur et même nombre de voies de circulation où les poutres et tablier sont réalisés avec le BFUP. Cette étude, dont les résultats sont résumés à la Figure 2.8, ciblait trois critères phares, soient la consommation d'énergie primaire totale, la contribution à l'effet de serre et l'épuisement des ressources naturelles et énergétiques. Le pont en BFUP s'est révélé largement plus performant sur le plan environnemental que le pont mixte, en particulier dû à une forte réduction sur les quantités de matériaux mises en œuvre. De plus, l'étude ne se limite pas à la phase de construction initiale, mais prend en compte l'ensemble du cycle de vie du pont, incluant la production des matériaux, le transport, la mise en œuvre, ainsi que la maintenance et la fin de vie.

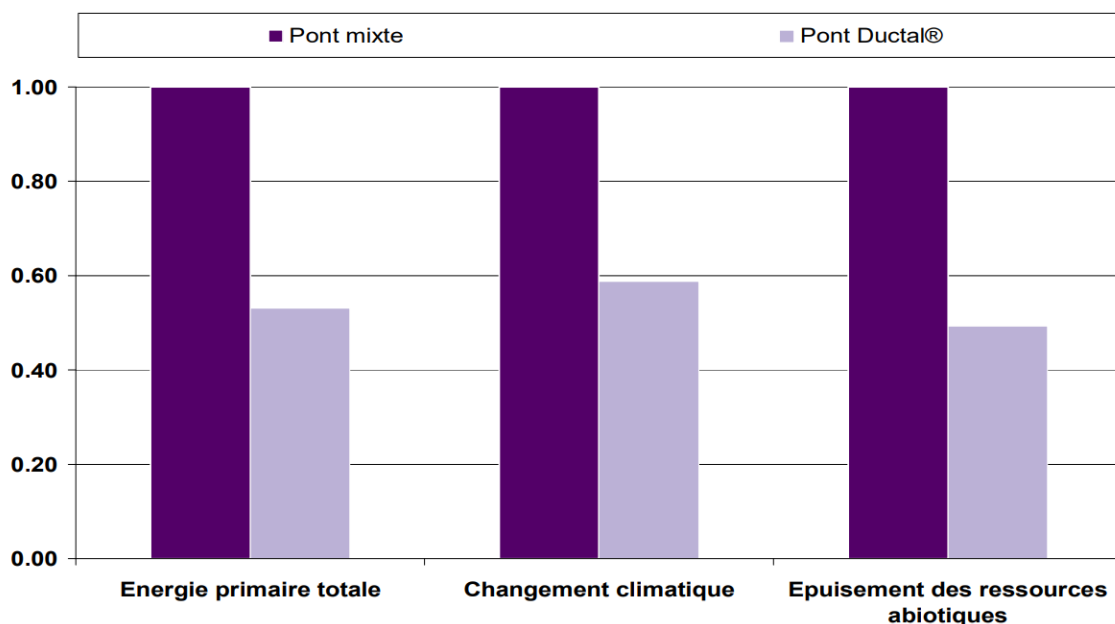


Figure 2.8 Comparaison de l'impact environnemental des deux conceptions de ponts, dont l'une avec du BFUP (Batoz & Rivallain, 2010)

2.1.7.3 Flexibilité d'utilisation et rapidité d'installation

Le BFUP peut être utilisé pour l'application visée dans ce projet, soit pour les chapes minces en BFUP, mais est également utilisé pour une large gamme d'autres applications (ponts, routes, bâtiments, ouvrages hydrauliques, etc.) et pour des besoins variés (réhabilitation, renforcement, protection/durabilité, aspect architectural avec des formes complexes et textures, etc.). Sa résistance et sa durabilité exceptionnelles permettent de concevoir des structures durables plus légères et plus fines, optimisant l'utilisation des matériaux et réduisant la charge permanente sur les fondations (Zhang et al., 2022). La Figure 2.9 illustre l'exemple de deux passerelles fines et complexes qu'il a été possible de concevoir avec le BFUP sans sacrifier la performance ou la durabilité de la structure (Bertola et al., 2021). Dans le cas des chapes en BFUP, la mise en place possible du BFUP en sections minces (jusqu'à aussi peu que 20 mm d'épaisseur), permet de réhabiliter la surface supérieure des dalles de ponts sans ajouter de poids excessif (Abellán-García et al., 2024b).

La quantité plus faible de matériau utilisée ainsi que la simplification des techniques de réparation, dans certains cas, comme le fait de ne pas avoir à remettre une membrane d'étanchéité dans le cas des chapes minces en BFUP, accélère les travaux et minimise les interruptions de trafic (Abellán-García et al., 2024b). Un exemple de gain de temps significatif est celui du pont Morge, le premier pont en Suisse dont la surface supérieure a été réhabilitée avec du BFUP. L'intervention a permis de le rouvrir au trafic seulement un mois après le début des travaux d'élargissement et de remplacement de la surface supérieure du tablier par une mince couche de BFUP (30 mm) (Bertola et al., 2021). Une réhabilitation plus conventionnelle de la surface supérieure du pont aurait nécessité des délais plus longs, notamment en raison des multiples étapes dans la mise en place, les caractéristiques de cure et les propriétés mécaniques moindres des bétons conventionnels utilisés par rapport au BFUP.

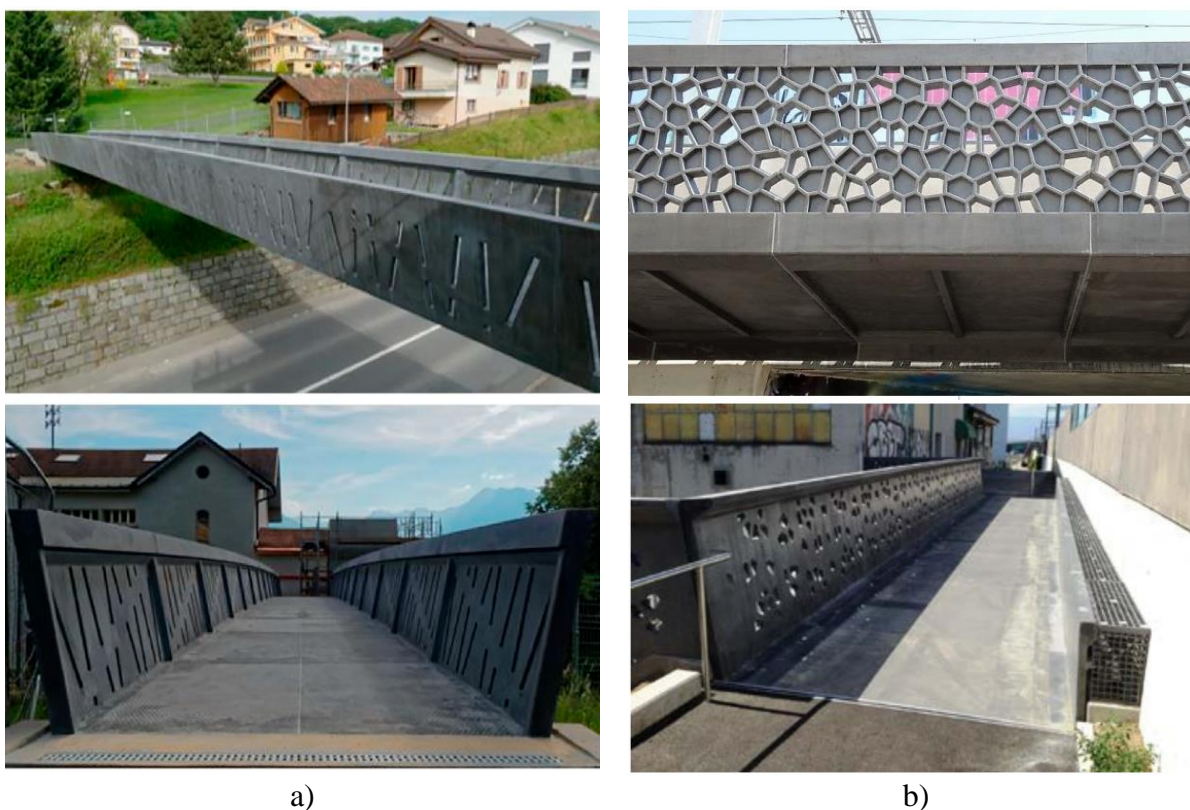


Figure 2.9 a) Passerelle Bouveret à proximité de l'embouchure du Rhône dans le Lac Léman (Suisse), b) Passerelle Martinet en ruche d'abeille à Lausanne (Suisse) (Bertola et al., 2021)

2.1.8 Synthèse sur les propriétés et avantages du BFUP

La composition particulière des BFUP, caractérisée par un très faible rapport E/L (0.15-0.25), la présence d'ajouts minéraux, l'absence de gros granulats, l'utilisation de sable fin, et l'utilisation d'un pourcentage élevé de fibres courtes (2 à 6 % volumique), leur confère des propriétés mécaniques et de durabilité exceptionnelle.

En termes de propriétés mécaniques, les BFUP présentent une résistance à la compression supérieure à 120 MPa et une résistance à la traction généralement de 10 à 15 MPa. Son comportement en traction se caractérise également par la présence d'une phase de comportement écrouissant avant l'atteinte de la résistance, durant laquelle seules des microfissures (< 0.05 mm) se forment. Cette phase d'écrouissage a lieu jusqu'à des déformations de l'ordre de celles requises pour plastifier une barre d'armature. Le comportement en traction du BFUP est donc très ductile et seules des microfissures sont attendues dans le BFUP en service. Dû à sa structure fine, sa compacité et ses composantes, le BFUP présente aussi l'avantage de fortement adhérer sur un béton de substrat, en comparaison à un béton conventionnel, et sa structure compacte et résistante lui confère une très bonne résistance à l'abrasion.

Un des seuls inconvénients résultant de la composition optimisée du BFUP est son retrait endogène plus élevé que les bétons conventionnels. Ce retrait peut cependant être contrôlé grâce à différentes méthodes de mitigation et le BFUP a prouvé son bon comportement vis-à-vis des problématiques de fissuration au jeune âge qui pourrait résulter de retraits importants en condition de restrainte. Donc, même s'il faut être conscient de ce retrait pouvant être un peu plus important, cet aspect ne présente généralement pas d'entrave importante pour la bonne réalisation d'un projet avec du BFUP.

En termes de durabilité, le BFUP réduit drastiquement la perméabilité à l'eau et aux chlorures en comparaison aux bétons conventionnels, que ce soit à l'état non-fissuré ou fissuré, augmentant ainsi la résistance à la corrosion, aux cycles gel-dégel et autres phénomènes de dégradation. De plus, sa capacité d'auto-cicatrisation accrue permet de colmater les fines fissures, renforçant sa durabilité à long terme.

Les propriétés énumérées ci-dessus confèrent au BFUP un rôle clé dans les projets de réhabilitation. Dans le cas de réparation de la surface supérieure de dalles de pont à l'aide d'une chape mince en BFUP, dont il est question dans ce projet, les propriétés mécaniques et de durabilité exceptionnelles

du BFUP lui permettent d'être utilisé en mince couche (20 à 50 mm), tout en assurant le bon comportement mécanique et l'étanchéité de cette couche. Les propriétés d'adhérence accrues du BFUP ainsi que sa bonne résistance à l'abrasion jouent, quant à elles, également un rôle essentiel pour garantir une réparation durable, en évitant la délamination avec l'ancien béton et en assurant un bon maintien de l'adhérence de la surface de roulement dans le temps.

La section qui suit portera sur les chapes minces en BFUP, allant du concept de ce type de réparation, aux étapes de réalisation d'une telle chape puis au retour d'expérience des chapes en BFUP déjà mises en place. Ce retour d'expérience est encore limité car il repose sur seulement quelques années d'utilisation (principalement 5 à 10 ans).

2.2 Chapes en béton

2.2.1 Concepts des chapes en béton

2.2.1.1 Chapes conventionnelles

Tel qu'indiqué dans le manuel d'entretien des structures du Ministère des Transports du Québec (2023b) à la section 5.4.2, il existe différentes options pour intervenir sur une dalle présentant une détérioration inférieur ou égal à 30 % dans le cas des routes à trafic fort, ou l'étendue des dommages est inférieur ou égal à 40 % dans le cas des routes à trafic faible. Parmi celles-ci, il est notamment possible de faire une réparation « classique » de la dalle, de mettre en place une chape de béton ou encore d'opter pour une combinaison de ces deux options. Le choix d'une option ou d'une autre dépend de plusieurs critères tels que l'étendue des dommages, le type et la géométrie de la dalle, l'évaluation des coûts, etc. Ces interventions, appliquées sur toute la surface supérieure de la dalle offrent une durée de vie généralement plus longue que celle de multiples réparations ponctuelles disséminées sur la surface de la dalle.

En ce qui concerne la réparation « classique » de la surface supérieure d'une dalle déficiente, elle consiste à enlever le béton détérioré, le remplacer par le nouveau béton, généralement de type V-S selon la nomenclature du MTQ, ce béton est de résistance de 35 MPa à 28 jours, puis venir mettre une nouvelle membrane d'étanchéité avant de poser l'enrobé par-dessus tel qu'indiqué à la section 5.3 du manuel d'entretien des structures du Ministère des Transports du Québec (2023b) et aux section 45 et 46 du devis de construction et réparation des structures du Ministère des Transports

du Québec (2023a). En ce qui concerne la chape en béton, qui devrait cette fois être en béton modifié au latex, l'idée est d'enlever une petite épaisseur de béton sur le dessus de la dalle, puis de mettre en place la chape. L'épaisseur recommandée de la chape est entre 40 et 90 mm, avec une épaisseur qui peut être plus importante localement. L'épaisseur maximale ne doit cependant pas dépasser 140 mm. Le manuel d'entretien des structures du Ministère des Transports du Québec (2023b) indique que ce type de réparation (chape) est particulièrement adaptée lorsque le recouvrement du béton au-dessus des armatures est insuffisant. Juste avant la mise en place de la chape, il est requis d'appliquer un coulis d'adhésion sur le substrat. Ensuite, une fois la chape mise en place, une membrane d'étanchéité ainsi qu'une couche d'enrobé sont généralement ajoutées mais, dans certains cas, la chape peut être utilisée directement comme surface de roulement. Dans ce dernier cas, des profils transversal ou longitudinal sont appliqués sur la surface de roulement à l'aide d'un équipement de finition approprié. À noter qu'il est interdit de circuler sur la chape avant que le béton ait atteint sa résistance spécifiée à 28 jours.

2.2.1.2 Chapes minces en BFUP

Dû aux propriétés avantageuses du BFUP, mises de l'avant à la section 2.1, l'utilisation de ce matériau pour des réparations de surface est rapidement devenue une option d'intérêt dans l'entretien et la réparation des tabliers de pont. Les chapes minces en BFUP consistent à éliminer une couche de béton détérioré et à la remplacer par une mince couche de BFUP (Figure 2.10) qui sert directement de surface de roulement après avoir subi une préparation de surface adéquate, tel que cela sera détaillé à la section 2.2.2.7. Dans ce concept, le BFUP fait également office de membrane d'étanchéité, évitant ainsi le remplacement de la membrane d'étanchéité conventionnelle.

Grâce à la compacité élevée du BFUP et à la présence des fibres d'acier, généralement 3.25 % en volume (FHWA-HRT-22-065, 2022; Haber Zachary B. et al., 2018; Khayat et al., 2023; Sritharan et al., 2018), ces chapes offrent une haute résistance à la compression, à la fissuration en traction, à l'abrasion et à la pénétration des agents agressifs tels que les ions chlorures. Elles adhèrent également fortement au substrat en béton ordinaire, sans requérir l'application d'un coulis d'adhésion, comme dans le cas des chapes de béton au latex. Cette bonne capacité d'adhérence du BFUP empêche la délamination de la chape, ce qui prolonge la durée de vie de la structure.

Avec une épaisseur pouvant être aussi petite que 25 mm (FHWA-HRT-17-096, 2017), mais qui est plus généralement de l'ordre de 50 mm (Brühwiler & Denarié, 2013), cette méthode de réparation des dalles de ponts est avantageuse lorsque le tablier d'un pont est structuellement sain mais que sa surface commence à présenter une détérioration excessive.

Les résultats d'une série de tests structuraux menés sur des dalles de béton conventionnelles avec des revêtements minces en BFUP indiquent également que la capacité structurale des tabliers de ponts augmente (Cao et al., 2023). Les chapes minces en BFUP permettent donc d'augmenter la durabilité de la structure tout en la renforçant et tout en évitant des travaux de démolition lourds. En présence de joints froids entre deux mises en place du BFUP, il faut prendre en considération ces zones plus vulnérables pour maintenir les performances structurales améliorées (Muzenski & Graybeal, 2023). Ce point s'applique également aux performances en termes d'étanchéité de la chape.

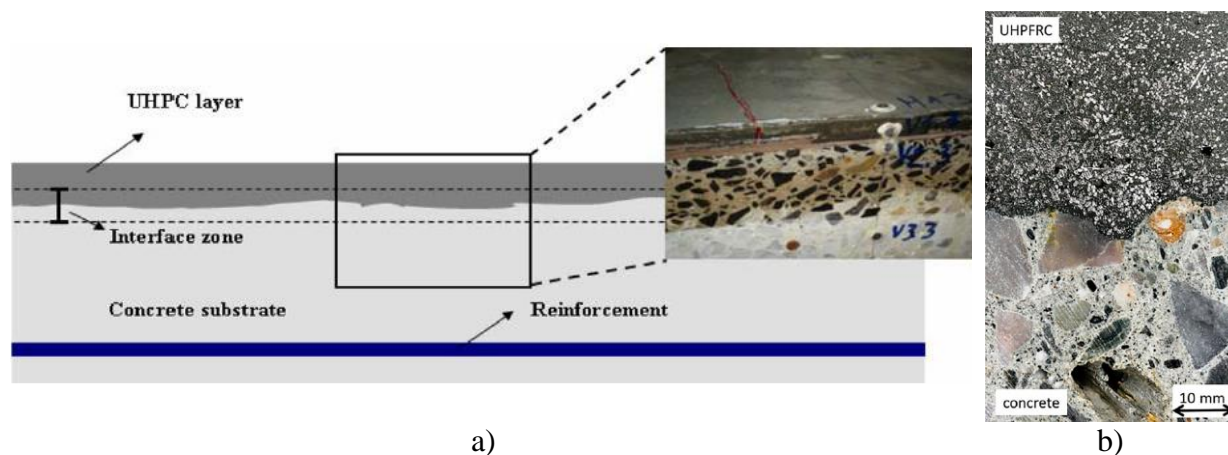


Figure 2.10 a) Chape mince en BFUP (Piérard, 2008) b) zoom sur le BFUP superposé sur du BO montrant la différence apparente entre les deux matériaux (Bertola et al., 2021)

2.2.2 Étapes de réalisation d'une chape mince en BFUP

Dans le domaine de la réparation et de l'entretien des infrastructures, des chapes minces en BFUP, sans remplacement de la membrane d'étanchéité, et sans enrobé, ont également commencé à être réalisées dans plusieurs endroits du monde, notamment en Europe et aux États-Unis.

Les sections 2.2.2.1 à 2.2.2.8 qui suivent détaillent les principales étapes de réalisation de ces réparations en BFUP, suite à la démolition du béton endommagé. Ces étapes comprennent la préparation du substrat, la mise en place du nouveau béton, la réalisation d'éventuels joints de construction, ainsi que la cure et la finition de la surface, dans le cas où celle-ci sert directement de surface de roulement. Pour ces différentes étapes de réalisation, les pratiques actuellement en vigueur au MTQ pour les réparations conventionnelles du dessus des dalles seront en premier lieu exposées, suivies des pratiques adoptées pour les chapes minces en BFUP, en mettant de l'avant les différences ou similitudes avec les réparations conventionnelles.

2.2.2.1 Préparation du substrat

La préparation de surface du substrat est essentielle pour assurer une bonne adhérence entre le nouveau béton et le substrat de béton existant.

Selon le (Ministère des Transports du Québec, 2023a), la préparation de la surface du substrat en vue de la mise en place d'une réparation conventionnelle, ou d'une chape, nécessite généralement une hydrodémolition, bien que la scarification soit autorisée si le recouvrement de béton au-dessus de l'armature le permet. Avant de procéder à l'hydrodémolition, un essai de calibration de l'équipement doit être réalisé pour ajuster différents paramètres (pression, vitesse, angle d'attaque, etc.) jusqu'à satisfaction du surveillant. Cet essai vise à confirmer que la méthode permet d'enlever tout le béton délaminé, ainsi qu'une épaisseur d'environ 10 mm dans les zones de béton non délaminé.

Suite à l'hydrodémolition, un nettoyage au jet d'eau sous pression est exigé pour obtenir une surface propre, exempte de tout débris, afin de garantir une bonne adhérence pour la mise en place du nouveau béton, qui est précédée par la mise en place d'un coulis d'adhésion. Ce processus s'applique tant aux réparations superficielles qu'aux réparations en profondeur.

Tout comme pour les réparations conventionnelles, ce substrat doit subir une préparation de surface adéquate. Plusieurs techniques de préparation de surface ont été étudiées dans la littérature ou projets existants, dans le contexte de chapes minces en BFUP. Les sections suivantes 2.2.2.2, 2.2.2.3, 2.2.2.4 et 2.2.2.1 décrivent les différentes techniques utilisées et donnent une première idée de leurs performances respectives. Dans le cas des chapes minces en BFUP, et contrairement aux

réparations conventionnelles, le BFUP est directement mis sur le substrat. Des informations additionnelles sur la performance mécanique de l'interface BO-BFUP obtenue avec différentes préparations de surface seront également données à la section 2.2.3.1.

2.2.2.2 Hydrodémolition

La préparation de la surface de substrat par hydrodémolition est similaire à celle adoptée pour les réparations conventionnelles. Avant l'application du BFUP, la surface du BO est traitée à l'aide d'un jet d'eau à haute pression pour enlever la couche détériorée (Helsel et al., 2023). Les paramètres tels que la pression d'eau, son débit, et l'angle d'attaque sont ajustés pour enlever une profondeur spécifique de béton (généralement 10 mm) en fonction de l'état de la surface. Ce procédé permet d'exposer les granulats et de créer une surface rugueuse idéale pour l'adhérence mécanique du BFUP (Figure 2.11a et Figure 2.12a). L'hydrodémolition permet également d'éliminer les parties détériorées du béton sans endommager la structure sous-jacente et donc sans causer de microfissures dans le substrat, tel qu'illustré à la Figure 2.12b (Haber et al., 2018) (Zhang et al., 2022). Les barres d'armatures ne sont pas non plus endommagées par l'hydrodémolition (Helsel et al., 2023). Finalement, cette méthode élimine également la laitance, les contaminants et les particules libres, laissant une surface propre et prête à recevoir le BFUP (Zhang et al., 2022).



a)



b)

Figure 2.11 Surface de tablier préparée par hydrodémolition a) (FHWA-HRT-22-065, 2022) b) (Khayat et al., 2023)

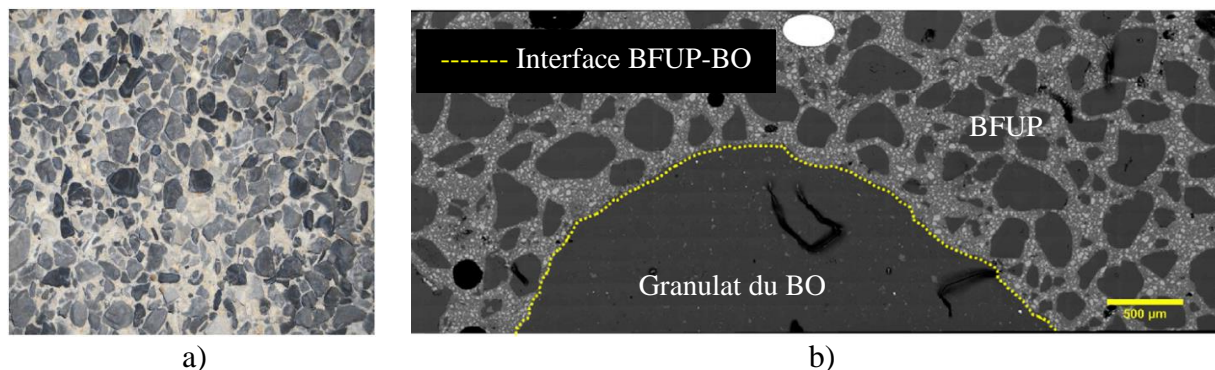


Figure 2.12 Résultats avec l'hydrodémolition a) Apparence des surfaces de substrat préparé par hydrodémolition b) Agrégats intacts dans le substrat du béton traité par hydrodémolition (Haber et al., 2018)

Haber et al. (2018) ont étudié la performance d'une surface du substrat préparée par hydrodémolition sur la liaison entre le revêtement en BFUP et ce substrat. Pour ce faire, l'hydrodémolition a été appliquée sur le substrat du tablier de pont, de telle sorte à enlever environ 1/2 pouce (13 mm) du substrat. La couche de BFUP (38 mm) a ensuite été mise en place puis des carottes ont été prélevées dans le BFUP et le substrat afin d'être testées en traction directe pour évaluer la résistance en traction de l'interface entre les deux (Figure 2.13). Dans cet essai, la rupture a eu lieu dans le substrat, avec une résistance à la traction moyenne obtenue de 3.41 MPa, ce qui prouve une très bonne adhérence entre le substrat préparé par hydrodémolition et la chape de BFUP. À titre de comparaison, pour les chapes au béton modifié au latex, le Ministère des Transports du Québec (2023a) exige que l'adhérence de l'interface chape-substrat soit minimalement de 0.9 MPa à 28 jours.

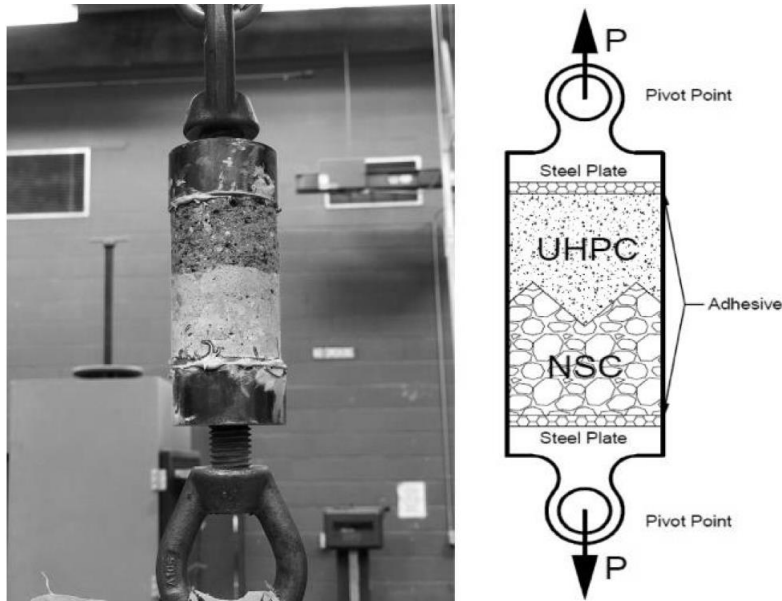


Figure 2.13 Configuration du test de traction directe utilisé par Haber et al. (2018) et Al-Basha et al. (2019)

2.2.2.3 Scarification

La scarification consiste à utiliser une machine munie de lames dentées rotatives pour gratter la surface du béton existant, enlevant une épaisseur d'environ 3/8 pouce (10 mm) (Haber et al., 2017). Elle crée une texture rugueuse (Figure 2.14a), généralement de profil CSP9, selon l'échelle de rugosité de l' (Helsel et al., 2023); International Concrete Repair Institute (2016). Contrairement à l'hydrodémolition, la scarification peut introduire des microfissures dans le béton de substrat (Figure 2.14b), ce qui peut affecter la liaison entre le BFUP et le substrat (Zhang et al., 2022).

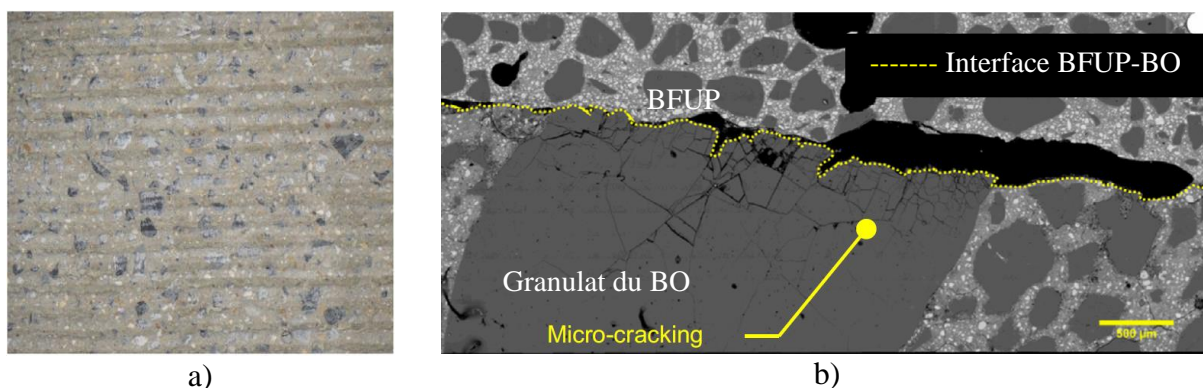


Figure 2.14 Scarification a) Apparence des surfaces de substrat préparées par scarification b) Granulats détériorés dans le substrat en béton ordinaire préparé par scarification (Haber et al., 2018)

Des essais de traction par arrachement, réalisés à même une chape de BFUP mise en place sur un substrat rainuré légèrement avec une profondeur moyenne de texture de 0.9 mm (Al-Basha et al., 2019) et sur une dalle de pont en béton préparé par scarification (6-9.5mm) (Haber et al., 2018), ont mis en évidence une rupture au niveau de l'interface BFUP-substrat (Figure 2.15). Les zones en jaune représentent les portions du BFUP qui sont restées adhérentes au substrat, avec des résistances à la traction de 0.44 MPa (Al-Basha et al., 2019) et de 0.79 MPa (Haber et al., 2018), soient des valeurs beaucoup plus faibles de que celle présentées à la section précédente pour la surface préparée par hydrodémolition. La faible résistance obtenue de la liaison BFUP-substrat peut être attribuée aux microfissures induites dans le substrat lors d'une scarification excessive (Haber et al., 2018).

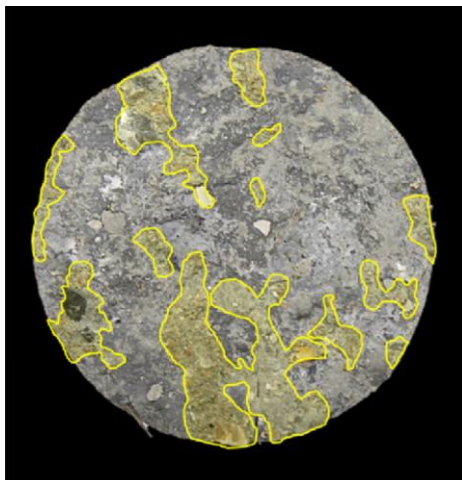


Figure 2.15 Surface de rupture d'un échantillon avec substrat en béton scarifié testé en traction directe (Haber et al., 2018)

2.2.2.4 Autres méthodes de préparation du substrat

En plus de l'hydrodémolition et de la scarification, qui sont souvent coûteuses en raison de l'équipement et de la main-d'œuvre spécialisée requise, il existe d'autres méthodes plus abordables pour la préparation du substrat, telles que le meulage et le sablage, mais qui sont moins efficaces pour certains types de surfaces ou dommages de la dalle (Helsel et al., 2023), ou encore le grenaillage ou la préparation au marteau piqueur (Al-Basha et al., 2019).

Al-Basha et al. (2019) ont réalisé des essais de traction directe sur des échantillons BFUP-BO dont la surface du BO (substrat) avait été préparée à l'aide d'un marteau pneumatique, résultant en un profil de surface présentant une profondeur moyenne de texture de 1 mm. Les résistances obtenues étaient plus élevées qu'avec une préparation du substrat par scarification. Ce résultat est attribué à une plus grande surface d'adhérence et à une meilleure exposition des granulats et des pores permettant une meilleure liaison avec le BFUP.

Le grenaillage consiste à projeter des billes d'acier sphériques généralement de 1 mm de diamètre sur la surface du béton, à l'aide d'une machine à roue en carbure de tungstène tournant à 300 tr/min. Cette technique permet d'enlever la couche superficielle de béton (entre 1 et 5 mm) et de créer une surface relativement rugueuse (environ CSP 3) (Helsel et al., 2023) (Figure 2.16). La taille des billes et l'intensité du grenaillage peuvent être ajustées. La technique est efficace pour enlever la

surface de laitance et les contaminants, mais ne permet pas d'enlever les parties de béton profondément détériorées (Zhang et al., 2022).



Figure 2.16 a) Finition de surface par grenaillage b) Équipement utilisé (Helsel et al., 2023)

La préparation de surface par sablage est réalisée à l'aide d'un pistolet pneumatique et fournit la surface la moins rugueuse de toutes les préparations vues à présent (CSP 1 à 2) (Figure 2.17). Que ce soit dans le cas du grenaillage présenté précédemment ou du sablage, un équipement de protection spécifique ainsi que des systèmes de confinement sont requis pour capturer le sable ou les grenailles (Harris et al., 2015).



Figure 2.17 Finition de surface par sablage a) rugosité du substrat obtenue b) Équipement utilisé (Helsel, 2023)

Finalement, pour ce qui est du meulage au diamant, une machine équipée de disques abrasifs diamantés est utilisée pour lisser et texturer la surface du béton (Khayat et al., 2023) (Figure 2.18). Cette technique de préparation du substrat ne permet pas toujours de fournir une rugosité de surface idéale pour l'application du BFUP et peut également enlever une couche plus importante de substrat (Helsel et al., 2023)

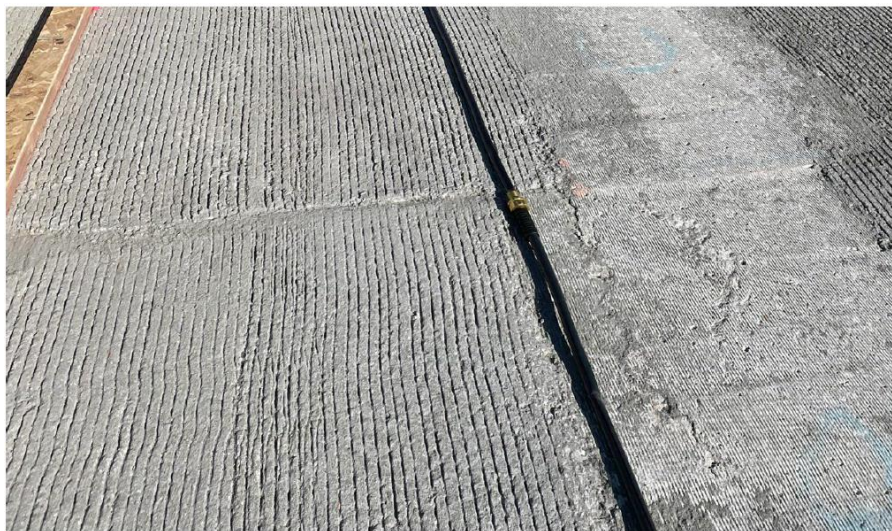


Figure 2.18 Meulage au diamant de la surface du pont Z (Khayat et al., 2023)

Tout comme pour le grenaillage, le meulage au diamant est plus adapté pour préparer la surface que pour éliminer des parties de béton fortement détériorées. Aussi, plusieurs passages peuvent être nécessaires pour atteindre la rugosité souhaitée (Zhang et al., 2022).

2.2.2.5 Synthèse sur les méthodes de préparation du substrat

La Figure 2.19 résume les rugosités de surface du substrat obtenues selon différentes méthodes de préparation utilisées, classées de celle qui fournit la surface la plus rugueuse à la surface la moins rugueuse, selon l'échelle CSP de l'International Concrete Repair Institute (2016) (points gris sur la Figure 2.19). Sur cette même figure, des mesures de profil de surface réalisées à l'aide d'un laser sont également représentées (points noirs). Parmi les techniques de préparation de surface

représentées à la Figure 2.19, l'hydrodémolition est celle qui offre la plus grande rugosité (Helsel et al., 2023). Cette technique est généralement considérée comme la méthode la plus efficace pour garantir une adhérence optimale entre le BFUP et le substrat en béton ordinaire. Elle permet de préparer la surface sans provoquer de microfissures et crée une texture rugueuse idéale pour l'adhérence mécanique et chimique. La méthode de préparation de surface choisie doit cependant être adaptée aux conditions spécifiques du projet, en tenant compte de l'état du substrat, de l'étendue de la réparation, et des exigences structurelles (Zhang et al., 2022).

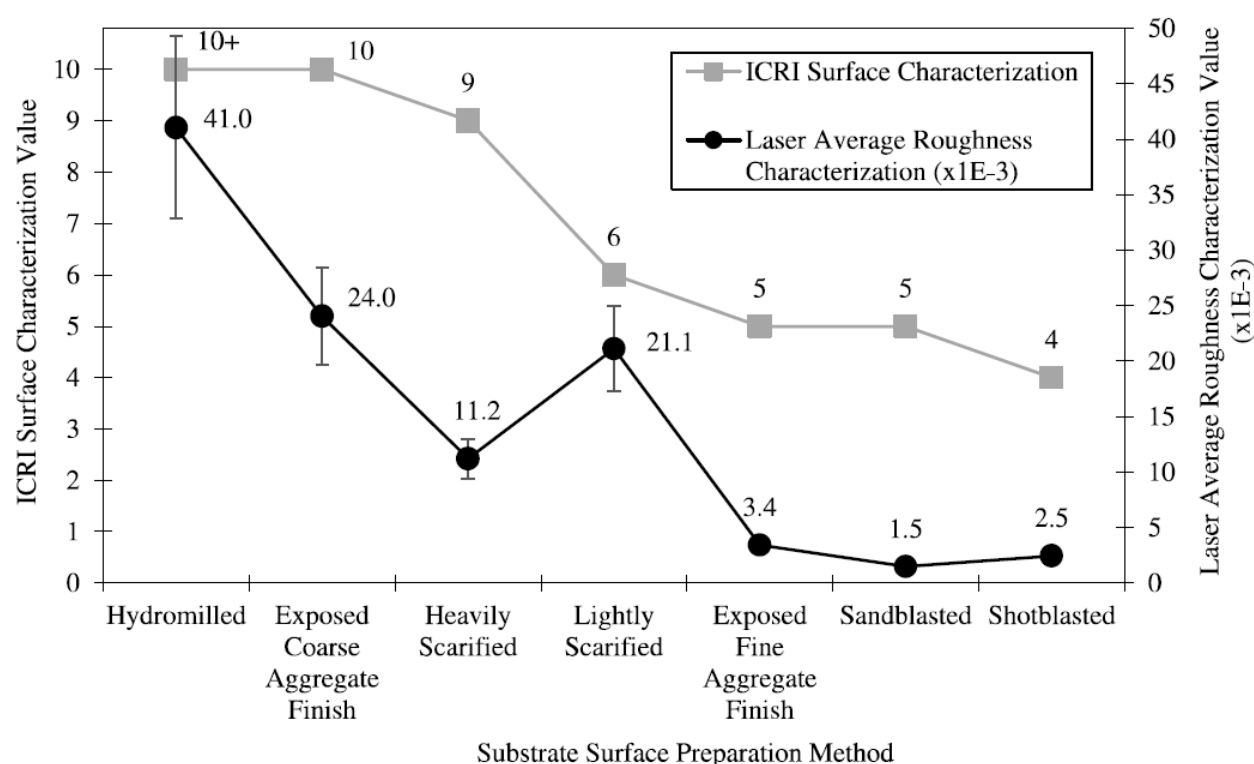


Figure 2.19 Caractérisation de la rugosité de surface du substrat pour différentes méthodes de préparation : classement de la surface la plus rugueuse à la moins rugueuse selon l'échelle CSP de l'ICRI (Helsel et al., 2023)

2.2.2.6 Équipements et techniques de mise en place de la chape

Selon le Ministère des Transports du Québec (2023a), pour les réparations de surfaces supérieures de dalles, que ce soit à l'aide d'une réparation classique ou d'une chape en béton modifié au latex,

les surfaces démolies doivent être nettoyées au jet d'eau haute pression suivi d'un jet d'eau sous pression, de manière à l'exempter de tout débris et d'éliminer tout résidu d'enrobé bitumineux ou de membrane d'étanchéité, et ce immédiatement après la préparation de surface du substrat par hydrodémolition, et avant l'assèchement de cette surface. Un second nettoyage au jet d'eau, similaire au premier doit être fait dans le cas où la mise en place du nouveau béton a lieu plus de 24 heures après le premier nettoyage.

Avant la mise en place du béton, il faut vérifier que la surface du substrat a un profil de surface minimal de type CSP 7 selon l'échelle de rugosité de l'International Concrete Repair Institute (2016). La surface doit également être humidifiée jusqu'à saturation mais sèche en surface (état SSS : saturé surface séchée). Dans le cas des chapes en béton modifié au latex, un coulis d'adhésion composé de ciment, latex et sable est ensuite appliqué sur la dalle et brossé à l'aide d'un balai à poils raides. Le béton au latex doit ensuite être mis en place dans les 5 minutes suivant l'application du coulis d'adhésion.

En ce qui concerne les chapes minces en BFUP, les techniques de mise en place impliquent également une préparation minutieuse de la surface du substrat. Tel qu'indiqué à la section 2.2.2.1, la préparation de surface optimale pour une bonne adhérence entre le BFUP et le substrat est très similaire à celle d'une réparation en béton conventionnelle ou d'une chape en béton modifié au latex. L'hydrodémolition est la plus souvent utilisée (exemple du pont M au Missouri aux USA (Abellán-García et al., 2024b), même si certaines chapes minces en BFUP ont été réalisées avec d'autres préparations de surface, par exemple du meulage au diamant pour le pont Z au Missouri aux USA (Abellán-García et al., 2024b). Une fois la surface préparée et propre, un état SSS est requis avant la mise en place du BFUP tout comme pour les chapes conventionnelles. Pour ce qui est de la mise en place de la couche de BFUP, directement sur le substrat, des équipements spécifiques sont utilisés. Le BFUP est généralement préparé directement sur site à l'aide d'une centrale de malaxage mobile, pour garantir un mélange frais et homogène. Le mélange est ensuite transporté vers la zone d'application par des camions-malaxeurs ou autre équipement. Selon le volume requis, des malaxeurs installés proche de la zone de mise en place peuvent également être utilisés, sans avoir besoin de recourir aux camions. Idéalement, une paveuse automatisée avec un système de nivellement est ensuite utilisée pour bien étaler le BFUP et garantir une épaisseur uniforme de la chape. Finalement, l'utilisation de règles vibrantes permettent de compacter le

BFUP et d'éliminer les bulles d'air, assurant ainsi une densité optimale du matériau (Abellán-García et al., 2024b).

La Figure 2.20 illustre certaines étapes des travaux de chapes minces en BFUP réalisées sur les ponts des routes M et Z dans l'état du Missouri, aux États-Unis (Khayat et al., 2023). La Figure 2.20a illustre la préparation de surface par hydrodémolition du pont M suivie de son nettoyage, alors que la Figure 2.20b illustre l'épaisseur visée de la chape de ce pont, qui était ici de 1.5 pouces (38 mm). Avant de mettre en place le BFUP, le substrat était humidifié pendant 1 jour pour être en condition SSS (Figure 2.20c). Le BFUP, dont les matériaux secs ont été mesurés et préemballés dans de gros sacs (Figure 2.20d), était ensuite malaxé (Figure 2.20e), puis mis en place sur le pont directement depuis le malaxeur (Figure 2.20f). Pour finir, le BFUP était ici étalé à l'aide d'un râteau et la surface était finie à l'aide d'une règle vibrante (Figure 2.20g). La Figure 2.21 illustre un autre exemple de mise en place du BFUP, cette fois à l'aide d'un mini camion benne.



a)



b)

Figure 2.20 Mise en place du BFUP a) nettoyage de la surface en béton après l'hydrodémolition, b) épaisseur prévue de la chape en BFUP (1.5 pouces), c) pré-humidification du substrat avant la coulée du revêtement pour avoir un état SSS, d) mise en place du BFUP, e) matériaux secs dans des gros sacs, f) chargement des matériaux dans le malaxeur et g) finition de la surface du BFUP avec des râdeaux, une règle vibrante et des truelles (Khayat, 2023)



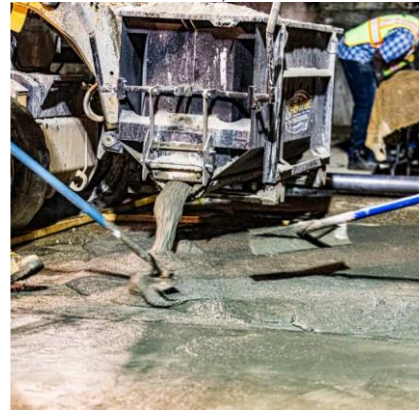
c)



d)



e)



f)



g)

Figure 2.20 Mise en place du BFUP a) nettoyage de la surface en béton après l'hydrodémolition, b) épaisseur prévue de la chape en BFUP (1.5 pouces), c) pré-humidification du substrat avant la coulée du revêtement pour avoir un état SSS, d) mise en place du BFUP, e) matériaux secs dans des gros sacs, f) chargement des matériaux dans le malaxeur et g) finition de la surface du BFUP avec des râpeaux, une règle vibrante et des truelles (suite) (Khayat, 2023)



Figure 2.21 Mise en place de la chape en BFUP à l'aide d'un mini camion-benne et son compactage avec une règle truelle vibrante (Haber et al., 2018)

2.2.2.7 Réalisation des joints de construction

Des joints de construction sont nécessaires lorsque la mise en place du béton ne peut pas être réalisée de manière continue. Dans ce cas, une planche en bois installée verticalement délimite la section de chape à couler en premier lieu. Une fois le béton de cette première coulée durci, l'autre section de chape est coulée pour prolonger la section précédente (Qasim & Sultan, 2020).

Pour les réparations classiques et chapes en béton au latex, les directives du Ministère des Transports du Québec (2023a) indiquent qu'un produit époxy à faible viscosité faisant partie de la liste des matériaux relatifs au béton éprouvés par la direction générale du laboratoire des chaussées du Ministère doit être utilisé pour remplir tous les joints BO-BO de construction transversaux et longitudinaux.

Dans le cas des chapes minces en BFUP, tout comme dans les réparations/chapes conventionnelles, les joints froids BFUP-BFUP représentent une zone plus faible dans la structure réparée en comparaison au béton composant la chape. Cependant, dû à la grande capacité d'adhérence du BFUP, additionnée d'une géométrie et d'une préparation de joint adéquate, dont certaines

permettent d'exposer des fibres d'acier au niveau du joint, le joint BFUP-BFUP présente une plus grande résistance au cisaillement et une plus grande ductilité qu'un joint BO-BO (Jang et al., 2017). Un tel joint BFUP-BFUP ne nécessite donc pas d'ajout de produit époxy.

Dans les chapes minces en BFUP, pour que le BFUP puisse jouer son rôle de barrière étanche, les joints de construction doivent être conçus de telle sorte à maximiser l'adhérence entre le BFUP durci et le BFUP frais, à minimiser les infiltrations d'eau et à assurer la continuité mécanique. Pour ce faire, un retardateur de prise est tout d'abord appliqué sur la surface du coffrage de la première section de BFUP coulée, là où sera le joint avec l'autre section par la suite, puis un jet d'eau sous pression est ensuite appliqué sur cette surface suite au démoulage de la paroi verticale en bois, afin d'exposer les fibres et d'obtenir une bonne rugosité de surface (Figure 2.22).



Figure 2.22 Finition avec fibres exposées sur un joint de construction de BFUP (FHWA-HRT-22-065, 2022)

Des barres d'armature sont également ajoutées et une géométrie de joint en forme d'escalier est généralement adoptée (Figure 2.23). Cette géométrie, conseillée dans les documents de la FHWA-HRT-22-065 (2022), permet d'augmenter la surface de contact au niveau du joint, renforçant son étanchéité et créant un verrouillage mécanique entre les phases de construction (FHWA-HRT-22-065, 2022). Le comportement des joints BFUP-BFUP sera détaillé à la section 2.2.3.3.

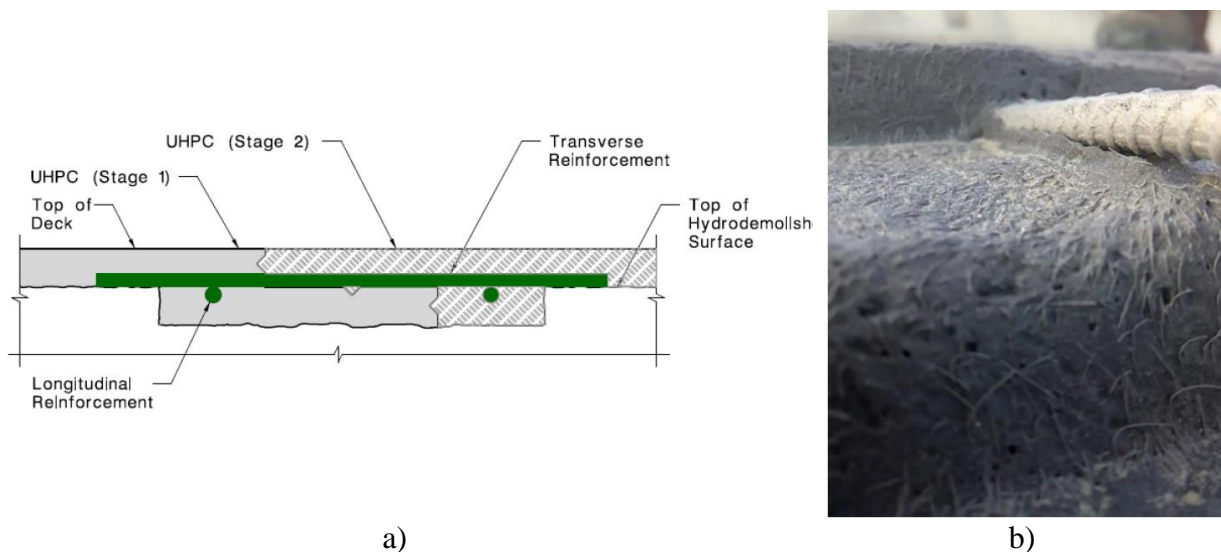


Figure 2.23 Détail du joint de construction en escalier pour une chape mince en BFUP, a) Schéma, b) Photo du joint de la chape en BFUP du pont I-295 au-dessus de Mantua Creek à Paulsboro, et de sa préparation de surface avec fibres exposées (FHWA-HRT-22-065, 2022)

2.2.2.8 Finition et cure de la surface de roulement en BFUP

Selon le Ministère des Transports du Québec (2023a), lorsqu'une chape en béton modifié au latex est directement utilisée comme surface de roulement, la finition et les profils transversal et longitudinal du béton de la chape doivent être réalisés au moyen d'un équipement de finition de type finisseuse à béton automotrice ou de type règle vibrante. En ce qui concerne la cure, elle est similaire à celle appliquée sur les dalles neuves en béton. En fin de cure, il faut vérifier avec une règle de 3 m le profil de la surface de la chape. Aucune irrégularité ou dépression ne doit excéder en tout point 5 mm dans 3 m, mesurée selon la méthode d'essai LC 26-600 du MTQ. Un rainurage transversal postérieure à la cure doit également être effectué à l'aide d'un peigne à espacement irrégulier. Ce rainurage doit être uniforme sur toute la largeur du tablier et doit s'arrêter à une distance comprise entre 300 et 150 mm du chasse-roue ou de la glissière. La rainure doit avoir une largeur de $3 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ et la profondeur de l'empreinte dans le béton doit être comprise entre 3 et 6 mm, sans déloger le granulat.

En ce qui concerne les chapes minces en BFUP, la finition du BFUP se fait généralement au moyen de règle vibrante. En ce qui concerne la cure, plusieurs techniques de cure similaires à celles

utilisées pour les bétons conventionnels sont utilisées. Ainsi, dès la fin de la mise en place du BFUP, le taux d'évaporation est contrôlé en plaçant des plastiques ou un retardateur d'évaporation (Figure 2.24a) sur le BFUP fraîchement mis en place. Des tissus géotextiles humides sont ensuite ajoutés pour conserver l'humidité (pendant 48h dans le cas de la chape représentée à Figure 2.24b). Dans certains cas, comme dans le cas des chapes des ponts des routes M et Z dans l'état du Missouri, aux États-Unis, la chape a été traitée à la vapeur pendant 72 heures à une température de 80 °C et une humidité relative d'au moins 95 %. À la fin du traitement à la vapeur, une fine couche de polyoléfine thermoplastique a été posée sur la couche de BFUP (Cao et al., 2023; Khayat et al., 2023). Alvarez et al. (2024) rappelle l'importance d'éviter une évaporation trop rapide de l'eau du BFUP fraîchement mis en place, qui pourrait accentuer le retrait endogène et mène à l'apparition de fissures isolées telles que celles visibles à la Figure 2.25 (Alvarez et al., 2024). Dans le cas des conditions climatiques froides, en plus des techniques utilisées pour conserver l'humidité, des systèmes de chauffage sont utilisés pour maintenir une température adéquate pendant la cure, à savoir des couvertures chauffantes ou les ventilateurs d'air chaud (Abellán-García et al., 2024b).



a)

Figure 2.24 Cure du BFUP, a) Application d'un retardateur d'évaporation au BFUP fini, b)
Toile de jute humide et feuille de plastique (Khayat, 2023)



b)

Figure 2.24 Cure du BFUP, a) Application d'un retardateur d'évaporation au BFUP fini, b) Toile de jute humide et feuille de plastique (suite) (Khayat, 2023)



Figure 2.25 Apparition de fissures sur la 1^{ère} coulée d'une chape mince de BFUP (Alvarez et al., 2024)

Trois jours après la mise en place du BFUP, une fois que le BFUP a atteint une dureté suffisante, la surface peut être rainurée par scarification (Figure 2.26) afin d'obtenir la texture nécessaire pour

assurer une adhérence adéquate aux véhicules circulant sur le pont (Wibowo & Sritharan, 2018). Le zoom de la texture à la Figure 2.26 montre des fibres d'acier qui dépassent. Ces parties exposées des fibres se détachent rapidement dans le temps et ne posent aucun problème d'endommagement des pneus ou autre.



Figure 2.26 Finition de surface du BFUP à l'aide de la scarification (Wibowo & Sritharan, 2018)

2.2.3 Retour d'expérience sur les chapes en BFUP

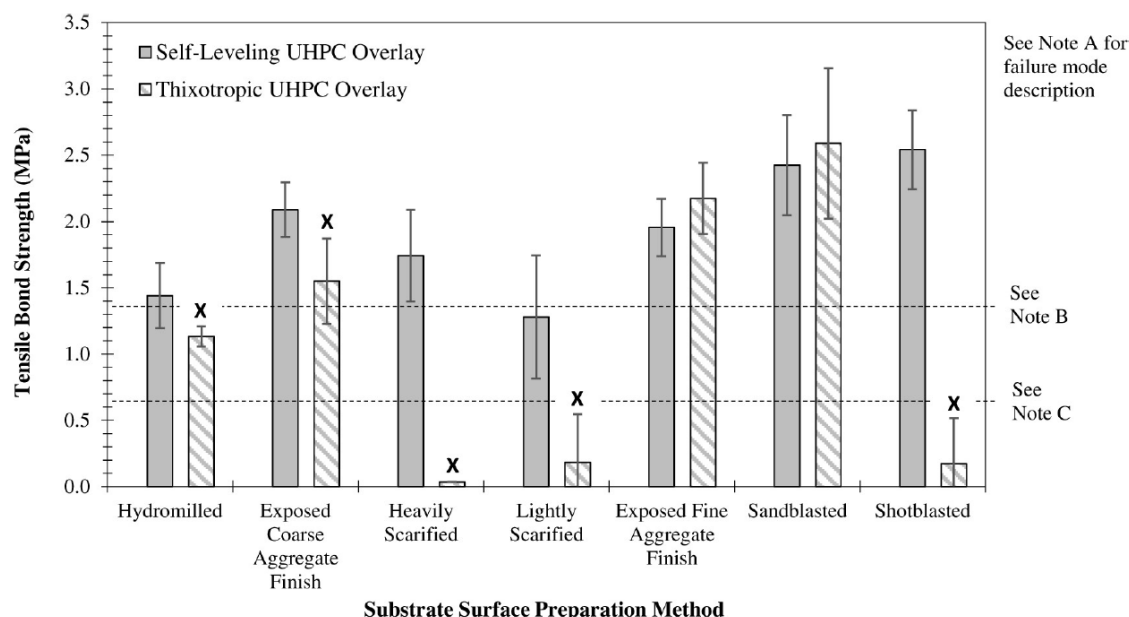
2.2.3.1 *Adhérence du BFUP au substrat*

L'adhérence des revêtements en BFUP dépend fortement de l'état de surface du béton existant (substrat), qui dépend lui-même de la méthode utilisée pour préparer cette surface, tel qu'indiqué à la section 2.2.2.1.

Helsel et al. (2023) ont évalué la résistance à la traction de l'interface BFUP-BO, pour différentes méthodes de préparation du substrat (BO). Comme le montre la Figure 2.27, le mode de rupture dépend fortement de la méthode de préparation du substrat et du type de BFUP (autoplaçant ou thixotropique). Pour le BFUP autoplaçant, les ruptures se sont majoritairement produites dans le substrat, indiquant une bonne résistance à l'adhérence de l'interface, même avec des préparations de surface induisant des rugosités limitées. Toutefois, le BFUP thixotropique, moins fluide, a présenté davantage de ruptures à l'interface, particulièrement avec des préparations de surface moins performantes (légèrement scarifié ou par grenailage). Dans ces travaux, les méthodes de

préparation par sablage ou par exposition des granulats fins ont offert les meilleures performances pour les deux types de BFUP, réduisant les ruptures à l'interface.

Il est intéressant de remarquer à la Figure 2.27 que la résistance en traction est assez similaire, autour de 2 MPa, pour les deux types de préparation de surface avec granulats exposés (exposition faible et élevée), quoique légèrement plus faible avec l'exposition faible des granulats. Les résultats présentés par le FHWA pour différents niveaux d'expositions des granulats (faible, moyen et élevé illustrés à Figure 2.28) vont dans le même sens (Figure 2.29). Alors que l'adhérence (résistance en traction) est plus élevée en augmentant l'exposition des granulats, dans le cas où un coulis sans retrait est mis en place sur le substrat, elle est assez similaire pour les différents niveaux d'exposition des granulats, et beaucoup plus importante qu'avec le coulis, dans le cas où le coulis est remplacé par du BFUP. Cela indique que le BFUP a de meilleures propriétés d'adhérence, même sans une exposition élevée des granulats (FHWA-HRT-16-081).



Note A : Tous les échantillons ont échoué dans le substrat en béton, sauf indication par un "X". Les échantillons marqués d'un "X" ont échoué à l'interface entre le BFUP et le béton.

Note B : Ligne directrice indiquant une adhérence acceptable telle que définie dans ACI 546.3R-06 (>1.38 MPa)

Note C : Ligne directrice indiquant une faible adhérence telle que définie dans ACI 546.3R-06 (<0.69 MPa).

Figure 2.27 Résistance de l'adhérence en traction entre les revêtements en BFUP et le substrat en béton (Helsel, 2023)

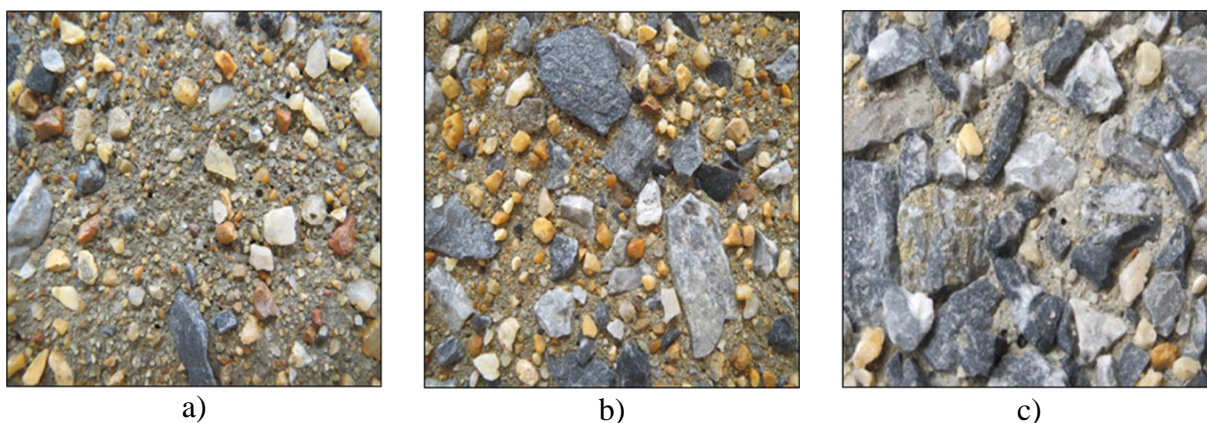
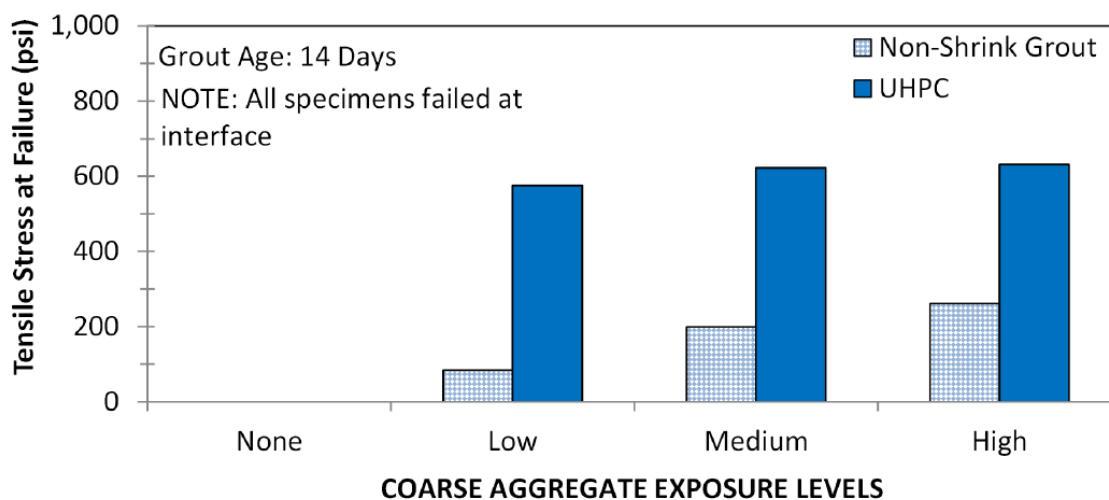


Figure 2.28 Exemple de différents niveaux d'exposition des granulats, a) faible exposition, b) exposition moyenne, c) exposition élevée (FHWA-HRT-16-081)



1 psi = 0.007 MPa.

Figure 2.29 Résistance d'adhérence en traction directe d'un coulis cimentaire sans retrait et d'un BFUP en fonction du niveau d'exposition des granulats (FHWA-HRT-16-081)

Dans l'étude de Haber et al. (2018), les meilleurs résultats ont été obtenus avec une préparation par hydrodémolition (Figure 2.30), avec une résistance moyenne à la traction atteignant 3.42 MPa, ce qui dépasse largement le seuil d'adhérence acceptable défini par l'ACI 546.3R-06 (> 1.38 MPa) (Helsel, 2023). Les surfaces scarifiées ont, quant à elles, présenté des résistances plus faibles, avec une moyenne de 0.78 MPa, en deçà du seuil recommandé. Les essais sur le terrain ont également

confirmé que l'usage de méthodes de préparation qui minimisent la formation de microfissures, comme le meulage au diamant, améliore l'adhérence au substrat, en comparaison à la scarification qui peut endommager la matrice du béton et affecter la performance de l'adhérence.

Avant de mettre en place une chape mince en BFUP sur le pont Mud Creek à Iowa (USA), la surface du substrat (BO) a été préparée par hydrodémolition en enlevant les 6 mm supérieurs du tablier pour créer une rugosité adéquate, avec une amplitude de profil de 2 à 3 mm. La couche de BFUP a bien adhéré à la surface préparée sans nécessiter l'installation d'ancrages mécaniques supplémentaires entre les deux bétons (Sritharan et al., 2017), confirmant le bon comportement observé par Haber et al. (2018) avec l'utilisation de l'hydrodémolition.

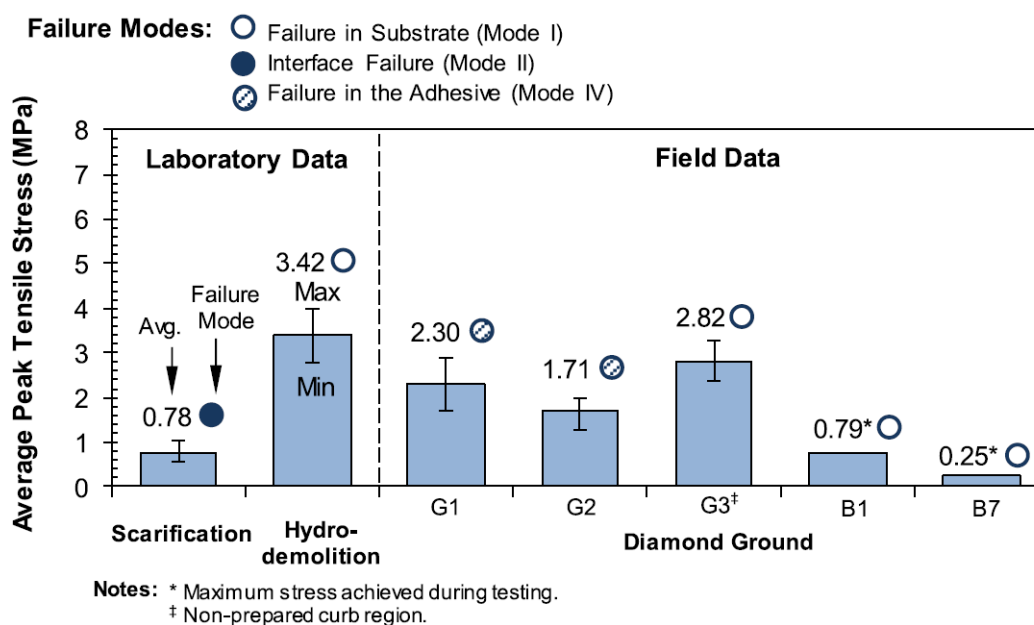


Figure 2.30 Adhérence au substrat, résultats des tests en laboratoire et in-situ (Haber et al., 2018)

Tel qu'illustré par les résultats présentés dans cette section, l'adhérence entre le BFUP et le substrat est influencée par le type de préparation du béton existant. Cependant, pour un type de préparation de surface spécifique, des variations dans l'adhérence pourraient survenir en raison de différences dans l'exécution de la préparation, la consolidation du BFUP, la propreté de surface et les conditions d'humidité de la surface du substrat (FHWA-HRT-17-096, 2017). Un état saturé surface

séchée (SSS) est souvent recommandée pour optimiser la liaison (FHWA-HRT-16-081) tel qu'indiqué à la section 2.2.2.4. Il faut donc porter une attention particulière à l'ensemble de ces aspects pour une adhérence optimale de la chape au substrat.

2.2.3.2 Fissuration au jeune âge des chapes

Dans le concept de chape mince en BFUP, la chape joue le rôle de barrière étanche. Il est donc intéressant de regarder les retours d'expérience quant à la résistance à la fissuration de la chape.

Tel qu'indiqué à la section 2.1.4, si une attention particulière est portée au retrait du BFUP et qu'une quantité suffisante de fibres est utilisée, la chape ne devrait pas présenter de fissuration suite à sa mise en place, si cette dernière est faite adéquatement (BFUP à retrait modéré, BFUP homogène, conditions de cure adéquates, etc.). Le retour d'expérience sur la majorité des chapes en BFUP confirme cela (Abellán-García et al., 2024a; Cao et al., 2023; Khayat et al., 2023). Dans le cas du pont Mud Creek en Iowa aux États-Unis, par exemple, la chape de 38 mm d'épaisseur, n'a pas présenté de fissuration au jeune âge, ce qui a été relié à la teneur en fibres d'acier adéquate (3.25 % vol.). La formulation thixotrope du BFUP a également permis au BFUP de rester en place sur des surfaces inclinées, empêchant des écoulements indésirables ou des variations d'épaisseur, qui pourraient créer des zones faibles sujettes aux fissures (Sritharan et al., 2017). Lors d'une inspection 96 jours après la mise en place de la chape en BFUP (2022) de la voie sud du pont de la route Z dans l'état du Missouri aux États-Unis (62 m de longueur et épaisseur de 38 mm) (Khayat et al., 2023) aucun signe de fissuration n'a non plus été observé.

Cependant, dans certains cas particuliers, de la fissuration a été observée sur certaines portions de la chape. Il est intéressant de mentionner ces cas afin de comprendre l'origine de cette fissuration, et l'éviter à l'avenir. Environ 25 % de la voie nord du pont de la route Z, mentionné au paragraphe précédent, a présenté des fissures importantes avec une longueur moyenne de 9 pouces (229 mm) et des largeurs allant de 0.01 à 0.04 pouces (0.25 à 1 mm). La cause identifiée est la qualité du BFUP, qui présentait des résistances en compression beaucoup plus faibles à cet endroit (jusqu'à 38 % inférieures à 2 jours et 24 % inférieures à 28 jours par rapport à la voie sud). Cette moins bonne qualité du BFUP est probablement expliquée par une humidité excessive dans le sable léger saturé (LWS) utilisé pour ce BFUP, pour ces lots problématiques. En ce qui concerne la chape en BFUP du pont de la Route M, et recouverte de neige 7 jours après la mise en place de la chape,

environ 45 % de la surface du tablier du pont montrait des microfissures après 81 jours (Figure 2.31). Ces fissures ont été expliquées par un développement insuffisant de la résistance à un âge précoce, associé à une baisse brutale de la température après trois jours, augmentant le risque de microfissuration dans le BFUP. Le manque de cure humide continue pendant les sept premiers jours a également contribué à augmenter le risque de fissuration (Khayat et al., 2023).



Figure 2.31 Fissures apparentes en surface des chapes mince en BFUP sur le pont, a) Route Z, b) Route M (Khayat et al., 2023)

En amont et en parallèle à la mise en place des chapes en BFUP sur les ponts M et Z, deux maquettes ont été réalisés. Les maquettes A et B (1.22 m x 2.44 m x 76 mm), dont la longueur des fibres est de 25 mm et 12 mm respectivement, ont été exposées à des conditions de climat extérieures pendant 5 mois, mais sans circulation pour étudier leur comportement. Aucune fissure n'a été observée sur la maquette A (Figure 2.32a). En revanche, 1 % de la surface de la maquette B a montré localement des signes de fissuration, avec des fissures allant jusqu'à 0.01 pouce (0.25 mm) en surface. Ces fissures ont été attribuées à l'absence de fibres en surface de la dalle, comme montré sur la Figure 2.32b (Khayat et al., 2023).

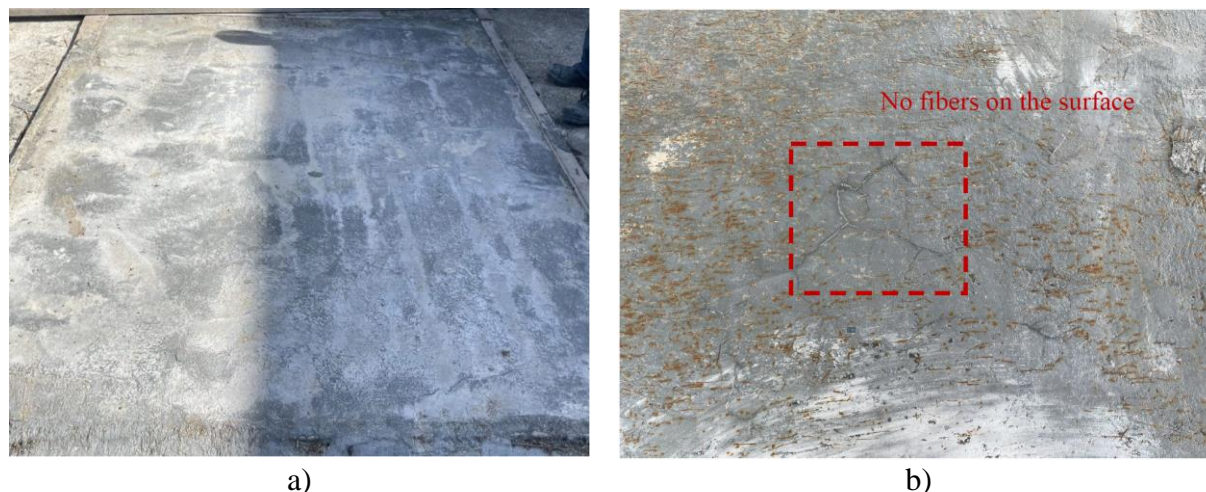


Figure 2.32 État des maquettes du pont m : a) Surface intacte de la maquette A, b) Vue rapprochée des fissures observées à la surface des revêtements en BFUP de la maquette B (Khayat et al., 2023)

Alors que la majorité des chapes minces en BFUP se sont très bien comportées en termes de fissuration au jeune âge, les quelques problèmes de microfissuration/fissuration rencontrés sur certaines portions de chapes minces en BFUP rappellent l'importance de considérer différents aspects lors de la réalisation de la chape. En plus de prêter une attention particulière au retrait endogène du BFUP, en choisissant idéalement un BFUP avec contrôle du retrait (cf. section 2.1.4), il est également important d'avoir une quantité suffisante de fibres avec une bonne répartition de ces dernières, ainsi qu'une cure adéquate, en évitant les chocs thermiques en fin de cure.

2.2.3.3 Comportement des joints de construction

Tel que vu à la section 2.2.2.7, lors de la mise en place d'une chape en BFUP, des joints doivent parfois être créés longitudinalement et/ou transversalement. Ces joints doivent être conçus pour être étanches tout en permettant le transfert des contraintes. En plus d'une préparation appropriée de la surface du BFUP durci pour assurer une bonne adhérence avec le BFUP frais, des barres d'armature supplémentaires sont généralement ajoutées pour renforcer la liaison entre les phases et transférer les contraintes lorsque le tablier est fonctionnel, et une géométrie de joint en escalier est généralement adoptée (FHWA-HRT-22-065, 2022).

Plusieurs chapes de BFUP ont été réalisés avec des joints. C'est le cas des ponts Laporte (Haber et al., 2018) et Mud Creek (Sritharan et al., 2017), en Iowa aux États-Unis, qui ont été divisés en deux sections longitudinales, avec le BFUP appliqué sur chaque voie séparément sur deux jours différents. Les deux études ne donnent pas réellement d'information quant à la performance des joints mis en place, mais elles mentionnent l'intérêt de mieux étudier le comportement de ce type de joint, en particulier en ce qui a trait à leur étanchéité, et de faire un suivi sur les joints mis en place dans les chapes en BFUP afin de valider leur bon comportement dans le temps. Il n'y a pas en effet d'études actuellement qui s'intéressent spécifiquement au comportement des joints BFUP-BFUP dans le contexte des chapes minces. Ceci justifie l'un des objectifs de ce projet de recherche, qui consiste à caractériser le comportement en traction et la perméabilité de ces joints.

Quelques études ont cependant été menées sur le comportement mécaniques des joints BFUP-BFUP dans d'autres contextes. C'est notamment le cas de l'étude de Semendary et al. (2022) qui s'intéresse au comportement en traction, cisaillement et compression-cisaillement de joints BFUP-BFUP (Figure 2.33) selon différentes préparations de surface du substrat en BFUP (Figure 2.34). Ils en arrivent à la conclusion que, tout comme pour les bétons conventionnels, la rugosité de la surface du substrat, et la présence de fibres d'acier au niveau de l'interface, joue un rôle crucial dans la performance des joints. Plus la surface est rugueuse (Figure 2.34a à e) et plus la résistance à la traction de l'interface augmente. Les surfaces rainurées (GR) suivies de celles nettoyées avec de l'eau sous haute pression pour enlever les fines et exposer les fibres (PW) ont montré les meilleures performances en traction avec un comportement ductile en raison d'une préparation approfondie qui favorise à la fois l'adhérence chimique et mécanique, tandis que les surfaces lisses (SM) et sablées (SB) ont montré un comportement fragile (Figure 2.33a). La résistance au cisaillement (Figure 2.33b) semble, elle, moins influencée par la rugosité de surface que la résistance à la traction.

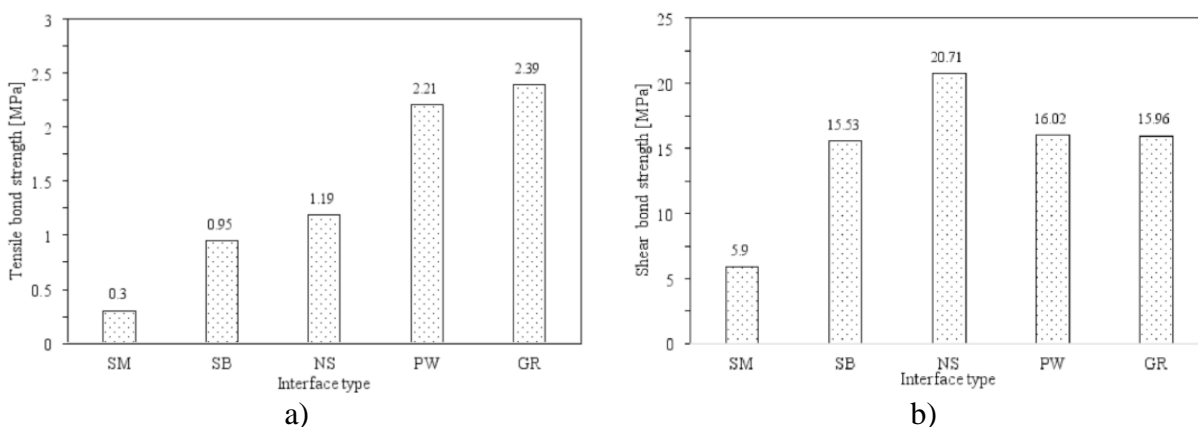


Figure 2.33 Effet de la rugosité sur la performance du joint sous, a) les contraintes de traction, b) les contraintes de cisaillement (Semendary et al., 2022)

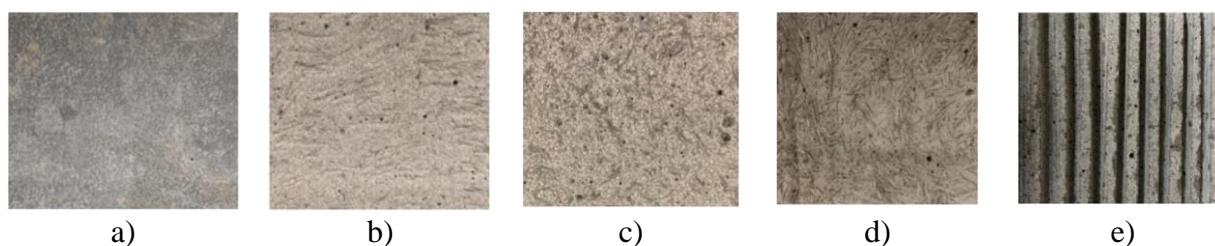


Figure 2.34 Différentes préparations de surfaces du substrat du joint, a) Surface lisse (SM), b) Surface sablée (SB), c) Surface traitée à l'aiguille (NS), d) Surface lavée sous pression (PW), e) Surface rainurée (GR) (Semendary et al., 2022)

2.2.3.4 Adhérence de la surface de roulement

L'adhérence de la surface de roulement d'une chape en BFUP est optimisée grâce à une préparation minutieuse et à une finition spécifique de la surface, qui consiste généralement en un meulage suivi d'un rainurage. Dans le cas de la chape en BFUP du pont principal de l'autoroute de Sheldon sur la rivière Floyd, Iowa (États-Unis, 2018), des rainures longitudinales par rapport à la direction de roulement, d'une profondeur comprise entre 2 mm et 3 mm, ont été réalisées. La surface de roulement de la chape mince (38 mm) du Pont Mud Creek en Iowa (États-Unis), mise en place en 2016 avec un BFUP contenant 3.25 % vol. de fibres d'acier, a également été meulée puis rainurée.

Bien que la dureté et la résistance du BFUP nécessitent un effort supplémentaire pour le meulage et le rainurage, la surface finale obtenue dans les deux cas a offert une excellente adhérence, en offrant une bonne interaction entre le pneu et la surface de la route et en limitant l'aquaplanage en cas de pluie (Abellán-García et al., 2024a; Sritharan et al., 2017). La Figure 2.35 illustre également l'état de la surface de roulement d'un pont après 2 ans de mise en service. Aucune modification notable du profil de surface n'est observée, ce qui est confirmé par une bonne adhérence toujours présente après ce temps (FHWA-HRT-22-065, 2022). À noter finalement que, bien que les fibres d'acier soient parfois exposées après le meulage, elles n'ont causé aucun problème de sécurité aux piétons, ni de dommages aux pneus des voitures. Ces fibres ont tendance à s'user ou à disparaître avec le temps en raison du trafic intense ou de l'abrasion naturelle, tel que visible sur la Figure 2.35b, en comparaison avec la Figure 2.35a.

Il importe de mentionner qu'il y a peu de données quantitatives sur la durabilité de la surface (adhérence, perte par abrasion ou autres phénomène tel que l'écaillage), ce qui confirme la pertinence du deuxième objectif de ce projet.



Figure 2.35 Finition de surface de roulement du BFUP a) peu après la mise en place b) après 2 ans en service (FHWA-HRT-22-065, 2022)

2.2.4 Synthèse

Les chapes minces en BFUP ont rapidement émergé comme une solution efficace pour la réhabilitation des tabliers de ponts, grâce à leurs propriétés mécaniques et de durabilité exceptionnelles. Leur mise en œuvre repose sur une préparation minutieuse du substrat, une application contrôlée du BFUP et une cure adaptée pour maximiser leur performance et éviter les problématiques liées au retrait endogène.

L'un des principaux avantages du BFUP réside dans sa très faible porosité, qui fait de lui un matériau idéal pour assurer l'étanchéité et prolonger la durée de vie des infrastructures. De plus, sa résistance mécanique élevée, permet d'utiliser des couches minces (généralement 38 à 50 mm), tout en garantissant une performance optimale.

La mise en place des chapes en BFUP nécessite toutefois une préparation rigoureuse de la surface du substrat, afin d'assurer une bonne adhérence et de prévenir le risque de délamination. L'hydrodémolition s'est révélée être la méthode la plus efficace, en offrant une surface rugueuse et propre, favorisant ainsi une liaison optimale avec le BFUP. D'autres méthodes, comme la scarification ou le meulage au diamant, ont également été utilisées, mais avec des résultats parfois inférieurs en termes d'adhérence.

L'adhérence de la surface de roulement a été optimisée grâce à des techniques de finition comme le meulage et le rainurage, garantissant une bonne interaction pneu-chaussée et une réduction des risques d'aquaplanage.

Les retours d'expérience sur les ponts Mud Creek, Z et M, ayant bénéficié d'un revêtement en BFUP, mettent en lumière les performances de cette technologie. Le pont Mud Creek (Iowa) a démontré un excellent comportement, sans fissuration notable après plusieurs mois en service. En revanche, des problématiques de fissuration localisée ont été observées sur le pont Z (voie nord, Missouri) et sur le pont M, attribuées respectivement à un excès d'humidité dans les granulats et à une exposition prématurée aux conditions hivernales. Ces observations soulignent l'importance de maîtriser l'humidité du BFUP et de prolonger la cure humide pour éviter les microfissurations.

Les essais en laboratoire, réalisés à travers des maquettes expérimentales, ont permis d'évaluer l'impact de la longueur des fibres et leur répartition sur la durabilité des chapes en BFUP et leur résistance à la fissuration.

En conclusion, les chapes minces en BFUP se présentent comme une alternative durable et performante pour la réhabilitation des tabliers de ponts, à condition de respecter des protocoles stricts de mise en œuvre, de préparation du substrat et de cure. Les études menées jusqu'à présent confirment leur capacité à prolonger la durée de vie des infrastructures, bien que des suivis à long terme restent nécessaires pour affiner les recommandations d'application.

CHAPITRE 3 PERFORMANCE EN SERVICE DE LA SURFACE DE ROULEMENT DE LA CHAPE EN BFUP

La performance en service des chapes en BFUP constitue un enjeu majeur. Cette performance de la chape est influencée par plusieurs critères dont son adhésion au substrat, la résistance à la fissuration au jeune âge causée par le retrait restreint de la chape, l'adhérence des véhicules à la surface de roulement de la chape, la résistance de la chape à l'abrasion sous l'effet du passage des véhicules et aux sollicitations environnementales (cycles de gel-dégel, l'épandage des sels de déglacage, étanchéité à l'eau).

Tel qu'indiqué et justifié dans le chapitre 1, ce projet s'intéresse en particulier au comportement à l'écaillage, à l'abrasion et à l'adhérence de la surface de roulement, ainsi qu'à l'étanchéité de la chape en service au niveau des joints froids. Ce chapitre 3 traite de la performance en service de la surface de roulement de la chape en BFUP (écaillage, abrasion, adhérence), alors que le chapitre 4 traitera de la performance en service des joints de la chape.

Pour chaque propriété étudiée dans ce chapitre (écaillage, abrasion, adhérence), une comparaison sera faite entre une chape en BFUP et celle en BO, ainsi qu'entre différents finis de surface de roulement pour la chape en BFUP. La section 3.1 présentera en premier lieu les bétons à l'étude. Les sections 3.2, 3.3 et 3.4 suivantes s'intéresseront aux comportements à l'écaillage, à l'abrasion et à l'adhérence respectivement. Chacune de ces sections comprendra une description du programme expérimental et du montage d'essai utilisé ainsi qu'une présentation et analyse des résultats obtenus.

3.1 Bétons à l'étude

3.1.1 Composition

Ce projet s'intéressant au comportement en service d'une chape mince en BFUP, il se focalise principalement sur ce type de béton. Cependant, quelques spécimens en BO, représentatifs d'un béton ordinaire utilisé dans les dalles, ont également été produits et testés dans ce projet, à titre de

comparaison avec le comportement du BFUP. Les compositions des deux types de béton étudiés (BO et BFUP) sont ici présentées.

Le BO utilisé a un rapport eau/liant de 0.42. Il est composé d'un ciment combiné de type GUb-SF (8 % massique de fumée de silice), de sable, de granulats de classe 2.5-10 mm, d'un entraîneur d'air et d'un superplastifiant (Tableau 3.1). Il est représentatif d'un béton de type V-S selon la classification du tome VII - Matériaux du MTQ (2023d), soit le type de béton exigé pour une dalle au Tome III - Conception ouvrages d'art du MTQ (2023c). La présence de l'agent entraîneur d'air permet de garantir le pourcentage d'air requis dans ce type de béton afin qu'il se comporte adéquatement vis-à-vis des cycles de gel-dégel et de l'écaillage.

Tableau 3.1 Composition du BO

Composantes	Quantité (en kg/m ³)
Eau	192
Ciment GUb-SF	460
Sable	859
Granulats 2.5-10	781
Entraîneur d'air	0.12
Superplastifiant	1.42
Masse volumique	2294

Le BFUP étudié a été développé à Polytechnique Montréal (Braïke, 2007) et est actuellement commercialisé par Sika Canada ® sous le nom Sikacrete®-910 UHPC. Il possède un rapport eau/liant de 0.18 à 0.2 et contient 3 % en volume de microfibres d'acier. Sa composition est présentée au Tableau 3.2. Un dosage en fibres de 3 % volumique a été choisi afin d'être représentatif de ce qui est généralement utilisé pour les chapes minces en BFUP (section Chapes minces en BFUP2.2.1.2).

Tableau 3.2 Composition du BFUP

Composantes	Quantité (kg/m ³)
Eau (liquide + glace)	213
Prémix (ciment + ajouts cimentaires + sable)	1948
Adjuvants	30.2
Fibres métalliques	234
Masse volumique	2425

Tous les spécimens dédiés aux essais d'écaillage, d'abrasion et d'adhérence, dont les résultats sont présentés dans ce chapitre, ont été prélevés d'une même gâchée, nommée G1 par la suite. Les tirants, dont les résultats seront présentés au chapitre 4 suivant, ont été produits en deux étapes. Une première portion des tirants (demi-longueur) a été produite avec le béton provenant de la gâchée G1, alors qu'une deuxième gâchée, nommée G2, a été réalisée 48 heures après la gâchée G1 pour compléter l'autre demi-longueur des tirants avec joint. Les propriétés des bétons aux essais à l'états frais et durci sont présentés dans les sections qui suivent, même si ce chapitre s'intéressera ensuite seulement aux résultats d'écaillage, d'abrasion et d'adhérence obtenus sur les bétons produits lors de la gâchée G1.

3.1.2 Propriétés à l'état frais

Le Tableau 3.3 présente les propriétés obtenues à l'état frais pour les deux bétons à l'étude. Le BO, de maniabilité courante avec un affaissement moyen de 73 mm, a présenté un pourcentage d'air représentatif de 5.8 % pour un béton de type V-S du MTQ. Le BFUP, quant à lui, était autoplaçant avec un étalement moyen au mini-cône de 268 mm et a présenté une bonne homogénéité et bonne répartition des fibres.

Tableau 3.3 Propriétés à l'état frais du BO et BFUP (G1&G2)

Essai à l'état frais	Norme d'essai	BO		BFUP	
		G1	G2	G1	G2
Température (°C)	CSA A23.2-17C	25.0	25.8	20.6	18.1
Masse volumique (kg/m ³)	CSA A23.2-6C	2294	2274	-	-
Affaissement (mm)	CSA A23.2-19C	75	70	-	-
Étalement (mm)	ASTM C1856	-	-	250	285
Teneur en air (%)	CSA A23.2-4C	6.0	5.6	-	-

3.1.3 Propriétés à l'état durci

Lors des productions de béton, des spécimens de caractérisation additionnels ont été prélevés afin de caractériser le comportement en compression (sur les gâchées G1 et G2) et en traction (sur la gâchée G2) des deux bétons à l'étude en plus des spécimens servant à l'évaluation de la performance en service indiqués à la section 3.1.1. Le Tableau 3.4 résume les essais de caractérisation effectués à l'état durci, les échéances d'essais ainsi que le nombre de spécimens testés pour les deux bétons étudiés (BO et BFUP).

Tableau 3.4 Essais de caractérisation à l'état durci pour le BO et BFUP

Essai à l'état durci	Type de béton	Normes d'essais	Nombre de spécimen par échéance	Échéances
Résistance à la compression f'_c	BO	(CSA A23.2-9C, 2019)	3	28j (G1 et G2)
	BFUP	(CSA A23.1:19 Annexe U, 2019)		+ fin d'écaillage (G1) + milieu essais tirants (G2)
Module d'Young E_c	BO	(ASTM C469, 2021)	1	28j (G1 et G2)
	BFUP	(ASTM C469, 2021) ⁽¹⁾		+ fin d'écaillage (G1) + milieu essais tirants (G2)
Résistance à la traction	BO	Traction indirecte, B_r (CSA A23.2-13C, 2019)	3	Milieu campagne d'essai sur tirants (G2)
	BFUP	Traction directe, f_t (Beaurivage, 2009)	4	

⁽¹⁾ Avec vitesse de chargement spécifiée dans CSA A23.1 :19, Annexe U pour les essais de compression

La caractérisation en compression (f'_c et E_c) a été réalisée à l'échéance classique de 28 jours pour les deux gâchées produites (G1 et G2) ainsi qu'à la fin des essais d'écaillage (pour la gâchée G1) ou au milieu de la campagne d'essai sur le comportement en traction des joints (pour la gâchée G2). Ces différentes échéances ont permis d'évaluer l'évolution des propriétés des bétons dans le temps, en particulier pour les essais qui se sont déroulés sur une plus longue période, tel que les essais d'écaillage.

Le concept de chape mince en BFUP mettant à profit le comportement en traction spécifique du BFUP, il est intéressant de bien caractériser ce comportement via l'obtention de la courbe complète de comportement. Le BFUP doit présenter une résistance en traction adéquate pour éviter les risques de fissuration (macrofissure) sous l'effet du retrait restreint ou autres sollicitations s'appliquant sur la chape en service (charges de trafic et conditions climatiques sévères répétitives). Le BFUP doit également présenter une déformation d'écrouissage en traction (avant le pic de résistance) adéquate afin d'assurer l'étanchéité, sans aucune macrofissure, en condition de service.

La caractérisation en traction a seulement été réalisée au milieu de la campagne d'essai sur le comportement en traction des joints, cette propriété étant plus mise à contribution dans cette 2^{ème} campagne d'essai qui sera décrite au Chapitre 4. Le type d'essai pour déterminer la résistance à la traction diffère pour le BO et le BFUP. La résistance à la traction a été déterminée de manière indirecte via l'essai de fendage pour le BO, alors que des essais de traction directe ont été réalisés sur des spécimens en forme d'os pour le BFUP selon une procédure interne développée par Beaurivage (2009). La Figure 3.1 présente la forme et les dimensions des spécimens en forme d'os. Cet essai de traction directe, qui est instrumenté par des capteurs de déplacement dans la zone centrale de section constante, permet d'obtenir la courbe complète du comportement en traction, soit l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation avant l'atteinte du pic de résistance ainsi que l'évolution de la contrainte en fonction de l'ouverture de la macrofissure dans la phase de comportement post-pic.

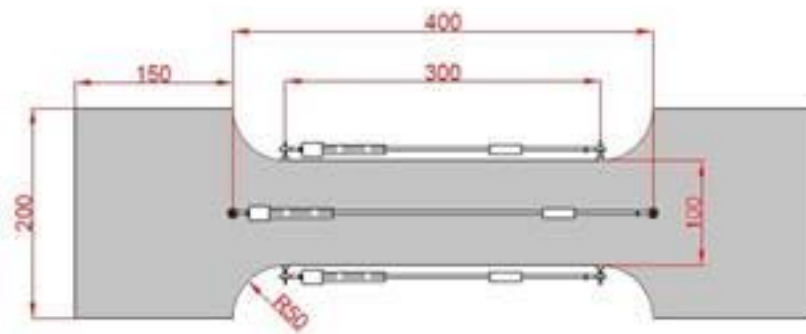


Figure 3.1 Dimension des spécimens de traction directe en BFUP et positions des capteurs de déplacement LVDTs (Beaudoin, 2021)

Tous les spécimens produits (ceux pour les essais du projet et ceux pour la caractérisation) ont été démoulés après 24 heures puis mis en cure. La cure appliquée est différente selon le type de spécimen. Les spécimens d'écaillage ont subi une cure de 14 jours humide puis 14 jours à l'air libre, tel que spécifié dans la norme CSA A23.1-22C :19 (2019). Étant donné que les essais d'abrasion seront réalisés, à titre de comparaison, sur des spécimens ayant ou non subi de l'écaillage, le même type de cure a été appliqué pour les spécimens dédiés aux essais d'abrasion. En ce qui concerne les tirants, qui seront détaillés au Chapitre 4, ils ont subi une cure humide de 7 jours pour refléter les conditions réelles de cure d'une chape de béton au chantier. Cette cure a été réalisée dans un bac d'eau saturée en chaux pour éviter que les barres d'armature corrodent durant ces 7 jours de cure. Les spécimens de caractérisation ont subi la même cure que les spécimens d'essais qu'ils sont censés représenter, soit 14 jours de cure humide pour les spécimens de compression (f'_c et E_c) des gâchées G1 et 7 jours de cure dans l'eau saturée en chaux pour les spécimens de caractérisation des gâchées G2.

Le Tableau 3.5 présente les propriétés à l'état durci pour les gâchées G1 et G2 des deux bétons à l'étude. Le BO a présenté une résistance à la compression f'_c à 28 jours moyenne de 59.6 MPa et un module E_c moyen de 35.1 MPa à la même échéance. Tel qu'attendu, le BFUP a présenté des résistances nettement supérieures à 28 jours, en moyenne 153 MPa à 28 jours et un module E_c moyen de 44.8 MPa. Le f'_c en fin d'essai était en moyenne 7 % plus élevé qu'à 28 jours pour les deux types de bétons, soit une différence non significative pour l'interprétation des résultats d'essai qui suivront.

Tableau 3.5 Propriétés à l'état durci des BO et BFUP produits

Propriétés	Échéances	BO		BFUP	
		G1	G2	G1	G2
f'_c (MPa)	28j	60.6	58.5	144.9	160.6
	Fin essai écaillage ou milieu essais tirants	59.9 (252j)	67.5 (189j)	158.6 (181j)	168.6 (196j)
	28j	36.8	34.1	45.9	43.7
E_c (GPa)	Fin essai écaillage ou milieu essais tirants	33.9 (252j)	30.0 (183j)	46.5 (181j)	44.7 (182j)
f'_t (MPa)	Milieu campagne d'essai sur tirants	-	-	-	8.7 (190j)
Br (MPa)		-	3.8 (172j)	-	-

En termes de comportement en traction, le BO a présenté une résistance Br de 3.8 MPa (soit un f'_t équivalent de 2.66 MPa) en comparaison à un f'_t de 8.7 MPa pour le BFUP (Tableau 3.5). Le comportement complet en traction du BFUP est illustré à la Figure 3.2, avec le comportement pré-pic en contrainte-déformation à la Figure 3.2a et le comportement post-pic en contrainte-ouverture de fissure à la Figure 3.2b. Les courbes individuelles des 4 spécimens testés sont représentés en bleu, alors que la courbe en rouge représente la courbe moyenne associée. Tous les spécimens testés ont montré un comportement en traction assez semblables, illustrant une densité et orientation des fibres assez homogènes dans l'ensemble des spécimens. La résistance moyenne en traction est de 8.7 MPa, avec une déformation ultime moyenne associée de $3468\mu\epsilon$ (Figure 3.2a). La résistance est un peu faible par rapport à ce qui est attendu d'un BFUP incorporant 3 % vol. de fibres, alors que la déformation ultime est dans l'ordre de grandeur attendu. Une fois qu'une microfissure se localise dans le spécimen, soit au pic de résistance, un comportement post-pic ductile est observé avec une dissipation progressive de l'énergie (Figure 3.2b).

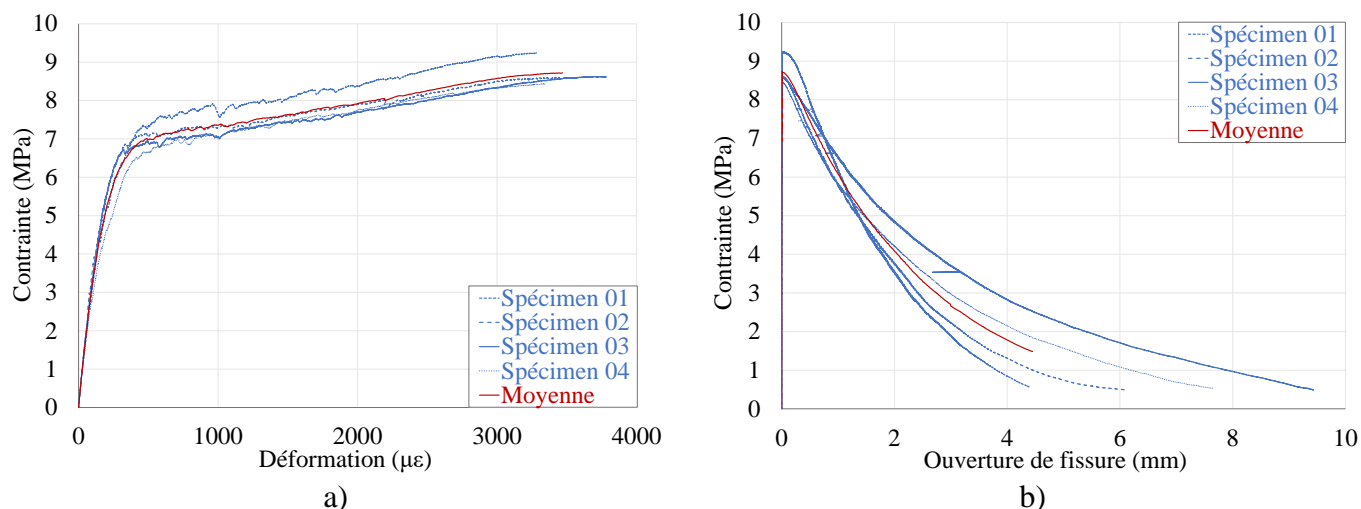


Figure 3.2 Comportement en traction du BFUP à l'étude : a) Courbe Contrainte- Déformation (pré-pic), b) Courbe Contrainte-Ouverture de fissure (post-pic)

3.2 Comportement à l'écaillage

3.2.1 Programme expérimental

Une campagne d'essai a été menée afin d'évaluer la résistance à l'écaillage du BFUP par rapport au BO, ainsi que l'impact de différentes finitions de surface appliquées au BFUP sur le comportement à l'écaillage. Ces essais ont pour objectifs d'étudier la durabilité de la surface de roulement d'une chape en BFUP sans enrobé bitumineux vis-à-vis des cycles de gel-dégel avec épandage de sels de déglacage, et d'évaluer l'impact du fini de surface sur cette durabilité. Les conditions d'essais, soit les finis de surface étudiés ainsi que le nombre de spécimens testés sont résumés au Tableau 3.6 pour les deux bétons à l'étude.

Tableau 3.6 Conditions testées en écaillage selon la norme CSA A23.2-22C (2019)

Fini de surface	BO	BFUP
Lisse	3 spécimens	3 spécimens
Granulats et fibres exposés	-	3 spécimens
Rainuré	-	3 spécimens

Afin d'éliminer l'éventuel impact des variations de finition manuelle d'un spécimen à un autre sur les résultats d'écaillage, et ainsi pouvoir évaluer « strictement » le gain potentiel de résistance à l'écaillage du BFUP par rapport au BO, la comparaison entre les deux types de béton a été réalisée sur une surface lisse. Celle-ci a été obtenue à partir de la surface coffrée inférieure du spécimen.

Les deux autres finitions de surface (fini avec granulats et fibres exposés ou fini rainuré), étudiées uniquement pour le BFUP, sont également réalisées depuis la surface inférieure de coffrage pour une comparaison plus précise entre les différentes conditions d'essai. La finition avec granulats et fibres exposés est obtenue à l'aide d'un retardateur de prise appliqué au pinceau dans le fond du coffrage avant la coulée du BFUP, puis l'application d'un jet d'eau sous pression sur cette surface après 24h. La finition rainurée est obtenue à l'aide de rubans de mousse collée équidistants sur le fond du coffrage. Le sciage du BFUP n'étant pas réalisable dans les conditions expérimentales, cette méthode a permis d'obtenir une texture de surface alternative. Toutefois, la distance entre les rubans a permis d'obtenir des rainures avec un espacement d'environ 12 mm supérieur à celui retrouvé sur les chapes en BFUP (section 2.2.2.8). La Figure 3.3 illustre les différentes surfaces obtenues pour le BO lisse, le BFUP lisse, le BFUP avec granulats et fibres exposés et le BFUP rainuré (Figure 3.3a à Figure 3.3d respectivement).

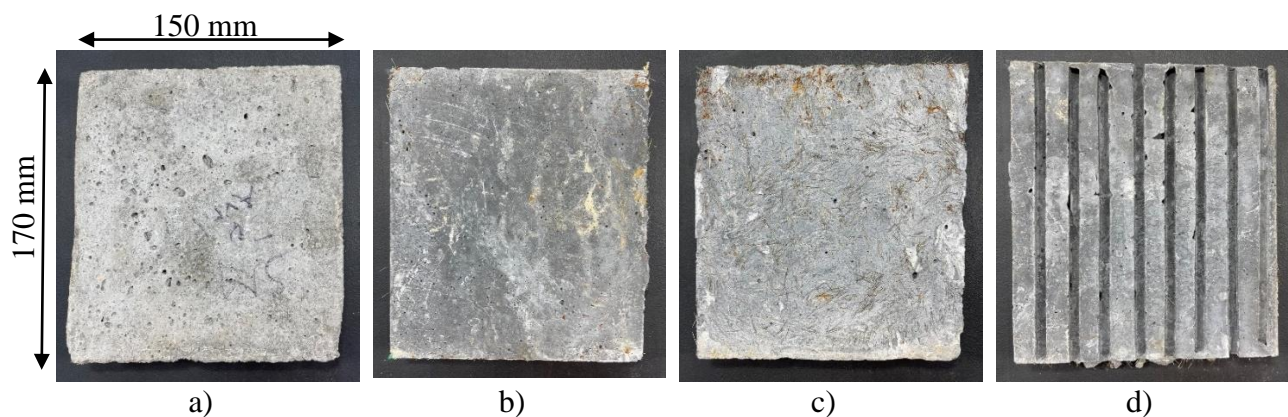


Figure 3.3 Surfaces de béton soumises à l'écaillage : a) BO lisse, b) BFUP lisse, c) BFUP avec granulats et fibres exposés et d) BFUP rainuré

3.2.2 Développement de l'essai

Avant ce projet, aucun essai d'écaillage n'était réalisé dans le laboratoire de structures de Polytechnique Montréal. Cet essai a donc dû être développé dans le cadre de ce projet de recherche. Ceci comprend le développement de la méthodologie de préparation des plaques, la configuration des cycles de gel-dégel appliqués durant l'essai, ainsi que la méthodologie de récupération et de mesure des débris ayant écaillés à intervalles réguliers durant l'essai.

La norme CSA A23.2-22C (2019) a été utilisée comme référence pour développer ces essais. La dimension des plaques d'écaillage est de $170 \times 150 \times 75$ mm (largeur \times longueur \times hauteur). La surface des spécimens exposée aux sels a donc été réduite de 43 %, avec une aire de 25 000 mm² versus un minimum de 45 000 mm² spécifié dans la norme. Ce choix a été fait pour les besoins spécifiques de ce projet, notamment pour des aspects pratiques de limitation de place dans l'appareil de conditionnement utilisé pour l'application des cycles de température.

3.2.2.1 Préparation des spécimens

Suite à leur démoulage, et tel qu'indiqué à la section 3.1.3, les spécimens pour les essais d'écaillage sont placés en chambre humide pendant 14 jours, puis laissés à l'air libre un autre 14 jours, soit la cure spécifiée dans la norme CSA A23.2-22C (2019).

Une digue, d'une profondeur d'environ 1 pouce (25 mm) est installée autour de la plaque pour accueillir la solution saline sur la surface exposée. Pour ce faire, une bande de 800 mm de long de membrane Foilskin (aluminium à l'extérieur – élastomère collant à l'intérieur) est prédécoupée d'un rouleau de dimension 6'' par 33', pour couvrir le contour de la plaque (Figure 3.4).



Figure 3.4 Préparation de la membrane Foilskin qui servira à la fabrication de la digue recueillant la solution saline

De la colle MasterWeld 948 de la compagnie BASF est ensuite appliquée uniformément, à l'aide d'une spatule, sur le contour de la plaque. La bande prédécoupée de Foilskin est ensuite placée progressivement sur la colle en la guidant avec la spatule pour évacuer les bulles d'air, d'abord horizontalement puis ensuite verticalement, jusqu'à ce que la colle déborde et remonte en surface, assurant ainsi un joint bien étanche pour la digue (Figure 3.5).



Figure 3.5 Méthodes d'application de la colle et de mise en place de la membrane Foilskin autour du spécimen

Une fois la colle bien sèche, soit 24 à 48 heures après sa mise en place, une hauteur de 5 ± 2 mm de solution saline est mise sur la surface exposée (Figure 3.6a et Figure 3.6b). Un polythène épais est ensuite positionné au-dessus de cette surface pour empêcher l'évaporation de la solution durant l'essai d'écaillage (Figure 3.6c). Une fois la solution saline et le polythène placés sur la plaque, cette dernière est laissée à température ambiante durant 7 jours avant de débiter l'essai. Ce pré-conditionnement respecte les exigences de la norme CSA A23.2-22C (2019).

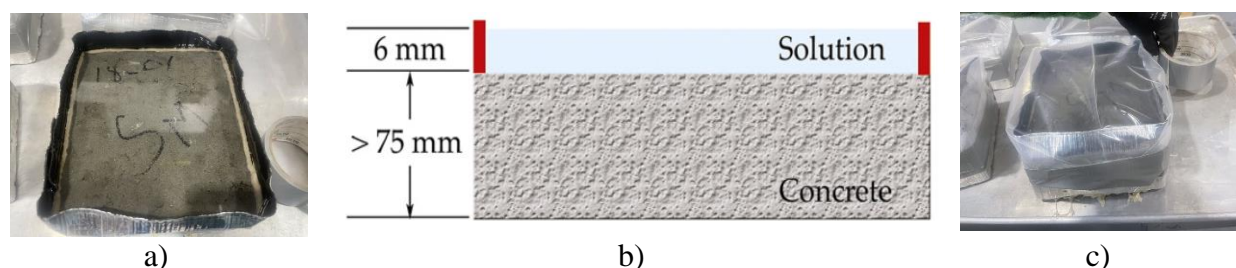


Figure 3.6 Pré-conditionnement des spécimens a) Spécimen avec la solution saline sur la surface exposée, b) Schématisation de la plaque d'écaillage (Valenza II et Scherer (2007) et c) Mise en place du polythène sur le spécimen

Suite au pré-conditionnement décrit ci-dessus, les spécimens sont placés dans l'appareil de conditionnement et l'essai d'écaillage peut débiter. Les sections qui suivent présentent les cycles de gel-dégels appliqués ainsi que la méthode de détermination de la quantité de matériau ayant écaillé au cours de l'essai.

3.2.2.2 Application des cycles de gel-dégel

La norme CSA A23.2-22C (2019) exige de maintenir la température de la surface de béton exposée à la solution saline à -18 ± 3 °C pendant un minimum de 7 h et un maximum de 12 h. La période de dégel doit durer 8 ± 1 h et avoir une température égale ou supérieure à 5 °C, sans dépasser 23 ± 2 °C. Une transition progressive doit avoir lieu entre ces deux phases, de telle sorte à obtenir une durée totale du cycle de gel-dégel de 24 h. L'essai d'écaillage comprend 56 cycles.

L'appareil de conditionnement utilisé dans ce projet est illustré à la Figure 3.7 et à la Figure 3.8. Celui-ci peut être programmé de telle sorte à appliquer automatiquement les cycles de température définis par l'opérateur et à enregistrer les données de températures associées à intervalle régulier. Plusieurs essais préliminaires ont été effectués afin de configurer adéquatement les cycles de température. L'objectif est de soumettre les plaques d'écaillage à des cycles de température reproductibles, qui respectent les exigences de la norme CSA A23.2-22C (2019) et qui évite l'endommagement du béton non exposé de la membrane d'étanchéité ou du polythène.



Figure 3.7 Photo de l'appareil de conditionnement utilisé pour l'application des cycles de gel-dégel



Figure 3.8 Plaque d'écaillage positionnées à l'intérieur de l'appareil de conditionnement

Étant donné qu'un décalage peut avoir lieu entre la température appliquée dans l'appareil de conditionnement et la température effective au niveau de la solution saline, un thermocouple a été positionné dans la solution saline à la surface d'une plaque d'écaillage, pour évaluer la température effective au niveau de la surface exposée de la plaque.

Des cycles de températures ont ensuite été configurés soit à la sonde de température de l'appareil de conditionnement située dans la chambre, soit au thermocouple à la surface de la plaque. Lors des premiers essais, la consigne des cycles au niveau du thermocouple correspondait à la courbe verte représentée à la Figure 3.9. Cette figure illustre également les températures mesurées au niveau du thermocouple (en noir) et dans la chambre de l'appareil (en bleu). Le signal du thermocouple (courbe noire) suit la consigne théorique (courbe verte) avec un certain retard et une légère dérive. En revanche, pour atteindre rapidement la température cible au niveau du thermocouple, la température de la chambre (courbe bleue) subit d'importantes variations. Lors de la montée en température, l'appareil de conditionnement chauffe excessivement la chambre avant que le thermocouple de la plaque atteigne la valeur souhaitée. Inversement, lors d'une descente en température, l'appareil refroidit très fortement la chambre pour accélérer la baisse de la température du thermocouple de la plaque. Cela indique que la régulation repose sur des changements brusques et qu'un réglage plus progressif pourrait potentiellement améliorer la stabilité thermique. Ces pics

de température dans la chambre causent l'évaporation de l'eau à la surface du spécimen, et risquent de faire fondre le polythène, augmentant ainsi le risque de fuite au niveau de la colle.

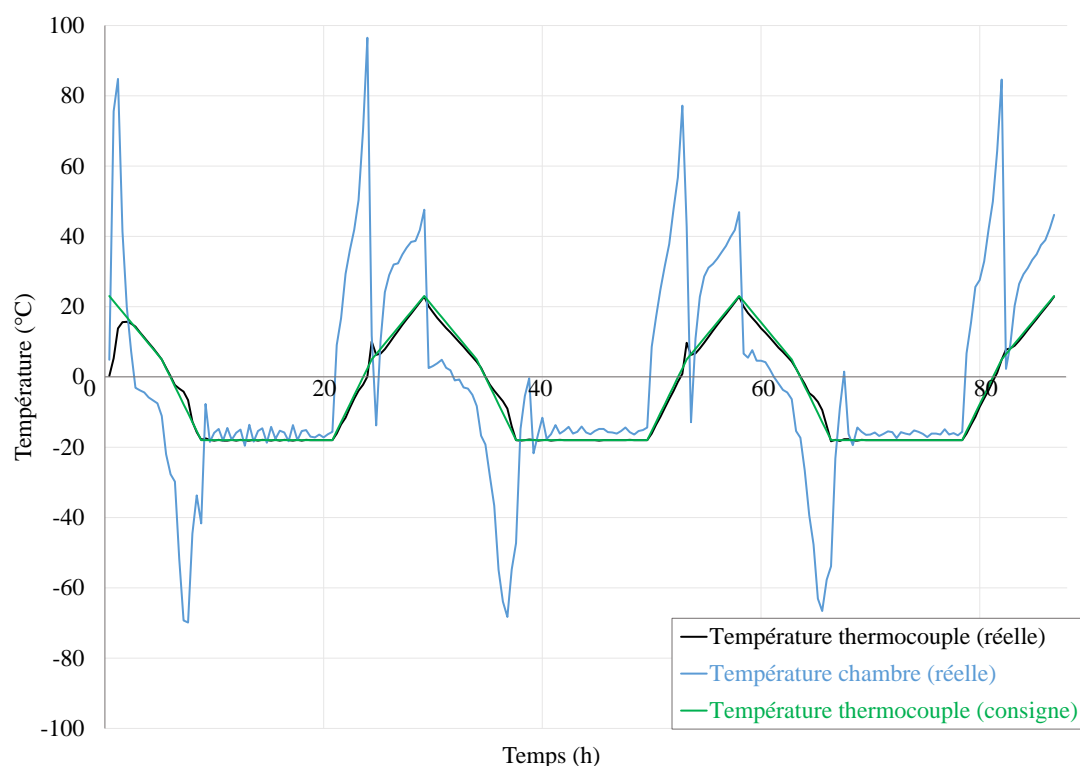


Figure 3.9 Premier test de la programmation de l'appareil de conditionnement

Plusieurs vérifications ont été effectuées afin de bien configurer les cycles de température exigés par la norme CSA A23.2 22C (2019). Certaines vérifications ont mené à un meilleur contrôle des cycles appliqués aux plaques par rapport à ceux exigés par la norme lorsque le contrôle est effectué à partir du thermocouple de la plaque car il fournit une mesure plus précise de la température réelle au niveau des spécimens. Suite à ces observations, les consignes de cycles ont été ajustées pour correspondre à celles représentées à la Figure 3.10, tout en respectant les exigences normatives. La température maximale visée lors du dégel a été réduite à 25°C, et les rampes de transition entre les phases de dégel et de gel ont été configurées de manière plus progressive (5°C/min contre des transitions plus abruptes dans la Figure 3.9).

La chambre doit atteindre -18 ± 3 °C pendant la période de gel (16 ± 1 h) et 23 ± 2 °C pendant la période de dégel (8 ± 1 h). Tandis qu'au niveau du thermocouple, la température pendant la période de gel doit être maintenue à -18 ± 3 °C entre 7 à 12h, et qu'elle soit égale ou supérieure à 5 °C à la fin de la période de dégel.

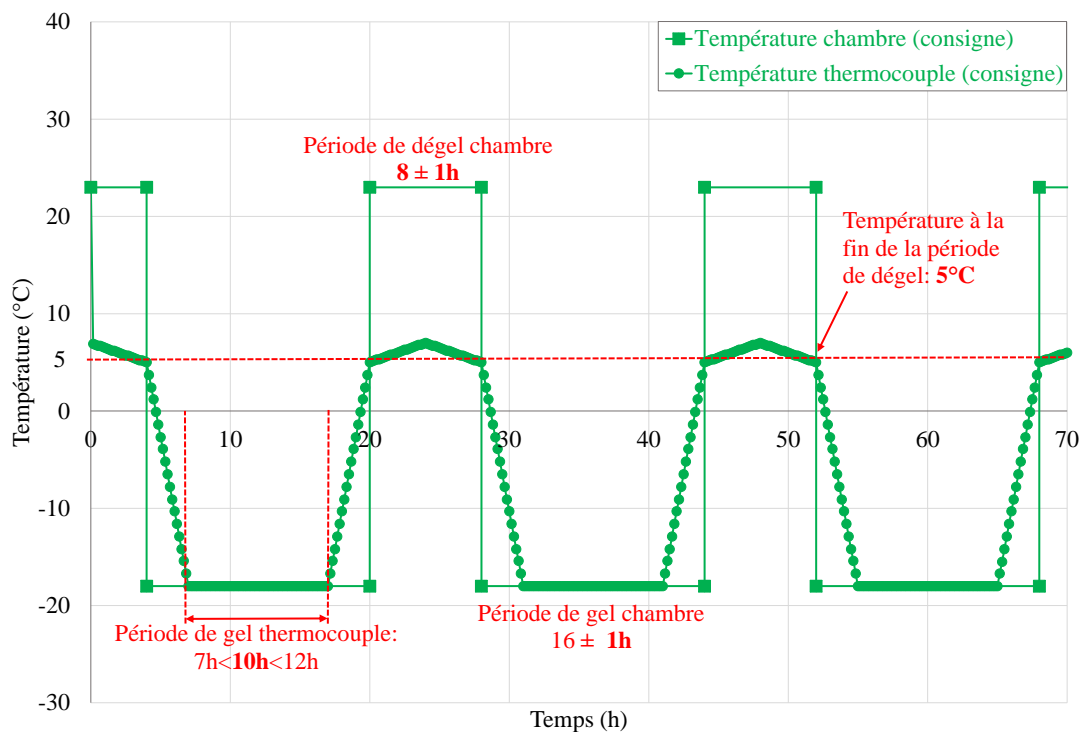


Figure 3.10 Consigne de la température du thermocouple et celle ambiante à l'intérieur de la chambre selon la norme CSA A23.2 22C (2019)

Tel qu'illustré à la Figure 3.11, ces changements ont permis d'obtenir des cycles de températures bien contrôlés au niveau des surfaces des spécimens (en noir) et de diminuer les pics de température dans la chambre (en bleu) en début de phase de gel ou de dégel à des températures raisonnables, qui n'ont pas d'incidence négative sur le bon déroulement de l'essai. Aucun phénomène majeur d'évaporation ou de fuite n'a été constaté pour tous les spécimens.

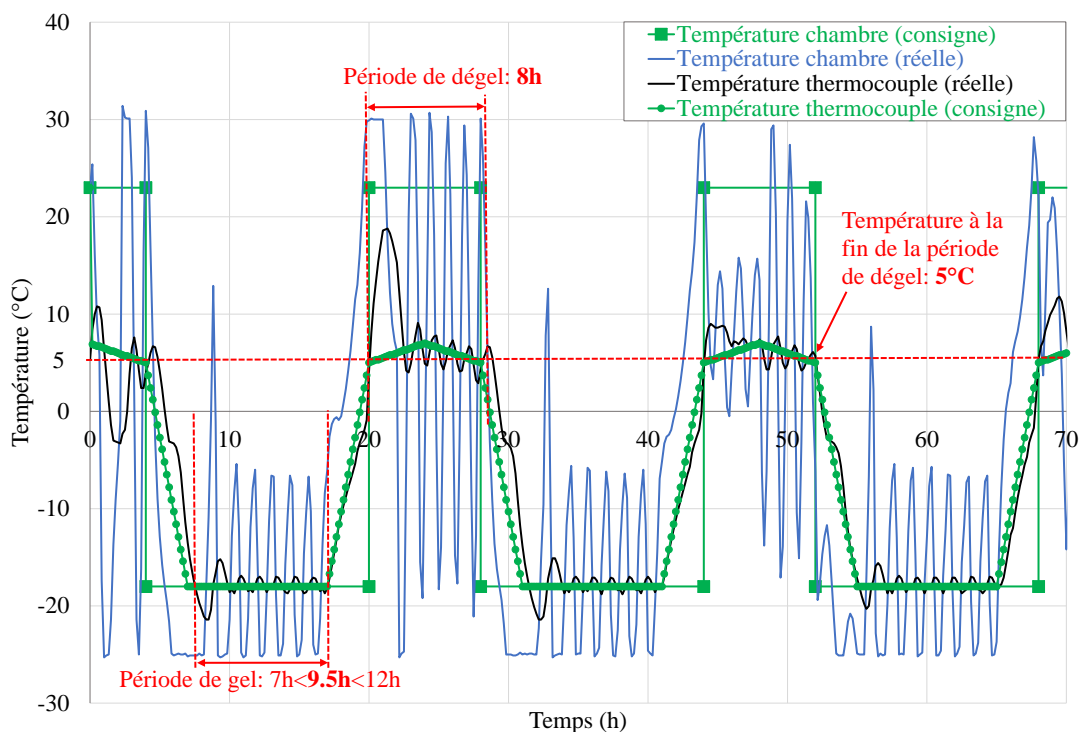


Figure 3.11 Enregistrement des variations des températures pendant les premiers 70h de l'essai d'écaillage

3.2.2.3 Détermination de la quantité de matériau ayant écaillé

Lorsqu'un appareil de conditionnement automatisé est utilisé pour l'application des cycles de gel-dégel, la norme CSA A23.2-22C (2019) demande de mesurer la masse de matériau ayant écaillé après 7, 21, 35 et 56 cycles de gel-dégel, soit au 7^{ème}, 21^{ème}, 35^{ème} et 56^{ème} jours depuis le début de l'essai considérant la durée d'un cycle de 24 h. Cette mesure se fait durant la période de dégel. Cette section décrit la méthode utilisée pour réaliser cette mesure.

La surface du spécimen est tout d'abord brossée au-dessus d'un tamis 2.5 mm à l'aide d'une brosse ni trop rigide ni trop molle, tout en rinçant la surface avec de l'eau (Figure 3.12). Ce tamis de 2.5 mm est préalablement positionné sur le tamis de 80 µm (CSA A23.2-22C, 2019) pour la récupération des débris et sert également à supporter le spécimen.



Figure 3.12 Processus de récupération des débris détachés par lavage au-dessus du tamis de 2.5 mm

Une fois ce premier rinçage effectué au-dessus du tamis de 2.5 mm, celui-ci, ainsi que la brosse utilisée et le plateau de rinçage sont soigneusement rincés afin de récupérer tous les débris dans le tamis de 80 μ m (Figure 3.13).



Figure 3.13 Processus de récupération des débris détachés par rinçage dans le tamis de 80 μ m

Les débris récupérés dans le tamis de 80 μm sont ensuite transvasés dans un récipient en aluminium préalablement pesé pour connaître sa masse à vide. Le récipient et son contenu sont chauffés dans une étuve à 110 ± 5 °C pour sécher les débris. Le récipient avec poudre séchée est pesé une fois refroidi (Figure 3.14).



Figure 3.14 Processus de séchage et pesée des débris détachés

3.2.3 Résultats du programme expérimental

3.2.3.1 Comportement BFUP versus BO

Tel qu'indiqué à la section 3.2.1, la comparaison de comportement à l'écaillage entre le BFUP et le BO à l'étude est étudiée sur des spécimens dont la surface exposée à la solution saline est lisse.

Le Tableau 3.7 indique les pertes de masse par écaillage enregistrées à chacune des pesées effectuées (après 7, 21, 35 et 56 cycles), pour les bétons étudiés, alors que le Tableau 3.8

Tableau 3.8 présente le cumul de ces pertes au fur et à mesure des cycles. La moyenne obtenue des trois spécimens d'une même condition est également indiquée dans ces tableaux et est utilisée pour calculer l'écart BFUP versus BO. La Figure 3.15 illustre graphiquement les résultats du

Tableau 3.8, soit l'évolution des pertes cumulatives de masse en fonction du nombre de jour depuis le début de l'essai, correspondant au nombre de cycles de gel-dégel. À noter que la résistance à l'écaillage est jugée satisfaisante selon la norme CSA A23.2-22C (2019), qui réfère à la norme du Bureau de normalisation du Québec (BNQ), lorsque les pertes cumulatives après 56 cycles de gel-

dégel sont inférieures à 0.5 kg/m^2 . Cette limite a été mise à titre indicatif en trait pointillé rouge en haut de la Figure 3.15. La limite n'est pas à l'échelle pour garder l'emphase sur la plage de valeur obtenue durant les essais réalisés dans ce projet, qui sont bien en deçà de cette valeur. La bonne résistance à l'écaillage des bétons à l'étude (BFUP et BO de type V-S) était attendue, car le premier à un rapport eau/liant très faible et le second possède une teneur en air qui leur confère une composition adéquate pour résister à cet essai de durabilité.

Tableau 3.7 Pertes en écaillage mesurées à chacune des pesées effectuées (en kg/m^2) sur le BFUP et BO à fini de surface lisse

Nombre de cycles de gel-dégel	BO ₁	BO ₂	BO ₃	BO _{moy}	BFUP ₁	BFUP ₂	BFUP ₃	BFUP _{moy}	Écart BFUP vs BO*
7	0.0042	0.0052	0.0030	0.0041	0.0008	0.0020	0.0024	0.0017	- 59 %
21	0.0176	0.0063	0.0056	0.0098	0.0023	0.0008	0.0017	0.0016	- 84 %
35	0.0102	0.0064	0.0036	0.0067	0.0007	0.0011	0.0016	0.0011	- 83 %
56	0.0144	0.0036	0.0037	0.0072	0.0004	0.0008	0.0007	0.0006	- 91 %

* Écart BFUP vs BO = $((\text{BFUP}_{\text{moy}} / \text{BO}_{\text{moy}}) - 1) \times 100 \%$

Tableau 3.8 Pertes en écaillage cumulatives (en kg/m^2) du BFUP et BO à fini de surface lisse

Nombre de cycles de gel-dégel	BO ₁	BO ₂	BO ₃	BO _{moy}	BFUP ₁	BFUP ₂	BFUP ₃	BFUP _{moy}	Écart BFUP vs BO*
7	0.0042	0.0052	0.0030	0.0041	0.0008	0.0020	0.0024	0.0017	- 59 %
21	0.0218	0.0115	0.0085	0.0139	0.0030	0.0028	0.0040	0.0033	- 77 %
35	0.0319	0.0179	0.0122	0.0207	0.0037	0.0039	0.0056	0.0044	- 79 %
56	0.0464	0.0215	0.0158	0.0279	0.0041	0.0039	0.0063	0.0048	- 83 %

* Écart BFUP vs BO = $((\text{BFUP}_{\text{moy}} / \text{BO}_{\text{moy}}) - 1) \times 100 \%$

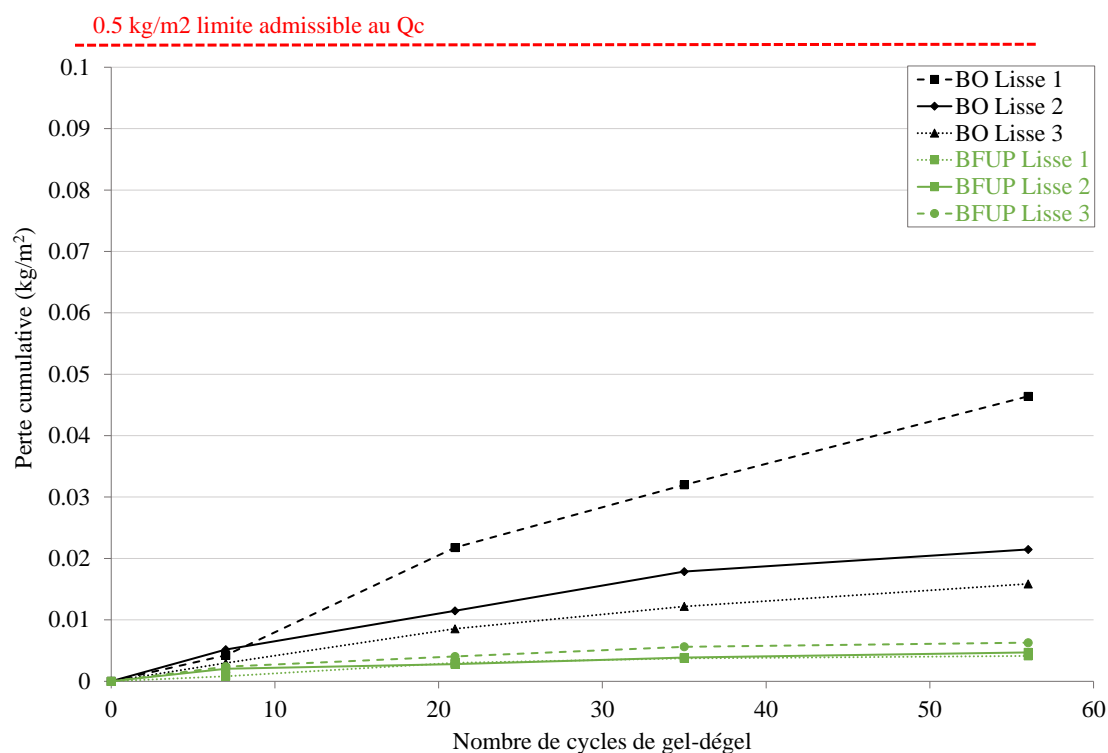


Figure 3.15 Évolution des pertes cumulatives par écaillage au cours des cycles de gel-dégel pour les plaques de BFUP et BO avec fini lisse

Les Tableau 3.7 et Tableau 3.8, ainsi que la Figure 3.15, mettent en évidence la résistance à l'écaillage supérieure du BFUP, en comparaison au BO à l'étude. Les pertes de masse enregistrées à chacune des pesées effectuées (après 7, 21, 35 et 56 cycles, Tableau 3.7) ainsi que les pertes de masse cumulatives du BFUP (Tableau 3.8 et Figure 3.15) demeurent systématiquement inférieures à celles du BO. En moyenne, sur les trois plaques étudiées par type de béton, les pertes de masse enregistrées à chacune des pesées effectuées sont plus de 59 % inférieures pour le BFUP et peuvent même être plus de 90 % inférieures selon la période considérée (Tableau 3.7). En termes de pertes cumulatives moyennes après 56 cycles (Tableau 3.8), elles sont 83 % plus faibles pour le BFUP que pour le BO, avec des pertes de $4.8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$ pour le BFUP contre $27.9 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$ pour le BO. Les pertes cumulatives obtenues après 56 cycles sur le BFUP sont plus faibles que celles de $17 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$ obtenues après 50 cycles par Ralli (2023), et encore plus faibles que celles de

$27 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^2$ obtenue après 112 cycles par Piérard et al. (2012) avec exposition à une solution de NaCl à 3 % en masse.

La différence entre les pertes obtenues dans ce projet et celles obtenues par Ralli (2023) et Piérard et al. (2012) pourrait s'expliquer par une composition différente du BFUP, le pourcentage de fibres différent (2 % vol. pour Ralli et Piècard, versus 3 % vol. dans ce projet), la norme selon laquelle l'essai est réalisé (la spécification technique européenne CEN/TS 12390-9 pour Piècard et la CSA A23.2-22C pour Ralli et ce projet) ou encore par la finition de surface différente. L'impact de la finition de surface sur les pertes par écaillage sera discuté à la section suivante.

En plus des pertes par écaillage largement plus faibles pour le BFUP que pour le BO, il est également intéressant de remarquer que l'écart entre BFUP et BO devient de plus en plus marqué avec l'augmentation du nombre de cycles de gel-dégel. Ceci est visible au travers des écarts BFUP versus BO des Tableau 3.7 et Tableau 3.8, ils augmentent avec le nombre de cycles. Ceci est également visible graphiquement à la Figure 3.15 avec un écart entre les courbes de BO et BFUP qui augmente dans le temps. Finalement, la Figure 3.15 illustre également un comportement plus stable (quasi-linéaire) et plus reproductible du BFUP vis-à-vis de l'écaillage que le BO qui présente plus de variabilité entre les différentes plaques testées ainsi qu'une évolution moins linéaire dans le temps.

L'état en fin d'essai des surfaces exposées à la solution saline des trois plaques de BO et BFUP avec fini lisse est représenté à la Figure 3.16. Les faibles valeurs de pertes de masse présentées dans cette section sont confirmées visuellement puisqu'aucun écaillage significatif n'est observé sur ces surfaces.

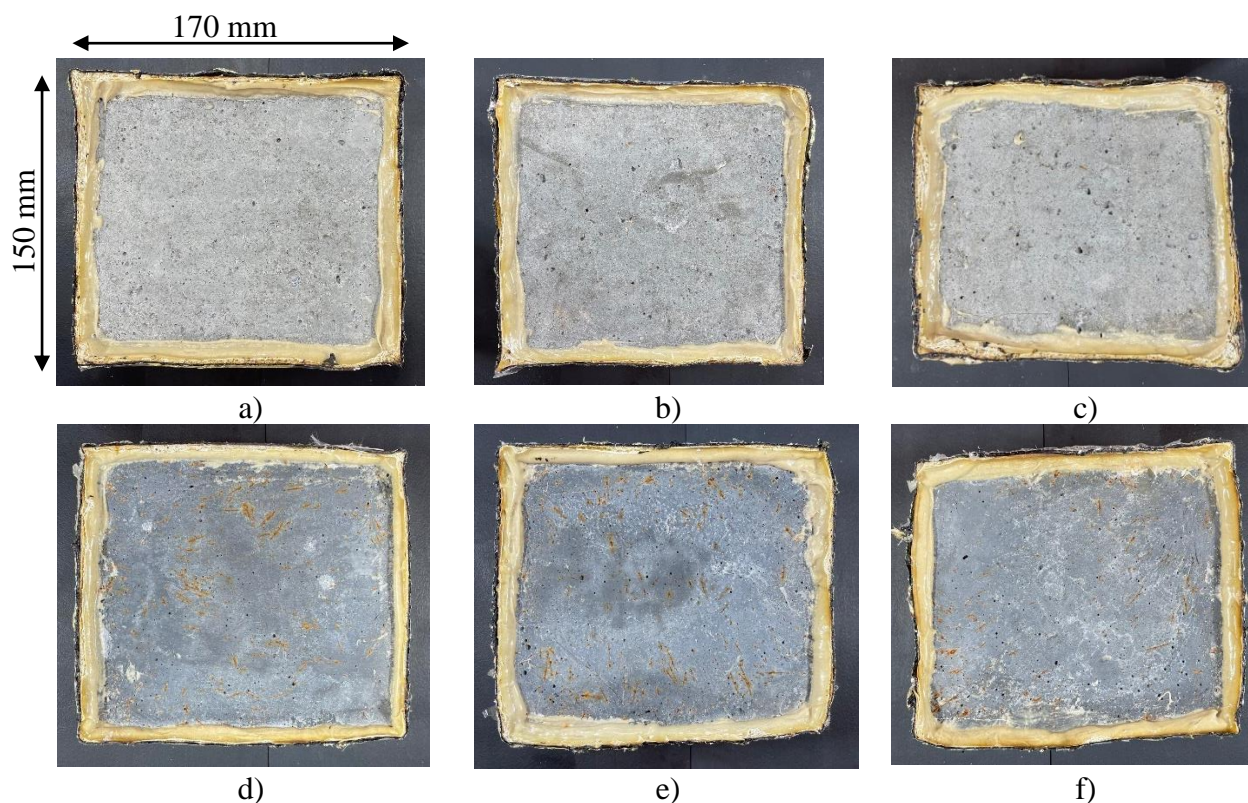


Figure 3.16 État des surfaces exposées des plaques de BO et BFUP à surface lisse à la fin de l'essai d'écaillage, pour a) BO1, b) BO2, c) BO3, d) BFUP1, e) BFUP2 et f) BFUP3

3.2.3.2 Comportement BFUP avec différents finis de surface

Alors que la section précédente s'intéressait à la résistance à l'écaillage du BFUP versus le même type de surface (lisse) en BO, cette section s'intéresse maintenant à l'impact de différents finis de surface sur la résistance du BFUP.

Le Tableau 3.9 présente les pertes cumulatives en écaillage mesurées sur les plaques ayant un fini avec granulats/fibres exposés et celles avec un fini rainuré. À noter que, lors des mesures de pertes de masse réalisées sur les surfaces à granulats/fibres exposés, il a été constaté que certains morceaux de fibres corrodées en surface se retrouvaient parmi les débris. Les fibres ayant une masse volumique importante, ces débris de fibres viennent influencer la masse mesurée. Ainsi, afin de distinguer le béton qui a écaillé des morceaux de fibres détachées en surface, les fibres ont été séparées des débris récupérés à l'aide d'un aimant. Le Tableau 3.10 présente la différence dans les

pertes mesurées lorsque les fibres sont considérées ou négligées. Les valeurs moyennes présentées au Tableau 3.9 et Tableau 3.10, ainsi que les valeurs moyennes du BFUP lisse, présentées au

Tableau 3.8 de la section précédente, sont ensuite regroupées au Tableau 3.11 afin de comparer les écarts obtenus entre les finis à granulats/fibres exposés ou rainuré et le fini lisse. La Figure 3.17 illustre graphiquement les pertes cumulatives présentées aux Tableau 3.8 (pour le BFUP lisse), Tableau 3.9 et Tableau 3.10. Les pertes du fini à granulats/fibres exposés représentées en rouge à la Figure 3.17a incluent la masse des fibres détachées, tandis que celles représentées à la Figure 3.17b ne l'incluent pas.

Tableau 3.9 Pertes en écaillage cumulatives du BFUP pour les finis de surface avec granulats/fibres exposés et rainuré

Nombre de cycles de gel-dégel	BFUP granulats/fibres exposés				BFUP rainuré			
	BFUP ₁	BFUP ₂	BFUP ₃	BFUP_{moy}	BFUP ₁	BFUP ₂	BFUP ₃	BFUP_{moy}
7	0.0554	0.0224	0.0469	0.0416	0.0031	0.0032	0.0013	0.0025
21	0.0651	0.0270	0.0552	0.0491	0.0076	0.0054	0.0042	0.0057
35	0.0745	0.0314	0.0633	0.0564	0.0121	0.0064	0.0053	0.0079
56	0.0863	0.0511	0.0785	0.0720	0.0173	0.0079	0.0062	0.0105

Tableau 3.10 Pertes en écaillage cumulatives du BFUP pour le fini de surface granulats/fibres exposés, avec considération ou non des fibres présentes dans les débris

Nombre de cycles de gel-dégel	BFUP granulats/fibres exposés								
	Pertes cumulatives avec fibres				Pertes cumulatives sans fibres				Écart ss vs av fibres *
	BFUP ₁	BFUP ₂	BFUP ₃	BFUP_{moy}	BFUP ₁	BFUP ₂	BFUP ₃	BFUP_{moy}	
7	0.0554	0.0224	0.0469	0.0416	0.0402	0.0086	0.0367	0.0285	- 31 %
21	0.0651	0.0270	0.0552	0.0491	0.0478	0.0111	0.0431	0.0340	- 31 %
35	0.0745	0.0314	0.0633	0.0564	0.0540	0.0128	0.0490	0.0386	- 32 %
56	0.0863	0.0511	0.0785	0.0720	0.0608	0.0161	0.0554	0.0441	- 39 %

* Écart sans vs avec considération des fibres = $((\text{BFUP}_{\text{moy}} \text{ sans fibres} / \text{BFUP}_{\text{moy}} \text{ avec fibres}) - 1) \times 100 \%$

Tableau 3.11 Moyennes des pertes en écaillage cumulatives du BFUP, pour les finis de surface lisse, rainuré et granulas/fibres exposés, avec considération ou non des fibres présentes dans les débris

Nombre de cycles de gel-dégel	Valeurs moyennes (BFUP _{moy}) pour les différents finis de surface				Écart BFUP avec finition versus BFUP lisse *		
	G/F _{exposés} (avec F)	G/F _{exposés} (sans F)	Rainuré	Lisse	G/F _{exposés} (avec F)	G/F _{exposés} (sans F)	Rainuré
7	0.0416	0.0285	0.0025	0.0017	2347 %	1576 %	47 %
21	0.0491	0.0340	0.0057	0.0033	1388 %	930 %	73 %
35	0.0564	0.0386	0.0079	0.0044	1182 %	777 %	80 %
56	0.0720	0.0441	0.0105	0.0048	1400 %	819 %	119 %

* Écart BFUP_{fini} vs BFUP_{lisse} = ((BFUP_{fini} / BFUP_{lisse}) - 1) × 100 %

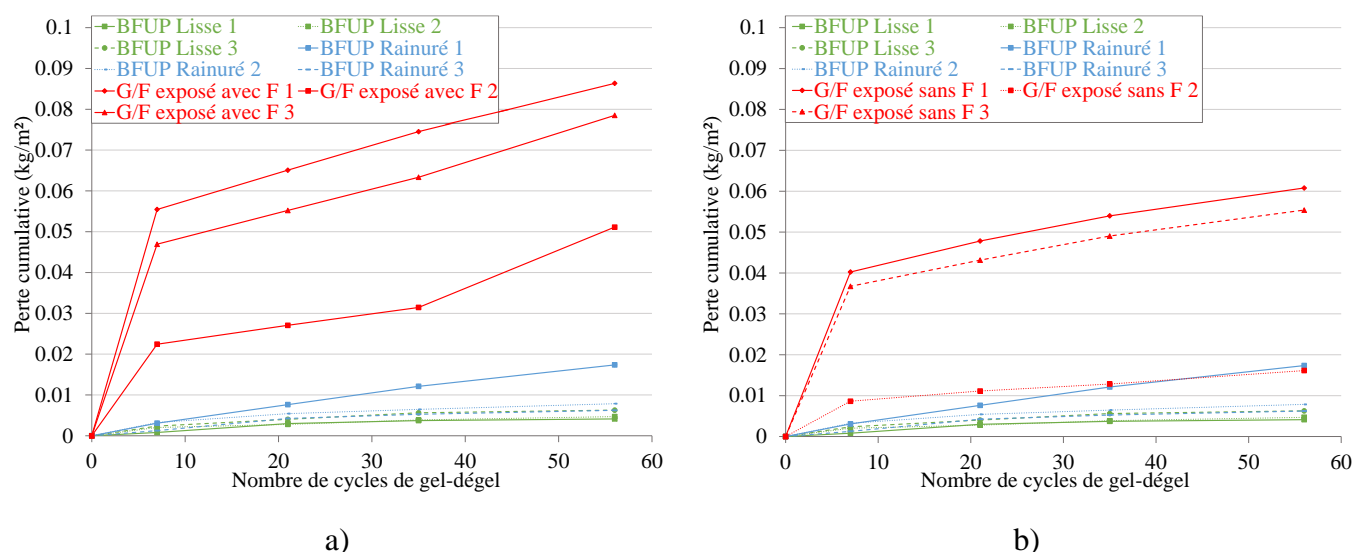


Figure 3.17 Évolution des pertes cumulatives des spécimens de BFUP avec différents finis de surface, a) avec considération des débris de fibres pour le BFUP avec retardateur de prise, b) sans considération de ces fibres

Les Tableau 3.9 et Tableau 3.11 ainsi que la Figure 3.17 mettent en évidence l'impact du fini de surface sur le comportement à l'écaillage du BFUP. L'ajout d'un fini de surface avec granulates/fibres exposés a fortement augmenté les pertes par écaillage en comparaison au fini lisse. Parmi les pertes de masse mesurées pour ce fini de surface, environ 30 à 40 % est associé à des morceaux de fibres corrodées qui se détachent en surface (Tableau 3.10). Même sans la

considération de ces fibres, les pertes cumulatives après 56 cycles soit 25 fois supérieures à celles obtenues pour le BFUP avec fini lisse (Tableau 3.11). Il est intéressant de remarquer que ces pertes sont particulièrement importantes dans les 7 premiers cycles (Figure 3.17), de manière encore plus marquée lorsque les fibres sont prises en compte dans les pertes mesurées. Suite à cette perte importante initiale, les pertes deviennent plus stables et plus proches de celles observées pour les autres finitions de surface, tout en restant quand même un peu plus importantes. La variabilité observée entre les différentes plaques ayant ce fini de surface est également plus importante que pour les autres conditions. Les pertes plus importantes et la phase initiale de dégradation marquée pour ce type de fini de surface peuvent être attribuées à la corrosion et au détachement des fibres rendue apparentes ainsi qu'aux particules de béton potentiellement fragilisées durant l'application du jet d'eau sous pression sur une plaque dont le durcissement de surface a été retardée par le retardateur de prise. Le mode de préparation d'une telle surface amène également plus de variabilité dans les surfaces obtenues entre les différents spécimens, en comparaison avec les autres finis de surface étudiée, expliquant possiblement la plus grande variabilité observée dans l'écaillage mesurés sur les trois plaques de cette condition. La rugosité de surface peut également contribuer à accentuer l'écaillage.

Le fini rainuré présente des pertes cumulatives beaucoup plus faibles que le fini avec granulats/fibres exposés (Tableau 3.9 et Figure 3.17), mais qui restent quand même 2.2 fois supérieures à celles obtenues en moyenne sur le BFUP lisse après 56 cycles (Tableau 3.11). L'évolution de l'écaillage dans le temps pour ce fini de surface est plus graduelle que pour le fini avec granulats/fibres exposés et la variabilité entre les trois plaques de cette condition d'essai est moindre, mais supérieure à celle observée pour le BFUP lisse. La vulnérabilité légèrement plus importante à l'écaillage du fini rainuré, en comparaison au fini lisse, peut être expliqué par la sollicitation des arêtes des rainures lors du gel ainsi que par la surface de contact accrue entre le matériau et la solution saline en présence des rainures qui augmente de 64% par rapport à la surface lisse.

La Figure 3.18 illustre l'écaillage cumulatif des trois types de finition de surface en BFUP par rapport à celui du fini lisse en BO. Alors que les pertes de masse enregistrées pour le BFUP rainuré restent bien en deçà de celles enregistrées pour le BO lisse, celles enregistrées pour le BFUP avec granulats/fibres exposées sont plus importantes, en particulier dû aux pertes importantes enregistrées durant les premiers cycles de gel-dégel. Bien évidemment, une surface en BO avec

granulats/fibres exposées présenterait fort probablement aussi des pertes bien plus importantes que celles obtenues sur le fini lisse avec la fragilisation de la surface. À noter également que, malgré un impact plus important de certains finis de surface, toutes les courbes représentées à la Figure 3.18 restent bien en-dessous de la limite admissible au Québec de 0.5 kg/m^2 . La finition avec granulats/fibres exposés est celle qui performe le moins bien, mais elle reste en moyenne inférieure à 0.075 kg/m^2 , soit une valeur plus de 6 fois inférieure à l'exigence de la norme.

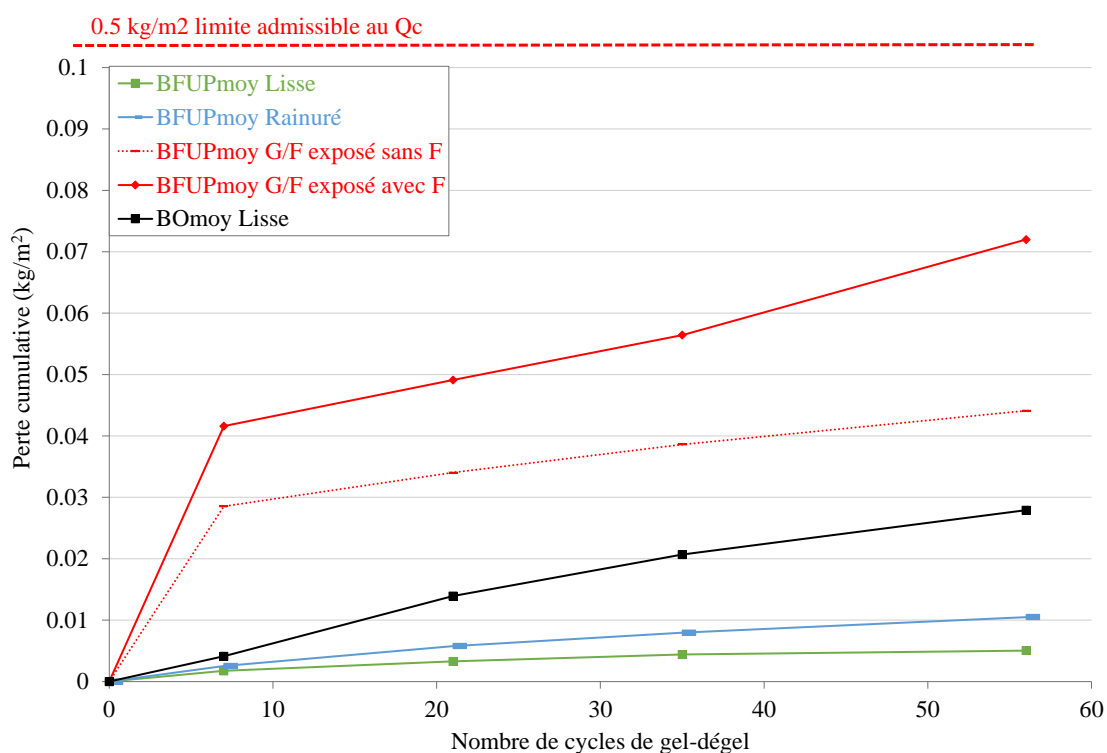


Figure 3.18 Évolution des pertes cumulatives moyennes par écaillage au cours des cycles de gel dégel, pour les spécimens en BO avec fini lisse et en BFUP avec différents finis de surfaces

La Figure 3.19 illustre l'état des plaques à la fin des 56 cycles d'écaillage. La corrosion des fibres de surface est prépondérante à la surface des plaques avec finition granulats/fibres exposés, alors que peu d'écaillage est visible sur la surface des plaques avec un fini rainuré, confirmant les faibles pertes mesurées pour ce type de fini.

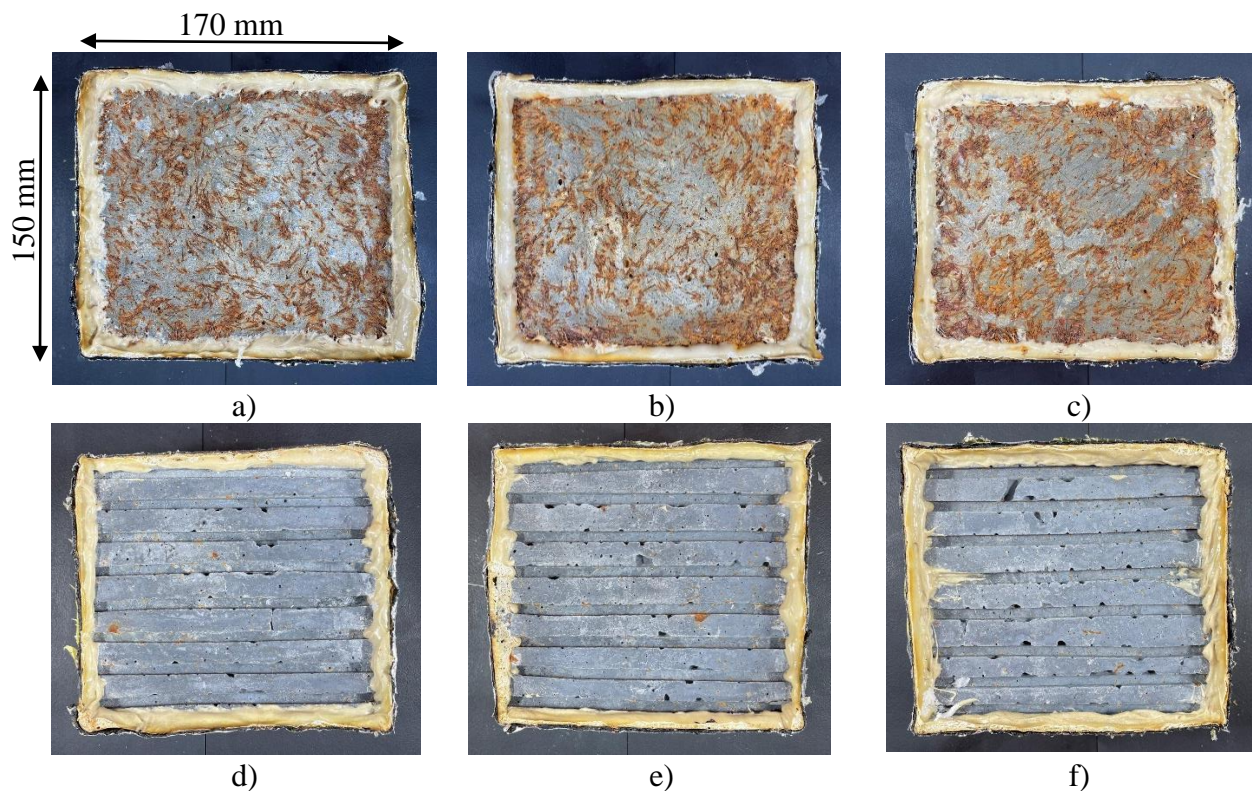


Figure 3.19: État des spécimens de BFUP à la fin de l'essai d'écaillage : (a) BFUP G/F exposé 1, (b) BFUP G/F exposé 2, (c) BFUP G/F exposé 3, (d) BFUP rainuré 1, (e) BFUP rainuré 2 et (f) BFUP rainuré 3

Les tendances générales observées sur les résultats d'écaillage sont logiques, mais peuvent difficilement être comparées avec d'autres études de ce type. En effet, ce projet est le premier qui s'intéresse à l'impact des finitions de surface sur le comportement à l'écaillage du BFUP. Ces résultats apportent donc de données nouvelles qui viennent compléter la littérature actuelle sur les effets des finis de surface du BFUP face aux cycles de gel-dégel.

3.2.4 Conclusions sur le comportement à l'écaillage

Les essais d'écaillage réalisés dans ce projet ont démontré que, pour une chape avec finition de surface lisse, le BFUP offre une bien meilleure résistance à l'écaillage que celle en BO, avec des

pertes cumulatives après 56 cycles de gel-dégel 83 % plus faibles en moyenne pour la chape en BFUP.

Les résultats ont également démontré un impact significatif du fini de surface sur la durabilité de la chape en BFUP vis-à-vis de l'écaillage. Le fini granulats/fibres exposés, plus rugueux, est le plus vulnérable à l'écaillage, alors que le fini lisse offre le meilleur comportement, avec des pertes de masse considérablement réduites au fil des cycles de gel-dégel. Il est cependant intéressant de noter que l'écart de comportement entre ces deux types de finis est surtout marqué durant les premiers cycles de gel-dégel pendant lesquels les fibres et particules de surface plus fragiles présentes sur le fini granulats/fibres exposés se détachent plus facilement. Le fini rainuré, bien que bien plus performant que le fini granulats/fibres exposés, reste un peu moins résistant que le fini lisse, ce qui peut s'expliquer par les rainures qui augmentent la surface exposée à la solution saline et donc à l'endommagement.

Quelle que soit la finition de surface des chapes en BFUP, les pertes obtenues par écaillage restent largement inférieures à la limite normée de 0.5 kg/m². Cependant, ces résultats soulignent l'impact du type de finition de surface plutôt qu'un autre sur le comportement de la chape sous l'effet des cycles de gel-dégel et de l'épandage des sels de déverglaçage. Bien évidemment, la résistance à l'abrasion et l'adhérence de la surface devront également être considérés dans le choix final de la finition optimale de la surface de roulement. Ces aspects seront étudiés tour à tour dans les sections suivantes.

3.3 Comportement à l'abrasion

Cette section s'intéresse à la résistance à l'abrasion de chapes en BFUP en comparaison avec celle en BO, ainsi qu'à l'influence des finis de surface sur le comportement à l'abrasion du BFUP.

3.3.1 Programme expérimental

Plusieurs spécimens ont été produit dans ce programme pour représenter les deux types chapes à l'étude (BO et BFUP), ainsi que les différentes finitions de surface possibles. Ces spécimens ont été soumis à un essai d'abrasion selon la norme ASTM C944 (2019) spécifiée dans l'Annexe U de la CSA A23.1 (2019) pour les BFUP. Cet essai consiste à abraser une surface de béton à l'aide

d'un outil rotatif fixé sur une perceuse à colonne et tournant à une vitesse de 200 tr/min tout en appliquant une charge sur la surface de béton (Figure 3.20). Dans le cas du BFUP, cette charge doit être de 197 ± 2 N, ce qui représente une charge doublée par rapport à la charge indiquée pour les bétons ordinaires (98 ± 1 N).

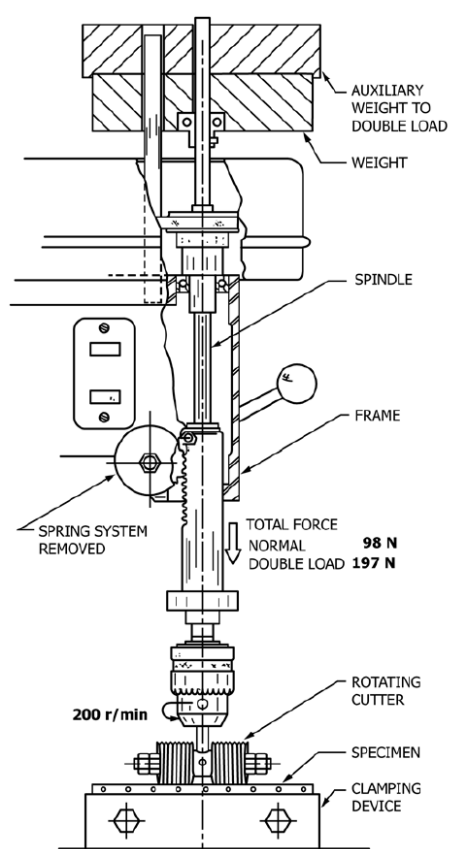


Figure 3.20 Détails de conception de la perceuse à colonne extrait de la norme ASTM C944 (2019)

Trois cycles d'abrasion de 2 min doivent être effectués et la perte de masse du spécimen est évaluée entre chaque cycle d'abrasion. Plus la perte de masse est faible, meilleure est la résistance à l'abrasion.

Le Tableau 3.12 résume les conditions d'essai étudiées dans le programme expérimental. Tout d'abord, deux catégories de spécimens ont été testées, soit ceux sans historique d'endommagement

préalable (spécimens intacts) et d'autres ayant été préalablement testés en écaillage (spécimens avec écaillage). Les spécimens avec écaillage ont pour objectif de simuler la réalité des altérations de la surface de roulement faces aux actions combinées du climat sévère et du trafic. Ensuite, pour chacune de ces deux catégories, la comparaison du comportement en abrasion entre le BFUP et le BO est réalisée pour une surface lisse, tout comme c'était le cas pour les plaques d'écaillage. Enfin, les différents finis de surface étudiés pour le BFUP étaient les mêmes que pour l'essai d'écaillage, soit un fini avec granulat/fibres exposés et un fini rainuré, tous deux produits de la même manière que pour les plaques d'écaillage (cf. section 3.2.1).

Deux spécimens ont été testés pour chaque condition d'essai représentée au Tableau 3.12. Tous ces spécimens ont été testés avec la double charge (197 ± 2 N) spécifiée pour les BFUP. Même si, en temps normal, les spécimens de BO seraient plutôt testés avec la charge simple (98 ± 1 N) spécifiée dans la norme ASTM C944 (2019). Il a été décidé de les tester sous double charge dans ce projet afin d'avoir une comparaison stricte entre le comportement à l'abrasion de BFUP et de BO. Les dimensions des spécimens intacts utilisés pour les essais d'abrasion de ce projet sont de même largeur et longueur que ceux testés en écaillage, soit de 170 x 150 mm, mais d'épaisseur réduites (30 mm versus 75 mm pour les plaques d'écaillage) pour réduire le volume de béton à produire.

Tableau 3.12 Conditions testées en abrasion selon la norme ASTM C944 (2019)

		Fini lisse	Granulats/fibres exposés	Rainuré
Spécimens intacts	BFUP	X	X	X
	BO	X		
Spécimens avec écaillage	BFUP	X	X	X
	BO	X		

3.3.2 Développement de l'essai

3.3.2.1 Montage d'essai

Tout comme pour l'essai d'écaillage, aucun montage d'abrasion n'était disponible dans le laboratoire de structures de Polytechnique Montréal avant ce projet. Un des objectifs de ce projet était donc de développer l'essai sur une perceuse à colonne disponible au laboratoire.

L'outil rotatif décrit dans la norme ASTM C944 (2019), permettant d'induire une usure contrôlée sur la surface des spécimens, a en premier lieu été fabriqué. L'outil a été développé en tenant compte des méthodes possibles de fixation sur la perceuse utilisée ainsi que du dégagement disponible entre la tête de la perceuse et le spécimen. L'outil en question, composé de roues dentées (diamètre de 37.5 mm) et de rondelles (diamètre de 31.75 mm) montées en alternance, est illustré à la Figure 3.21.

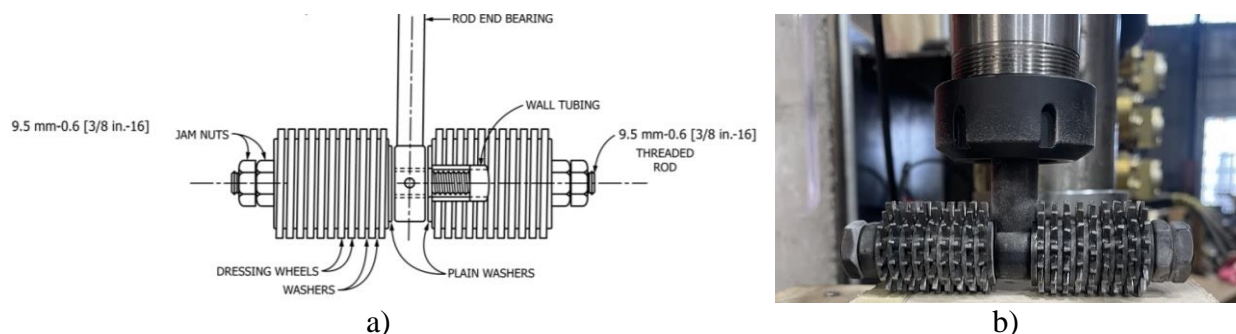


Figure 3.21 Outil rotatif utilisé pour l'essai d'abrasion : a) schéma extrait de la norme ASTM C944 (2019) et b) outil fabriqué à l'interne

Différentes méthodes de fixation du spécimen de béton ont ensuite été testées afin d'en trouver une qui évite le déplacement et/ou la vibration de la plaque lors de l'abrasion. La première méthode testée, qui consistait à appliquer un serrage directement sur la plaque à l'aide de quatre brides de serrage crantées, a été abandonnée puisque le serrage ponctuel requis pour éviter la vibration de la plaque induisait des efforts provoquant parfois leur fissuration (Figure 3.22a). La méthode finale retenue consiste à maintenir la plaque à l'aide d'un support en bois (Figure 3.22b). La fixation de la plaque de béton est alors assurée par un serrage latéral de ce support sur la plaque via deux serre-joints, ainsi que par la fixation verticale du support en bois à l'aide de deux brides de serrage crantées. Ce système de fixation permet une bonne répartition des contraintes de serrage sur la plaque de béton et permet ainsi d'éviter les risques de fissuration. La présence d'une fine bande de mousse entre les parois latérales de la plaque et du système de fixation en bois permet également d'amortir les vibrations qui pourraient survenir lors des cycles d'abrasion.



Figure 3.22 Méthodes de fixation du spécimen : a) Serrage direct, b) Serrage indirect

La 3^{ème} étape dans le développement du montage d'essai était le mode d'application de la charge de 197 ± 2 N devant être appliquée par l'outil rotatif sur la surface de la plaque durant l'essai. Un bon contrôle de cette charge constitue un point clé sur la qualité des résultats obtenus puisque l'application d'une charge plus importante induit plus d'abrasion et inversement. Pour plusieurs montages d'essai de la littérature réalisés selon l'ASTM C944 (2019), la tête de la perceuse utilisée est laissée libre et une masse est ajoutée, généralement au niveau de la tête de la perceuse, pour atteindre la force requise sur la plaque. Cette technique n'était pas applicable à la perceuse à colonne disponible au laboratoire de Structures de Polytechnique Montréal pour différentes raisons. Entre autres, la tête de la perceuse utilisée ne peut pas être laissée libre de déplacement, la tête a une masse supérieure à celle requise durant l'essai et il n'y a pas d'endroit spécifique où une masse pourrait être positionnée de manière sécuritaire sur l'axe principal de la perceuse. Il a donc fallu penser à une autre manière d'appliquer et de bien contrôler la charge.

L'idée a alors été de fixer la tête de la perceuse à une certaine position, proche du spécimen, mais sans que l'outil ne soit en contact avec ce dernier, ensuite de descendre le mandrin jusqu'à ce que l'outil soit en contact avec le spécimen, puis de suspendre une masse au levier pour atteindre la charge requise au niveau de la surface du spécimen. La position et le poids de cette masse suspendue ont été préalablement calculés selon le bras de levier par rapport à l'axe vertical de l'outil rotatif ainsi que la position du spécimen. La force appliquée au niveau de la surface de la plaque a ensuite été validée avec l'utilisation d'une cellule de charge adaptée au niveau de charge

anticipé et positionnée à la place de la plaque, de telle sorte à ce que la position de la cellule corresponde à celle de la surface supérieure du spécimen (Figure 3.23a). La Figure 3.23b illustre le déroulement de l'essai en appliquant la charge à l'aide de la masse suspendue sur le levier de la perceuse.

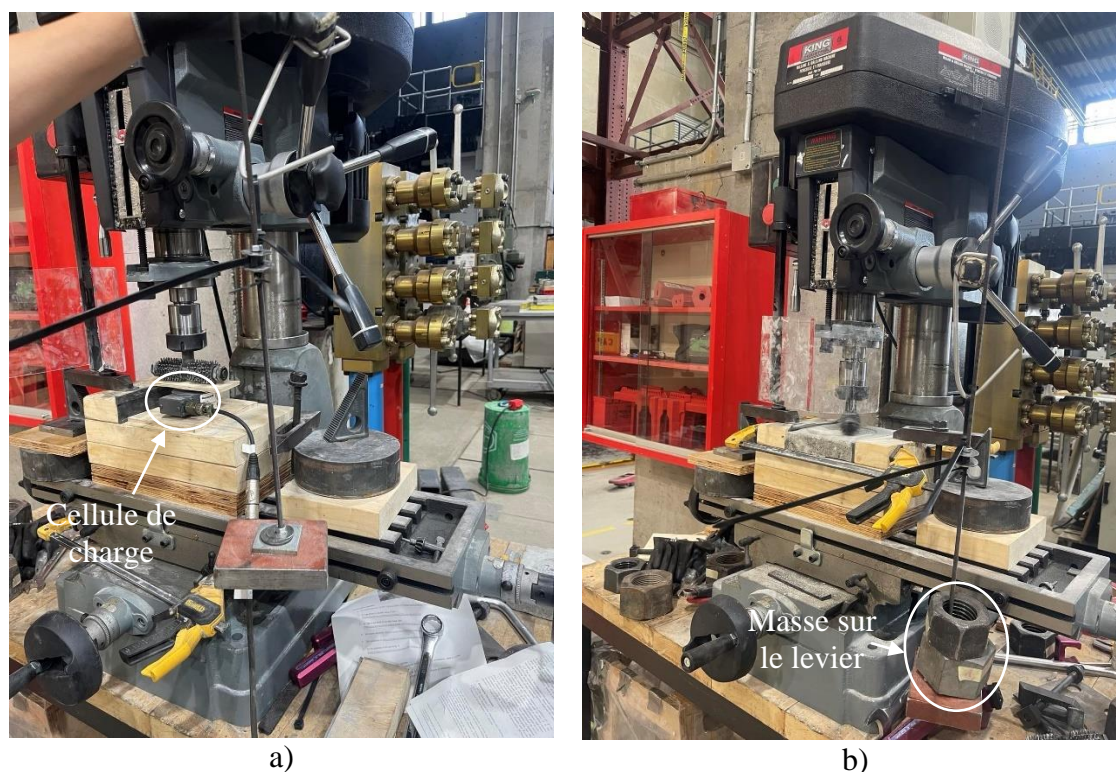


Figure 3.23 Application de la charge sur la surface d'abrasion : a) Configuration de la charge appliquée à l'aide d'une cellule de charge, b) Application de la charge à l'aide d'un poids suspendu au levier de la perceuse lors d'un essai d'abrasion

Les essais préliminaires d'abrasion menés avec ce montage ont mis en évidence quelques problématiques. Dû au jeu mécanique inévitablement présent au niveau du levier de la perceuse, les vibrations engendrées lors de l'abrasion de la plaque par l'outil rotatif induisent des variations significatives de charge et il devient difficile d'assurer que la charge visée est bien maintenue durant les cycles d'abrasion. L'étape qui a suivi a alors été d'intégrer la cellule de charge (Figure 3.24a) sous le spécimen, à l'intérieur du système de fixation en bois (Figure 3.24b), de

manière à ce qu'il soit possible de suivre la charge appliquée en continu via un système d'acquisition externe. De plus, pour éviter les vibrations au niveau du levier, la force a été appliquée manuellement (Figure 3.24c), plutôt qu'avec le système de masse suspendue, pour maintenir la charge adéquate sur la cellule de charge (information maintenant lue en temps réel sur le système d'acquisition).

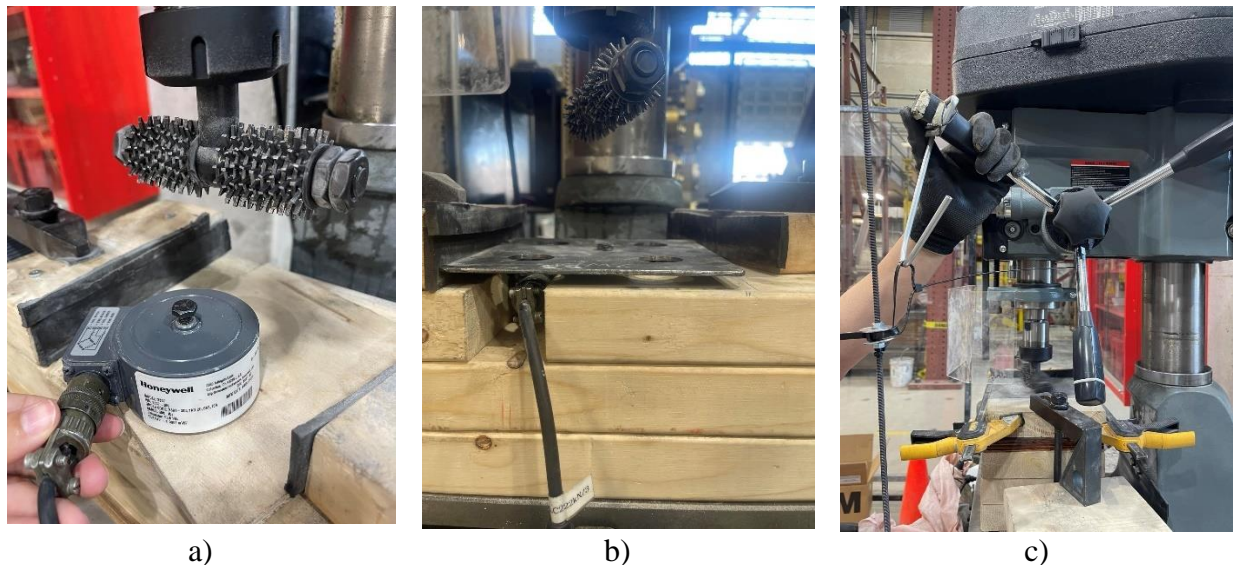


Figure 3.24 Ajustements pour le contrôle de la charge durant l'essai d'abrasion : a) cellule de charge, b) intégration de la cellule de charge dans le système de fixation avec plaque d'acier au-dessus pour y déposer le spécimen, c) application manuelle de la charge

Ce montage ajusté a également amené son lot de défis. Il était possible de maintenir manuellement une charge sur la cellule de charge. Cependant, le système de fixation de la plaque contribuant aux efforts appliqués sur cette dernière et, par suite, sur la cellule de charge, en plus de la pression appliquée par l'outil, il était difficile et non reproductible de déterminer quelle charge devait être atteinte sur la cellule de charge afin que la charge effective sur le dessus de la plaque soit celle visée. De multiples tentatives ont été effectuées en modifiant entre autres le système de fixation de la plaque, le positionnement de la cellule de charge et en effectuant plusieurs fois les essais avec les mêmes configurations de montage. Malheureusement, malgré ces nombreuses tentatives d'optimisation, les résultats obtenus sont demeurés inconsistants en raison de la difficulté à bien

contrôler la charge appliquée. Une perceuse plus adaptée à ce type d'essai serait requise, la perceuse à colonne utilisée au laboratoire présentant malheureusement certaines limitations tel qu'indiqué plus tôt.

Le temps restant dans ce projet ne permettant malheureusement pas d'acquérir un nouvel équipement de ce type à temps, il a fallu trouver une autre option pour tester en abrasion les plaques du projet. Les plaques ont alors été testées à l'externe, dans le laboratoire du groupe de recherche sur le ciment et le béton de l'Université de Sherbrooke, qui venait de s'équiper pour cet essai. Une partie du développement réalisé dans ce projet (outil d'abrasion, système de maintien des spécimens, etc.) ainsi que les apprentissages réalisés lors de ce développement d'essai seront cependant utiles dans le futur pour continuer à développer l'essai à Polytechnique Montréal, fort probablement en utilisant un autre type de perceuse à colonne.

La Figure 3.25 illustre le montage de l'Université de Sherbrooke réalisé à l'aide d'une perceuse à colonne avec une tête libre, permettant un déplacement vertical libre de l'outil rotatif. Pour respecter les exigences de la norme concernée, une charge équivalente à celle requise est appliquée sur l'outil à l'aide d'une masse correspondante à 197 ± 2 N ou 98 ± 1 N, selon le cas.

Un tachymètre est installé pour mesurer et vérifier en continu la vitesse de rotation de l'outil en tours par minute (200 tr/min), garantissant ainsi que l'essai se déroule dans les conditions prescrites. La plaque est solidement fixée sur le plateau de la perceuse à l'aide d'un système de fixation (serres joints et équerres en acier), pour un maintien rigide et stable durant l'essai.

La plaque est d'abord positionnée et fixée sur le plateau mobile, une fois en place, l'outil rotatif est mis en marche et atteint une vitesse de 200 tr/min. Ensuite, le plateau mobile est progressivement soulevé jusqu'à ce que l'outil entre en contact avec la plaque, ce qui marque le début du chronométrage de l'essai.

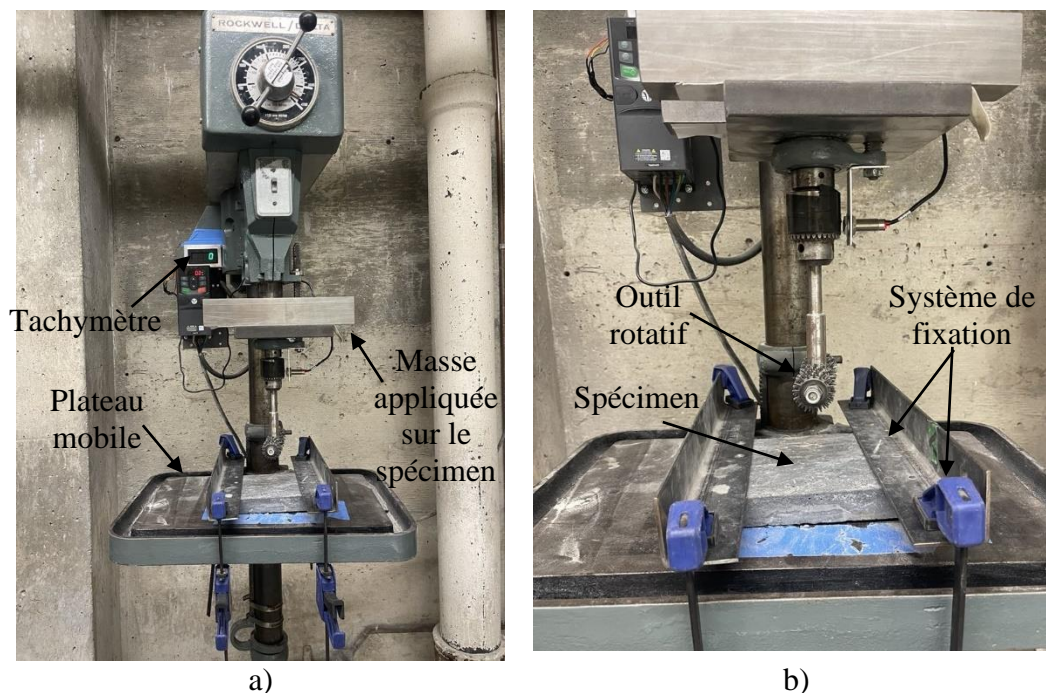


Figure 3.25 Montage du groupe de recherche sur le ciment et le béton de l'Université de Sherbrooke : a) Vue d'ensemble b) Zoom sur le spécimen mis en place

3.3.2.2 Détermination de la perte par abrasion

Dans l'essai ASTM C944, la résistance à l'abrasion est décrite par la masse de matériau perdue lors des cycles d'abrasion. Afin de déterminer cette quantité, la plaque est tout d'abord pesée avant l'essai, sur une balance ayant une précision de 0.1 g. Ensuite, à la fin de chaque cycle d'abrasion, la plaque est retirée du montage d'essai, nettoyée à l'aide d'un jet d'air comprimé, puis pesée à nouveau sur la même balance.

3.3.3 Résultats du programme expérimental

3.3.3.1 Comportement BFUP versus BO

Tel qu'indiqué à la section 3.3.1, la comparaison de résistance à l'abrasion entre le BFUP et le BO à l'étude est réalisée sur une surface lisse. Pour chacun des bétons, deux essais d'abrasion ont été réalisés sur des plaques intacts et deux autres ont été réalisés sur des plaques ayant été préalablement soumis à l'essai d'écaillage.

La Figure 3.26 illustre l'évolution des pertes de masse cumulatives mesurées au fur et à mesure des trois cycles d'abrasion de 2 minutes effectués sur les plaques testées. Le Tableau 3.13 résume les résultats moyens des deux plaques d'une même condition représentés à la Figure 3.26, les écarts associés entre les plaques intacts et avec écaillage d'un même type de béton, ainsi que les écarts entre BFUP et BO pour un même type de plaque (intact ou écaillage).

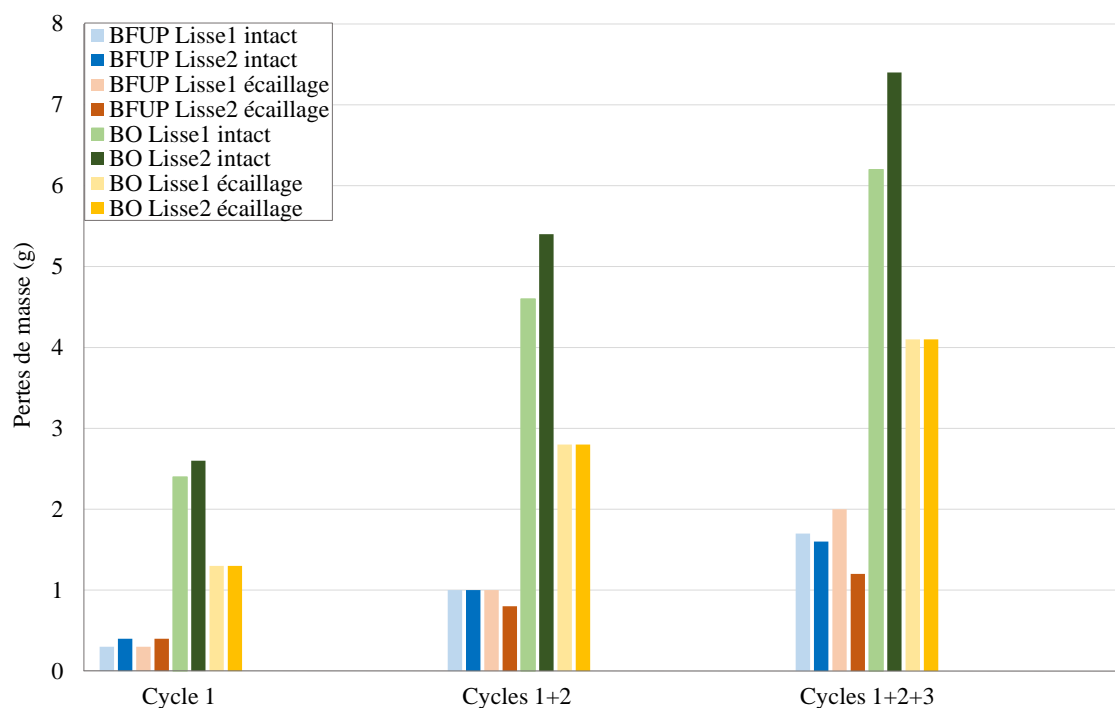


Figure 3.26 Évolution des pertes de masse cumulatives des plaques de BFUP et de BO lisses, intacts ou avec écaillage, durant les trois cycles d'abrasion

Tableau 3.13 Pertes de masse cumulatives moyennes (en grammes) des plaques de BFUP et de BO lisses, intacts ou avec écaillage durant les trois cycles d'abrasion

Cycles	BO intact.	BO écaillage	BO écaillage vs intact (1)	BFUP intact.	BFUP écaillage.	BFUP écaillage vs intact (1)	BFUP vs BO _{intact} ⁽²⁾	BFUP vs BO _{écaillage} ⁽²⁾
1	2.5	1.3	- 48 %	0.35	0.35	0 %	- 86 %	- 73 %
1+2	5.0	2.8	- 44 %	1.0	0.9	- 10 %	- 80 %	- 68 %
1+2+3	6.8	4.1	- 40 %	1.65	1.6	- 3 %	- 76 %	- 61 %

(1) Écart Béton_{écaillage} vs Béton_{intact} = $((\text{Béton}_{\text{écaillage}} / \text{Béton}_{\text{intact}}) - 1) \times 100 \%$

(2) Écart BFUP vs BO = $((\text{BFUP} / \text{BO}) - 1) \times 100 \%$

Les pertes de masse cumulatives enregistrées sur deux plaques d'une même condition d'essai sont quasiment identiques (Figure 3.26), illustrant une bonne reproductibilité et fiabilité des essais. Les valeurs moyennes des deux plaques d'une même condition indiquées au Tableau 3.13 sont donc représentatives des tendances observées.

Le fait d'avoir soumis les plaques de BFUP à un essai d'écaillage avant la réalisation de l'essai d'abrasion n'a pas affecté leur résistance à l'abrasion, puisque les pertes de masse obtenues sur les spécimens intacts ou avec écaillage sont quasiment identiques (Figure 3.26 et Tableau 3.13). Après trois cycles d'abrasion, la perte de masse cumulative moyenne des plaques en BFUP avec écaillage est réduite de 3 % par rapport aux plaques intacts (Tableau 3.13). En revanche, une différence significative de résistance à l'abrasion a été observée entre les plaques de BO intacts et avec écaillage, ces dernières présentant des pertes par abrasion significativement plus faibles que le BO intact. Après trois cycles d'abrasion, la perte de masse cumulative moyenne des plaques en BO avec écaillage est réduite de 40 % par rapport aux plaques intacts (Tableau 3.13). Deux hypothèses peuvent expliquer l'impact marqué du pré-endommagement causé par l'écaillage sur le comportement à l'abrasion du BO. D'une part, l'écaillage préalable à l'abrasion pourrait améliorer la qualité de surface de la plaque en fournissant l'eau requise pour poursuivre son hydratation et permettre aux grains de ciment non hydratés de durcir. D'autre part, l'écaillage préalable retire une partie de la couche superficielle de la plaque généralement plus faible pour exposer un béton plus dense et résistant, alors que cette couche plus fragile en surface est toujours présente sur les plaques intacts et peut donc potentiellement être abrasée plus facilement.

Par ailleurs, la surface du BFUP a par sa grande densité et compacité été beaucoup moins endommagée lors de l'essai d'écaillage. En effet, les pertes cumulatives par écaillage après 56 cycles de gel-dégel en présence de solution saline étaient de 83 % inférieures à celles observées pour le BO (Tableau 3.8, section 3.2.3.1). Il est donc assez logique de ne pas observer de différence significative de résistance à l'abrasion pour les deux types de plaques en BFUP (intact ou avec écaillage).

En termes de différence de comportement à l'abrasion entre le BFUP et le BO, pour un même type de plaque (intact ou avec écaillage), le BFUP présente une résistance à l'abrasion nettement supérieure. Après trois cycles d'abrasion, la perte de masse cumulée du BFUP est inférieure de 76 % par rapport à celle du BO pour les plaques intactes et de 61 % inférieure pour les plaques avec écaillage (Tableau 3.13). Ces résultats confirment les observations déjà rapportées dans la littérature. Plusieurs études antérieures ont en effet mis de l'avant la faible porosité et la microstructure optimisée du BFUP, qui réduisent sa sensibilité à l'usure mécanique, contrairement au BO qui présente une structure plus poreuse et plus susceptible à l'érosion sous l'effet de l'abrasion. Dans l'étude de Lee et al. (2007), les pertes du BO en abrasion reste bien supérieure à celles du BFUP. La perte de masse par abrasion obtenue sur les surfaces coffrées/lisses (1.65 g) est semblable aux résultats obtenus par Graybeal et Tanesi (2007) sur une surface coffrée non traitée (0.93 g et 1 g respectivement). Ces valeurs confirment que les essais réalisés dans ce projet sont en accord avec les données de la littérature, renforçant ainsi leur validité.

Finalement, afin d'évaluer l'évolution des pertes de masse par abrasion au fil des cycles, une analyse des pertes individuelles à chaque cycle a également été réalisée. L'objectif est de déterminer si la tendance observée est linéaire, progressive ou si des variations importantes apparaissent entre les cycles pour les différentes conditions d'essais. Les pertes de masse par cycle pour les plaques de BFUP et BO lisses sont illustrées à la Figure 3.27. Le Tableau 3.14 résume les résultats moyens des deux plaques d'une même condition représentés à la Figure 3.27, ainsi que les écarts observés entre chaque cycle (cycle n) et son cycle précédent (cycle $n-1$).

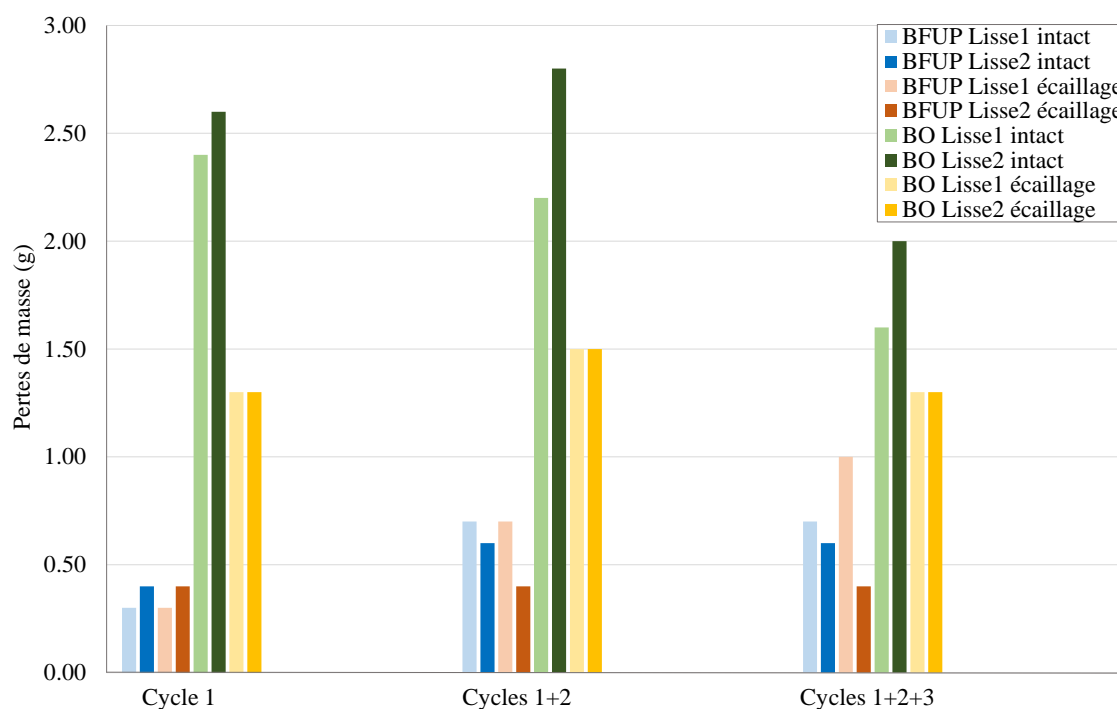


Figure 3.27 Pertes de masse par cycle d'abrasion des plaques de BFUP et de BO lisses, intacts ou avec écaillage

Tableau 3.14 Pertes moyennes de masse par cycle d'abrasion des plaques de BFUP et de BO lisses, intactes ou avec écaillage

Cycle	BO intact	Cycle n vs n-1 BO _{intact} ⁽¹⁾	BO écaillage	Cycle n vs n-1 BO _{écaillage} ⁽¹⁾	BFUP intact	Cycle n vs n-1 BFUP _{intact} ⁽¹⁾	BFUP écaillage	Cycle n vs n-1 BFUP _{écaillage} ⁽¹⁾
1	2.5	-	1.3	-	0.35	-	0.35	-
2	2.5	0 %	1.5	+ 15 %	0.65	+ 86 %	0.55	+ 57 %
3	1.8	- 28 %	1.3	- 13 %	0.65	+ 0 %	0.70	+ 27 %

⁽¹⁾ Écart Cycle n versus Cycle n-1 = $((\text{Cycle } n / \text{Cycle } n-1) - 1) \times 100 \%$

Alors que les pertes de masse moyennes par cycle sont relativement stables ($\pm 15 \%$) pour les plaques de BO ayant préalablement subi de l'écaillage (Tableau 3.14), elles sont plus importantes

durant les deux premiers cycles pour les plaques de BO intactes puis tendent à diminuer au cours du 3^{ème} cycle avec une réduction de - 28 % entre le 2^{ème} et 3^{ème} cycle (Tableau 3.14). Cette diminution des pertes de masse par cycle après un certain nombre de cycles serait cohérente avec la seconde hypothèse indiquant que la présence d'une couche superficielle plus faible sur les plaques intactes (non préalablement endommagée). Une fois que cette couche est abrasée dans les premiers cycles, la perte de masse dans les cycles qui suivent diminuerait et deviendrait plus stable. Cette hypothèse pourrait être confirmée en réalisant par exemple un nombre plus important de cycles et/ou en réalisant de l'abrasion sur des surfaces sciées, plus éloignées de la surface coffrée.

En ce qui concerne l'évolution des pertes de masse selon les cycles pour le BFUP, une augmentation des pertes est observée entre le 1^{er} et le 2^{ème} cycle, avec des augmentations moyennes de + 86 % et + 57 % pour les plaques intactes et préalablement écaillées respectivement. Cette hausse pourrait être liée à une mise en place progressive des mécanismes d'usure, où les premières sollicitations génèrent des micro-endommagements qui augmentent temporairement la vulnérabilité à l'abrasion. Il faut cependant noter, qu'en valeur absolue, cette variation n'est pas beaucoup plus importante que celle observée entre le 1^{er} et 2^{ème} cycle sur les plaques de BO avec écaillage. Aussi, à partir du 2^{ème} cycle, une stabilisation des pertes est observée sur les spécimens en BFUP. Les pertes mesurées durant le 2^{ème} et le 3^{ème} cycle sont identiques pour les spécimens de BFUP intacts et augmentent seulement de 27 % entre ces deux cycles pour les spécimens avec écaillage, soit une augmentation moindre qu'entre le 1^{er} et le 2^{ème} cycle. Dans tous les cas, les pertes mesurées sur les plaques de BFUP restent largement inférieures à celles mesurées sur les plaques de BO.

En conclusion, l'évolution des pertes de masse par abrasion dans le temps semble se stabiliser rapidement, que ce soit pour le BFUP ou le BO, intacts ou avec écaillage. Il n'y a donc pas de différence significative en ce sens entre le BFUP et le BO.

La Figure 3.28 illustre l'état des plaques de BFUP et de BO lisses, intactes ou avec écaillage après les 3 cycles d'abrasion. La profondeur d'empreinte de l'outil rotatif est plus importante sur les plaques de BO que sur celles en BFUP, confirmant visuellement la meilleure résistance à l'abrasion du BFUP.

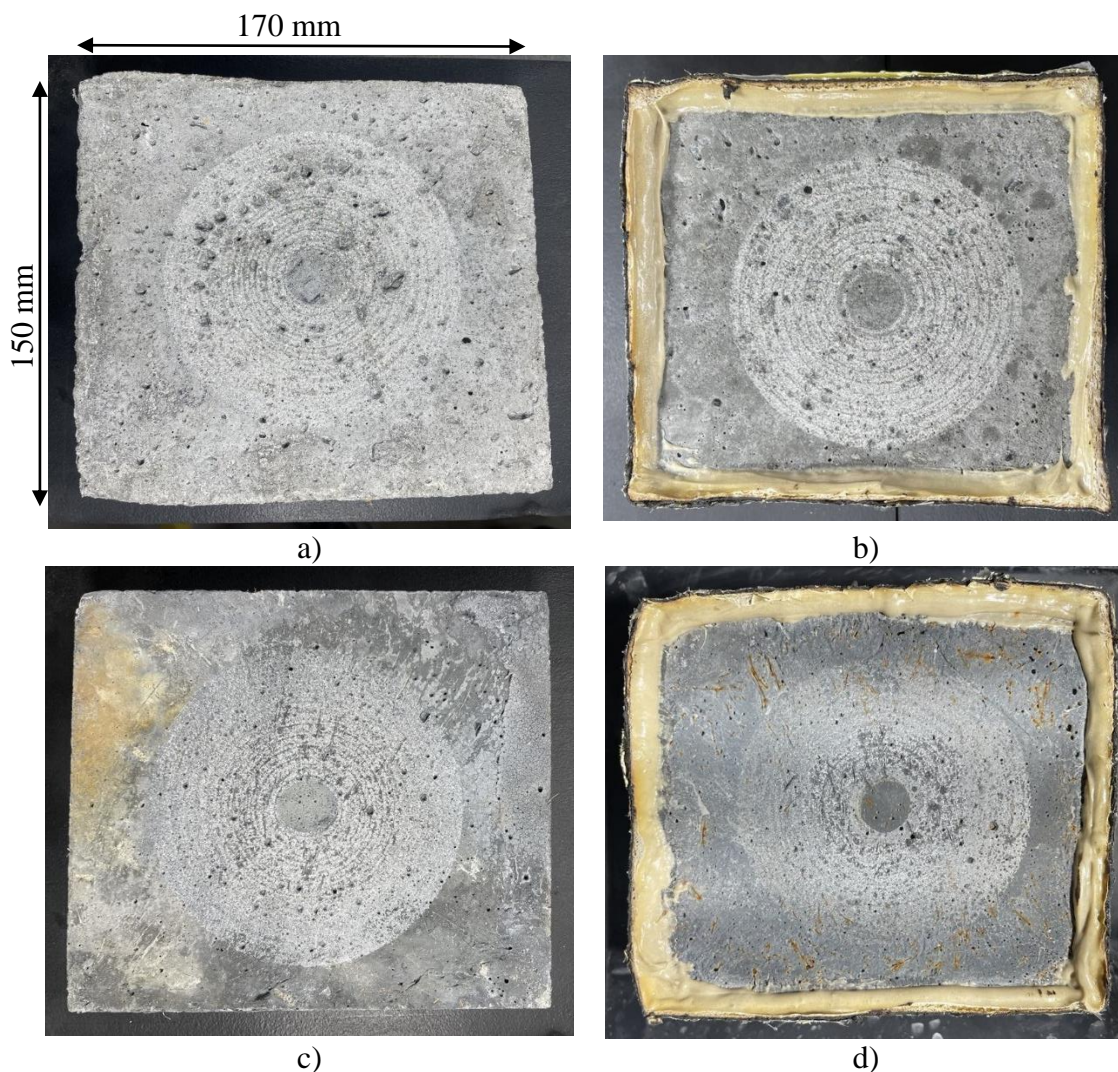


Figure 3.28 État des spécimens de BFUP et BO lisses après 6 min d’abrasion : a) BO intact, b) BO avec écaillage, c) BFUP intact, d) BFUP avec écaillage

3.3.3.2 Comportement BFUP avec différents finis de surface

Cette section s’intéresse maintenant à l’impact de différents finis de surface sur la résistance à l’abrasion du BFUP.

La Figure 3.29 illustre l’évolution des pertes de masse cumulatives mesurées au fur et à mesure des trois cycles d’abrasion de 2 minutes effectués sur les plaques de BFUP avec un fini lisse, avec granulats/fibres exposés ou rainuré sur des spécimens intacts ou avec écaillage (section 3.3.1). Le Tableau 3.15 résume les résultats moyens des deux plaques d’une même condition représentés à la Figure 3-28 ainsi que les écarts associés entre les spécimens intacts et avec écaillage pour les

différents finis de surface étudiés. Finalement, le Tableau 3.16 reprend les mêmes valeurs moyennes de pertes par abrasion pour faire ressortir cette fois les écarts entre les finis de surface avec granulats/fibres exposés ou rainuré versus un fini lisse, pour un même type de spécimen.

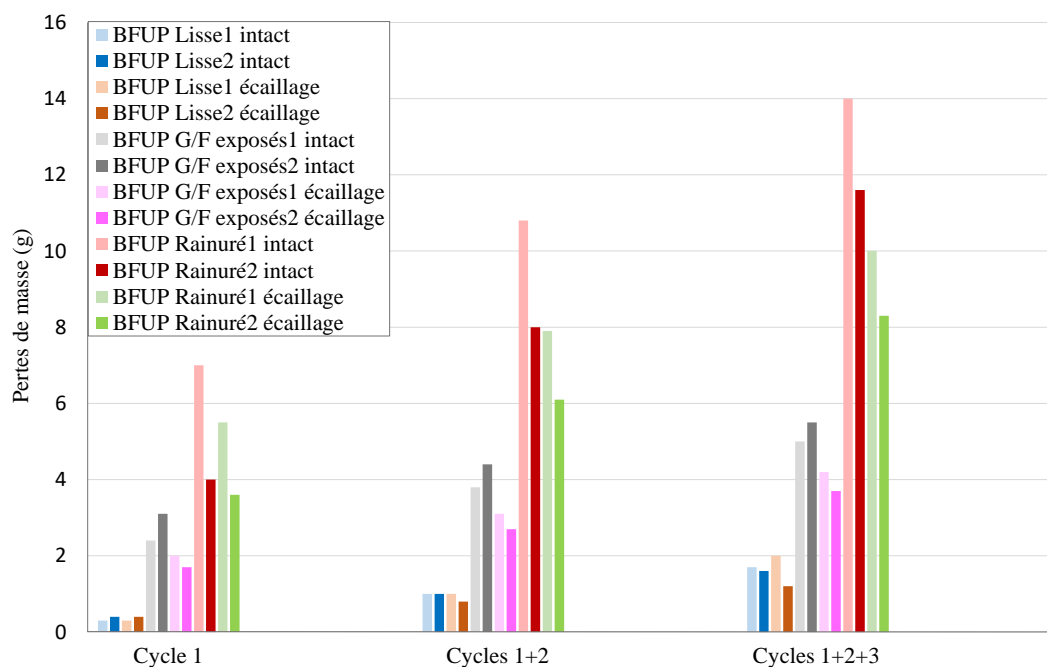


Figure 3.29 Évolution des pertes de masse cumulatives des spécimens de BFUP lisse, avec granulats/fibres exposés et rainuré, intacts ou avec écaillage durant les trois cycles d'abrasion

Tableau 3.15 Effet de l'écaillage sur les pertes de masse cumulatives moyennes (en grammes) des spécimens en BFUP pour les différents finis de surface étudiés

Cycles	BFUP lisse			BFUP granulats/fibres exposés			BFUP rainuré		
	BFUP intact	BFUP écaillage	BFUP écaillage vs intact ⁽¹⁾	BFUP intact	BFUP écaillage	BFUP écaillage vs intact ⁽¹⁾	BFUP intact	BFUP écaillage	BFUP écaillage vs intact ⁽¹⁾
1	0.35	0.35	0 %	2.75	1.85	- 33 %	5.50	4.55	- 17 %
1+2	1.00	0.90	- 10 %	4.10	2.90	- 29 %	9.40	7.00	- 26 %
1+2+3	1.65	1.60	- 3 %	5.25	3.95	- 25 %	12.80	9.15	- 29 %

⁽¹⁾ Écart Béton_{écaillage} vs Béton_{intact} = ((Béton_{écaillage} / Béton_{intact}) - 1) × 100 %

Tableau 3.16 Effet du fini de surface sur les pertes de masse cumulatives moyennes (en grammes) des spécimens en BFUP intacts ou avec écaillage

Cycles	Spécimens INTACTS					
	BFUP granulats/fibres exposés VS lisse			BFUP rainuré VS lisse		
	BFUP _{lisse}	BFUP _{G/Fexp.}	BFUP _{G/Fexp.} vs lisse ⁽¹⁾	BFUP _{lisse}	BFUP _{rainuré}	BFUP _{rainuré} vs lisse ⁽¹⁾
1	0.35	2.75	+ 686 %	0.35	5.50	+ 1471 %
1+2	1.00	4.10	+ 310 %	1.00	9.40	+ 840 %
1+2+3	1.65	5.25	+ 218 %	1.65	12.80	+ 676 %
Cycles	Spécimens AVEC ÉCAILLAGE					
	BFUP granulats/fibres exposés VS lisse			BFUP rainuré VS lisse		
	BFUP _{lisse}	BFUP _{G/Fexp.}	BFUP _{G/Fexp.} vs lisse ⁽¹⁾	BFUP _{lisse}	BFUP _{rainuré}	BFUP _{rainuré} vs lisse ⁽¹⁾
1	0.35	1.85	+ 429 %	0.35	4.55	+ 1200 %
1+2	0.90	2.90	+ 222 %	0.90	7.00	+ 678 %
1+2+3	1.60	3.95	+ 147 %	1.60	9.15	+ 472 %

⁽¹⁾ Écart BFUP_{fini1} vs BFUP_{fini2} = ((BFUP_{fini1} / BFUP_{fini2}) - 1) × 100 %

La Figure 3.30 illustre un comportement globalement assez similaire entre les spécimens d'une même condition (intacts ou avec écaillage pour chaque type de finition), ce qui suggère une bonne reproductibilité et fiabilité dans les essais. Seuls les spécimens rainurés, qui ont eu plus de pertes par abrasion, présentent une variabilité un peu plus importante. Ceci peut s'expliquer par le fait que les pertes par abrasion sur ce type de fini de surface ont majoritairement lieu localement sur les arrêtes des rainures, tel que cela sera expliqué et illustré plus tard dans de cette section.

Le fait d'avoir soumis les plaques de BFUP à un essai d'écaillage avant la réalisation de l'essai d'abrasion a eu un impact un peu différent selon le type de finition de surface (Tableau 3.15). L'écaillage préalable a très peu modifié l'abrasion pour le BFUP avec fini lisse (-3 % après les 3 cycles d'abrasion), tel qu'indiqué à la section 3.3.3.1. Cependant, l'écaillage préalable a réduit les pertes par abrasion pour les deux autres finis de surface étudiés (granulats/fibres exposés et rainuré). Pour le BFUP avec granulats/fibres exposés, la diminution est plus marquée au 1^{er} cycle puis tend à diminuer au fur et à mesure des cycles (diminution de 33 à 25 % entre le 1^{er} et 3^{ème} cycles). Pour le BFUP rainuré, la diminution est un peu moins marquée au 1^{er} cycle (- 17 %), mais augmente un peu ensuite pour se stabiliser à un niveau similaire à celui obtenu pour le BFUP avec

granulats/fibres exposés avec une diminution de 29 % après le 3^{ème} cycle. La différence de comportement à l'abrasion plus marquée entre plaques intactes et avec écaillage pour les finis de surface avec granulats/fibres exposés et rainuré que pour le fini lisse est cohérent avec les résultats d'écaillage présentés à la section 3.2.3.2. Les finis de surface avec granulats/fibres exposés et rainuré ayant présenté plus de perte par écaillage, une partie de la couche superficielle plus faible du BFUP avait déjà été retirée.

En termes de différence de comportement à l'abrasion entre les différents finis de surface, pour les plaques intactes ou avec écaillage (Tableau 3.16), le BFUP avec granulats/fibres exposés ainsi que le BFUP rainuré présentent tous deux des pertes par abrasion beaucoup plus importantes que le BFUP lisse, avec des augmentations des pertes cumulatives après 3 cycles d'abrasion de 2.2 à 7 fois supérieures respectivement, dans le cas des spécimens intacts et de 1.5 à 5 fois supérieures respectivement, dans le cas des spécimens avec écaillage. Ceci représente des augmentations nettement plus importantes que celle observées sur le BO lisse versus le BFUP lisse (section 3.3.3.1). L'impact plus important de l'écaillage préalable peut s'expliquer par la structure plus rugueuse du fini avec granulat-fibres exposés qui facilite l'arrachement de matière et la concentration d'efforts au niveau des arêtes des rainures sous l'effet de l'outil rotatif.

Aucune étude de la littérature ne s'est intéressée à l'abrasion de surfaces de BFUP rainurées ou avec granulat/fibres exposés. Il est donc difficile de comparer les valeurs quantitatives obtenues pour ces finis de surfaces avec des données de la littérature. Cependant, plusieurs études, dont celles de Graybeal et Tanesi (2007) et Ralli (2023), montrent des variations dans les pertes en abrasion mesurées sur différents finis de surface (section 2.1.3.4). Les finis de surface étudiés dans ces études ayant moins de différences de texture entre eux que ceux étudiés dans le cadre de ce projet, il est cohérent d'observer des différences d'abrasion plus significatives dans ce projet.

Finalement, une analyse des pertes individuelles à chaque cycle a également été réalisée, afin d'évaluer l'évolution des pertes de masse par abrasion au fil des cycles. Les pertes de masse par cycle, pour l'ensemble des plaques de BFUP sont illustrées à la Figure 3.30. Le Tableau 3.17 résume les résultats moyens des deux spécimens d'une même condition représentés à la Figure 3.30, ainsi que les écarts observés entre chaque cycle (cycle n) et son cycle précédent (cycle $n-1$), pour chaque condition d'essai.

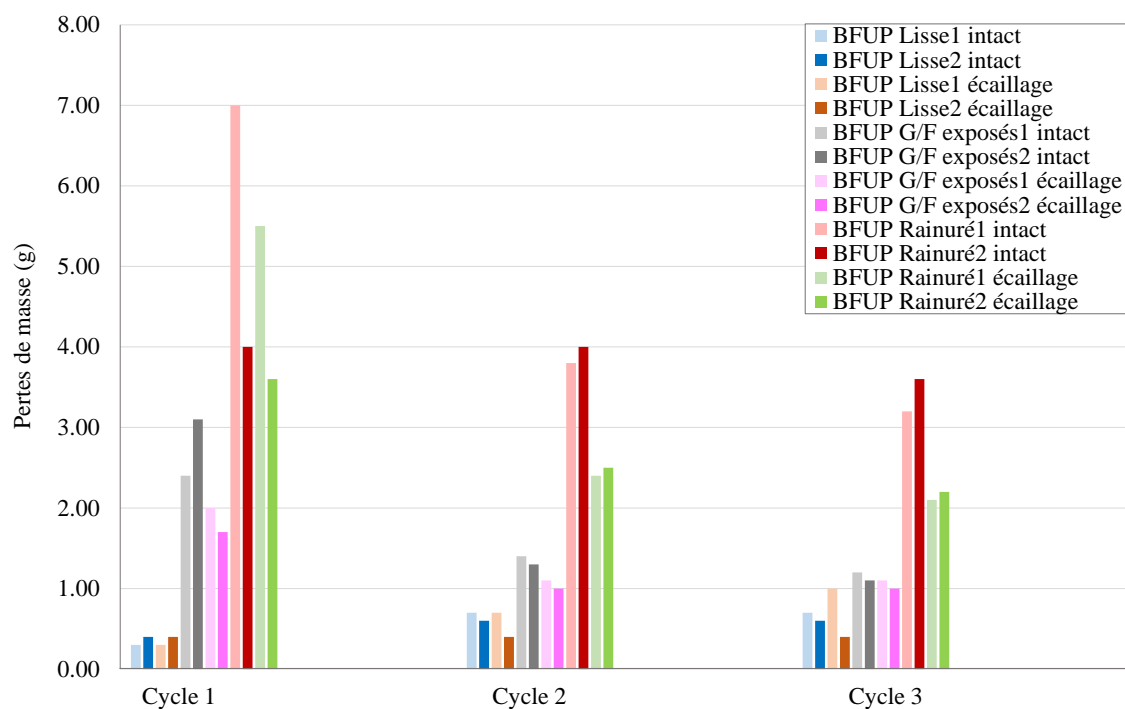


Figure 3.30 Pertes de masse par cycle d'abrasion des spécimens de BFUP, intacts ou avec écaillage, avec fini lisse, granulats/fibres exposés et rainuré

Tableau 3.17 Pertes moyennes de masse par cycle d'abrasion des spécimens de BFUP, intacts ou pré-écaillés, granulats/fibres exposés et rainuré

Cycle	Spécimens INTACTS					
	BFUP _{lisse}	Cycle n vs n-1 BFUP _{lisse} ⁽¹⁾	BFUP _{G/Fexp.}	Cycle n vs n-1 BFUP _{exposé} ⁽¹⁾	BFUP _{rainuré}	Cycle n vs n-1 BFUP _{rainuré} ⁽¹⁾
1	0.35	-	2.75	-	5.50	-
2	0.65	+ 86 %	1.35	- 51 %	3.90	- 29 %
3	0.65	0 %	1.15	- 15 %	3.40	- 13 %
Cycle	Spécimens AVEC ÉCAILLAGE					
	BFUP _{lisse}	Cycle n vs n-1 BFUP _{lisse} ⁽¹⁾	BFUP _{G/Fexp.}	Cycle n vs n-1 BFUP _{exposé} ⁽¹⁾	BFUP _{rainuré}	Cycle n vs n-1 BFUP _{rainuré} ⁽¹⁾
1	0.35	-	1.85	-	4.55	-
2	0.55	+ 57 %	1.05	- 43 %	2.45	- 46 %
3	0.70	+ 27 %	1.05	- 0 %	2.15	- 12 %

⁽¹⁾ Écart Cycle n versus Cycle n-1 = $((\text{Cycle } n / \text{Cycle } n-1) - 1) \times 100 \%$

La Figure 3.30 illustre que pour les surfaces lisses la résistance initiale à l'abrasion est supérieure, à l'inverse de l'observation pour les finis de surface à granulats/fibres exposés et rainuré. Le BFUP avec surface lisse, qu'il soit intact ou avec écaillage, subit des pertes relativement faibles durant le 1^{er} cycle (0.35 g). Ces pertes augmentent ensuite légèrement lors du 2^{ème} cycle (+ 86 % et + 57 % pour les spécimens intacts et avec écaillage respectivement) avant de se stabiliser (+ 0 % et + 27 % respectivement) (Tableau 3.17). À l'inverse, les spécimens de BFUP à granulats/fibres exposés et rainurés présentent des pertes plus élevées durant le 1^{er} cycle que dans les cycles qui suivent. Pour les spécimens avec le fini de surface à granulats/fibres exposés, des diminutions de 51 % et 43 % des pertes sont observées dès le 2^{ème} cycle, pour les spécimens intacts et avec écaillage respectivement, et cette tendance se poursuit au 3^{ème} cycle avec des diminutions de 15 % et 0 % respectivement. Pour les plaques avec le fini rainuré, des diminutions de 29 % et 46 % des pertes sont observées dès le 2^{ème} cycle, pour les spécimens intacts et avec écaillage respectivement, et cette tendance se poursuit au 3^{ème} cycle avec des diminutions de 13 % et 12 % respectivement. Ces données suggèrent un effet de stabilisation après l'élimination des éléments les plus vulnérables en surface.

La Figure 3.31 illustre l'état des spécimens intacts et avec écaillage pour les trois finis de surface à l'étude. Les plaques de BFUP lisses (Figure 3.31 a et b) montrent une usure relativement homogène et peu profonde. En comparaison, la surface avec granulats/fibres exposés est beaucoup plus rugueuse. Cette rugosité induit une abrasion plus hétérogène visible par l'empreinte irrégulière laissée par l'outil rotatif (Figure 3.31c et d). Alors que les sections plus profondes dans le profil de rugosité semblent moins abrasées, les éléments plus en surface peuvent plus facilement être endommagés par abrasion, expliquant les pertes plus importantes observées pour ce type de fini de surface versus le fini lisse. Enfin, pour la finition rainurée, l'empreinte de l'outil rotatif semble relativement homogène sur la surface supérieure de la plaque. Cependant une usure marquée est visible sur les arêtes des rainures avec plusieurs gros morceaux de BFUP qui se sont détachés lors de l'essai d'abrasion (Figure 3.31e et f), expliquant les pertes plus importantes de masses enregistrées pour ce fini de surface. Ces observations viennent donc corroborer les résultats quantitatifs présentés précédemment dans cette section.

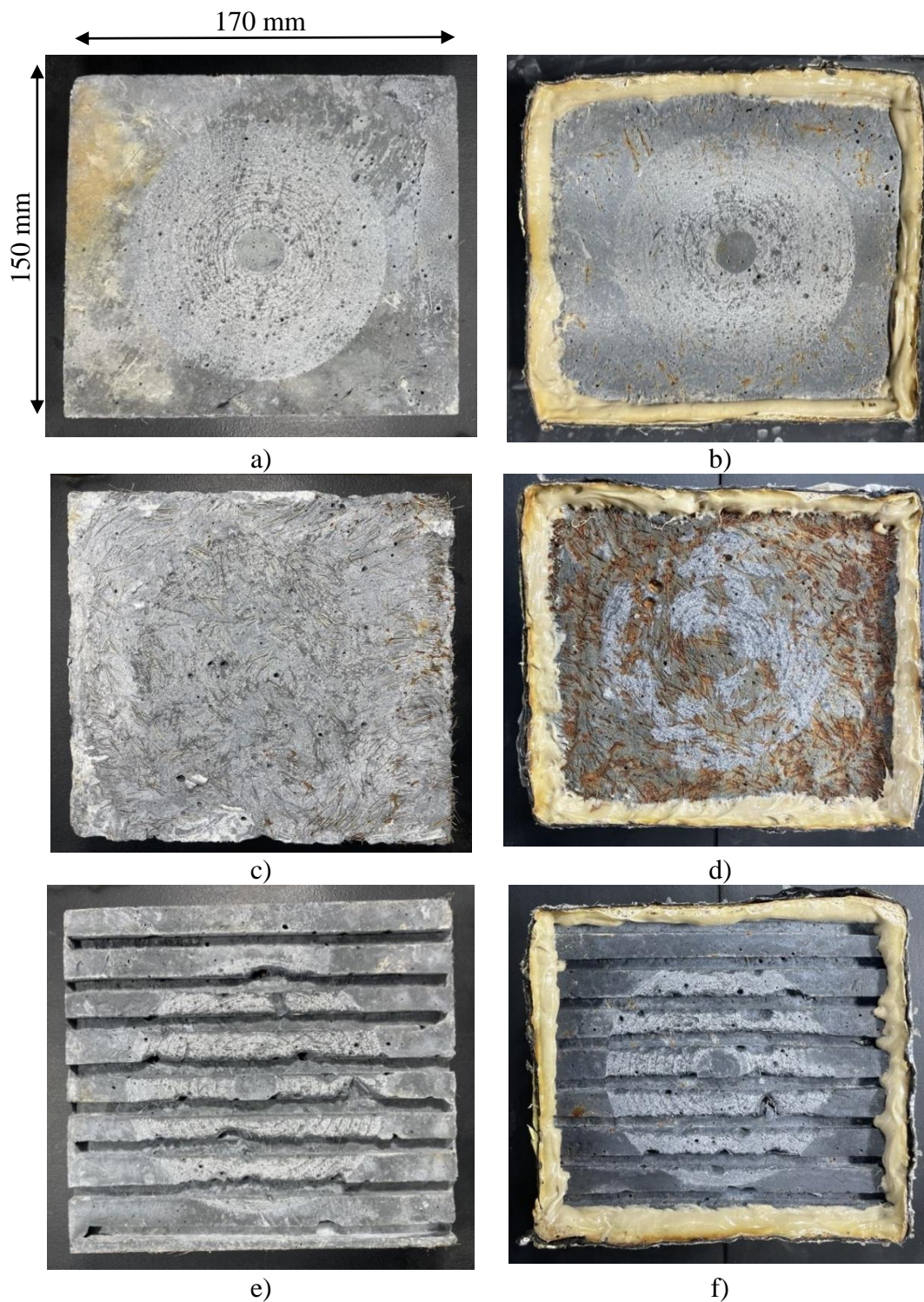


Figure 3.31 État des spécimens de BFUP, intacts ou pré-écaillés, et avec différents finis de surface, après 6min d'abrasion : BFUP Lisse : a) intact, b) pré-écaillé, BFUP granulats exposés : c) intact, d) pré-écaillé, BFUP rainuré : e) intact, f) avec écaillage

3.3.4 Conclusions sur le comportement à l'abrasion

Les résultats d'essais d'abrasion ont mis en évidence une résistance à l'abrasion du BFUP avec surface lisse nettement supérieure à celle du BO, indépendamment de l'état initial des plaques (intactes ou avec écaillage), avec des pertes de masse cumulatives plus de 60 % inférieures pour le BFUP. Cette performance souligne l'intérêt du BFUP pour les chapes où la résistance à l'usure est critique.

L'ajout d'une finition avec granulats/fibres exposés ou rainurée sur la surface de BFUP a significativement augmenté les pertes par abrasion en comparaison au fini lisse. Après 3 cycles d'abrasion (6 min), les pertes cumulatives par abrasion ont été de 2.5 à 3.2 fois supérieures pour le fini avec granulats/fibres exposés, pour les spécimens avec écaillage et intacts respectivement, et de 5.7 à 7.8 fois supérieures pour le fini rainuré respectivement. Dans le cas du fini avec granulats/fibres exposés, ces pertes plus importantes de matière lors de l'abrasion peuvent s'expliquer par la rugosité accrue de la surface, facilitant l'arrachement des particules en relief. Pour le fini rainuré, ces pertes se concentrent principalement au niveau des arêtes des rainures, où la sollicitation mécanique de l'outil rotatif utilisé dans l'essai ASTM C944 est plus intense.

La performance des surfaces à rugosité variable (granulats/fibres exposés et rainuré) soulève des questions quant à l'adéquation de l'essai ASTM C944. Bien qu'il permette de caractériser certains comportements, l'essai ASTM C944 localise l'usure aux arêtes de l'outil, rendant la comparaison avec des conditions réelles plus délicate. En ce sens, l'étude de l'abrasion avec le « three wheel polishing device », envisagé initialement dans ce projet, constitue une alternative plus représentative des interactions entre une chape en béton et des pneus de véhicules en conditions réelles. La réalisation d'essais avec ce nouvel appareil est recommandée.

Concernant l'impact de l'écaillage préalable sur l'abrasion, les résultats montrent des différences notables selon le type de finition. Pour le BFUP lisse, l'écaillage n'a pas significativement modifié l'usure à l'abrasion, confirmant la forte cohésion du matériau. En revanche, pour les finis à granulats/fibres exposés et rainuré, l'écaillage initial a accéléré les pertes de masse aux premiers cycles, en fragilisant les zones soumises à des contraintes mécaniques élevées lors de l'abrasion. Cela pourrait être lié à une propagation plus rapide des microfissures présentes en surface, exacerbant le détachement des particules exposées. Toutefois, au fil des cycles, cet effet s'atténue,

suggérant que les surfaces les plus vulnérables sont rapidement éliminées, laissant place à une structure plus résistante sous-jacente.

3.4 Comportement à l'adhérence

3.4.1 Programme expérimental

L'adhérence de la chaussée, ou d'une chape de béton exposée directement au trafic routier est un facteur important pour éviter le glissement des véhicules et les accidents associés. Ainsi, l'adhérence des surfaces de béton à l'étude (BO et BFUP avec les mêmes différents finis de surface que ceux décrits à la section 3.2.1) a été caractérisée à l'aide du pendule britannique (British Pendulum Number, BPN)), selon la norme ASTM E303 (2022). L'objectif était d'évaluer s'il existe des différences d'adhérence selon le type de béton ou de fini de surface. Les conditions d'essais étudiés ainsi que le nombre de spécimens testés sont résumés au Tableau 3.18.

Tableau 3.18 Conditions testées en adhérence selon la norme ASTM E303 (2022)

Fini de surface	BO	BFUP
Lisse	X	X
Granulats et fibres exposés		X
Rainuré transversalement		X
Rainuré longitudinalement		X

3.4.2 Méthode d'essai

L'essai de pendule britannique (ASTM E303, 2022) évalue le coefficient de frottement longitudinal entre un patin en caoutchouc et la surface testée, simulant la résistance au glissement d'une surface. La Figure 3.32a présente les composantes du pendule, alors que la Figure 3.32b illustre le pendule utilisé dans le cadre de ce projet. Ce dernier appartient au laboratoire de la division de l'expertise et du soutien technique de la Ville de Montréal. Les essais ont alors été réalisés en collaboration avec la Ville de Montréal, dans leur laboratoire.

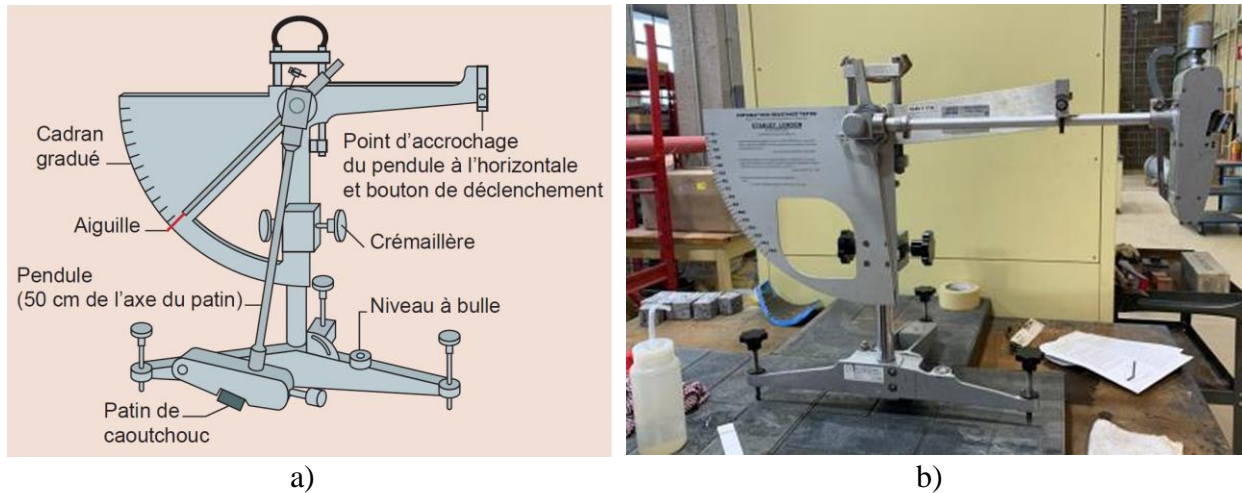


Figure 3.32 Pendule britannique, a) schématisation et détails de ses composants (Boulet et al., 2006), b) appareil de la Ville de Montréal utilisé pour ce projet

La procédure d'essai inclut les étapes suivantes :

- Installation et mise à niveau du pendule sur la surface testée, en s'assurant que la surface de contact entre le patin du pendule et le spécimen d'essai, lorsque le pendule est relâché, respecte les dimensions de surface de contact indiquées dans la norme;
- Projection d'eau sur la surface du spécimen à tester;
- Libération du pendule afin qu'il descende, entre en contact avec la surface du spécimen puis remonte à une hauteur qui diffère selon l'énergie perdue par frottement avec la surface du spécimen;
- La remontée du pendule entraîne l'aiguille représentée à la Figure 3.32a, qui s'arrête alors à une certaine position sur le cadran gradué. La position de l'aiguille indique la valeur d'indice BPN de l'essai en question;
- Tel qu'indiqué dans la norme ASTM E303 (2022), deux mesures de ce type sont initialement réalisées mais non considérées dans les résultats;
- Par la suite, l'essai est répété 3 à 5 fois pour obtenir une moyenne représentative de la surface testée.

3.4.3 Mesures d'adhérence préliminaires sur des surfaces de BO ayant différentes rugosités

Avant de procéder aux essais prévus au programme expérimental de ce projet, présenté à la section 3.4.1, des mesures préliminaires d'adhérence ont été effectuées sur des surfaces de BO ayant différentes rugosités de surface. Pour ce faire, deux lots de plaques CSP de l'International Concrete Repair Institute (ICRI) (Winkler, 2013) ont été positionnées côte-à-côte dans le fond de coffrages en bois (Figure 3.33a). Du BO a ensuite été coulé par-dessus avant d'épouser la même rugosité de surface sur la partie en contact avec les plaquettes. La Figure 3.33b illustre les surfaces en béton obtenues après démoulage. L'objectif de ces essais étaient, d'une part, de se familiariser avec le dispositif d'essai et, d'autre part, de voir si les valeurs qui seraient obtenues sur les spécimens de ce projet pouvaient être mis en relief avec des échelles ICRI de rugosité/adhérence reconnues dans le domaine des constructions et réparations en béton.

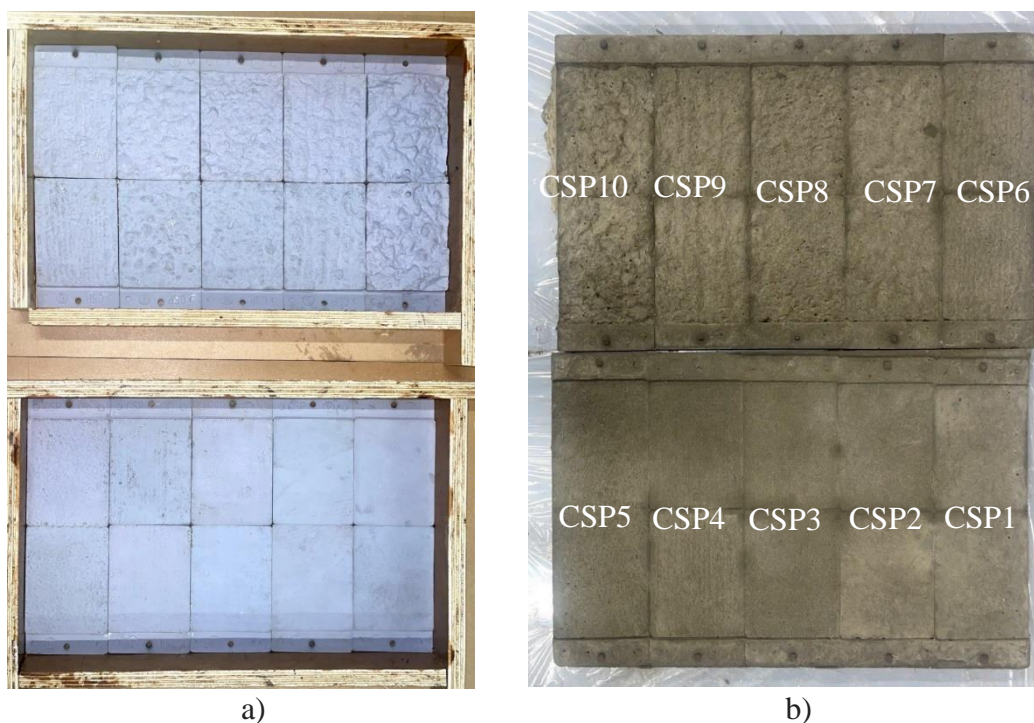


Figure 3.33 Fabrication de surfaces de béton de différentes rugosité CSP, a) plaques CSP positionnées dans les coffrages, b) finis de surface CSP obtenus sur le béton

Le Tableau 3.19 récapitule les valeurs BPN obtenues lors des essais d'adhérence effectués sur les surfaces de béton des différents CSP représentées à la Figure 3.33b. Les valeurs mesurées sur les différentes plaques varient de 55 à 74, indiquant un bon niveau d'adhérence pour toutes les surfaces testées. De manière générale, l'adhérence mesurée au BPN augmente avec des valeurs de CSP plus élevées présentant une surface plus texturée. Toutefois, cette relation n'est pas strictement linéaire : au-delà d'un certain niveau de rugosité (CSP6 et plus), les valeurs de BPN fluctuent légèrement plutôt que de continuer à augmenter.

Cela peut s'expliquer par deux effets contradictoires. D'une part, une rugosité plus marquée tend à augmenter l'adhérence en raison d'un meilleur blocage mécanique avec le patin du pendule. D'autre part, étant donné que l'essai du pendule britannique applique une force limitée, l'empreinte du patin sur la surface n'est pas aussi significative qu'un pneu de véhicule qui s'écrase en conditions réelles. Ainsi, lorsqu'on atteint des CSP élevés (CSP7-CSP10), l'augmentation de la rugosité ne se traduit pas forcément par une augmentation proportionnelle du BPN, car une partie de la matière en relief ne participe pas pleinement au contact avec le patin.

Par ailleurs, les valeurs obtenues sont supérieures à la valeur seuil considérée comme acceptable par la Ville de Montréal (BPN=55 pour enrobé bitumineux). Cela confirme que toutes les surfaces en béton testées offrent une résistance au glissement satisfaisante selon l'essai BPN. Toutefois, pour les surfaces très rugueuses, il pourrait être pertinent de compléter ces résultats avec d'autres méthodes d'évaluation de l'adhérence plus représentatives de la réalité, telles que des essais de freinage avec un véhicule instrumenté ou des tests de frottement dynamique telle que la remorque SCRIM.

En conclusion, ces résultats permettent de valider l'adhérence des surfaces CSP de l'ICRI testées selon l'essai du pendule britannique, tout en soulignant les limites de cette méthode pour les rugosités très élevées.

Tableau 3.19 Indices BPN obtenus sur différents finis CSP en BO

Indices BPN (British Pendulum Number)		
Type de rugosité	Indices BPN	BPN moyen
CSP1	55, 55, 55, 55, 55	55
CSP2	56, 57, 57, 57, 57	57
CSP3	59, 60, 61, 61, 61	60
CSP4	61, 63, 64, 64, 64	63
CSP5	64, 64, 64, 63, 63	64
CSP6	62, 61, 63, 61, 64	62
CSP7	60, 61, 63, 64, 64	62
CSP8	73, 74, 74, 73, 74	74
CSP9	60, 62, 62, 62, 63	62
CSP10	66, 65, 66, 65, 65	65

3.4.4 Résultats du programme expérimental

3.4.4.1 Comportement BFUP versus BO

Tel qu'indiqué au Tableau 3.18, la comparaison des indices d'adhérence entre les chapes en BFUP et en BO a été réalisée sur une surface lisse. Le Tableau 3.20 résume les indices obtenus pour les deux types de surface.

Tableau 3.20 Indices BPN pour le BO et BFUP avec un fini lisse

Indices BPN (British Pendulum Number)		
Condition d'essai	Indices BPN	BPN moyen
BO Lisse	74, 67, 75, 77	73
BFUP Lisse	76, 68, 64, 74, 72, 71	71

Tel qu'indiqué au Tableau 3.18, la comparaison des indices d'adhérence entre les chapes en BFUP et en BO a été réalisé sur une surface lisse. Le Tableau 3.20 résume les indices obtenus pour les deux types de surface, il montre une adhérence similaire entre le BO et le BFUP lisse, dans les deux cas bien au-dessus de l'exigence minimale de la ville de Montréal ($BPN \geq 55$). L'utilisation d'une chape lisse en BFUP ou en BO n'a donc pas d'impact négatif sur l'adhérence de la chaussée.

3.4.4.2 Comportement BFUP avec différents finis de surface

Cette section s'intéresse maintenant à l'adhérence de différents finis de surface de chapes en BFUP. Le Tableau 3.21 résume les indices obtenus pour les différents finis de surface. Il importe de mentionner que des mesures d'adhérence ont été réalisées sur les surfaces rainurées dans le sens longitudinal et transversal des rainures pour évaluer la différence de résultat.

Tableau 3.21 Indices BPN pour le BFUP avec différents finis de surface

Indices BPN (British Pendulum Number)		
Condition d'essai	Indices BPN	BPN moyen
BFUP Lisse	76, 68, 64, 74, 72, 71	71
BFUP granulats/fibres exposés	75, 69, 70	71
BFUP rainuré longitudinalement	67, 69, 66	67
BFUP rainuré transversalement	96, 94, 94, 86, 84, 92	91

Les résultats présentés au Tableau 3.21 indiquent tout d'abord que les différents finis de surface à l'étude procurent tous une adhérence supérieure à l'exigence minimale de la ville de Montréal ($BPN \geq 55$). Ensuite, malgré une rugosité plus importante de la surface avec granulats/fibres exposés, l'adhérence de ce type de surface est similaire à celle de la surface lisse en BFUP, avec un BPN de 71 dans les deux cas. Ce résultat peut s'expliquer par le double effet de la rugosité déjà relevé à la section 3.4.3 sur les surfaces CSP. Une rugosité accrue augmente l'entrave au glissement, mais réduit la surface de contact entre le patin et la surface lors de l'essai d'adhérence de type pendule. Ces effets « contraires » ont ici résulté en une adhérence globalement similaire.

En ce qui concerne le BFUP rainuré testé en adhérence dans l'axe longitudinal des rainures, soit le sens généralement utilisé en milieu urbain pour éviter le bruit excessif associé à des rainures transversales, il a présenté une adhérence un peu plus faible que le BFUP lisse (BPN de 67 versus 71). Les deux valeurs de BPN restent cependant assez proches malgré une réduction d'environ 6 % de la surface de contact avec le patin dans le cas de la surface rainurée. Ceci indique que les rainures contribuent à compenser la perte d'adhérence liée à la surface de contact réduite. Finalement, le BFUP rainuré testé en adhérence dans l'axe transversal des rainures a présenté le meilleur comportement en adhérence avec un BPN de 91 significativement plus grand que les autres conditions de surface. Ce résultat est logique compte tenu de l'entrave exercé localement au

niveau des arêtes supérieures des rainures. Ce type de finition est donc la plus efficace vis-à-vis des risques de glissement, mais malheureusement trop bruyante pour être utilisé en contexte urbain et ne serait pas utilisé pour les chapes minces en BFUP.

3.4.5 Conclusions sur le comportement à l'adhérence

Les résultats d'adhérence montrent que toutes les finitions testées pour les chapes en BO et en BFUP respectent l'exigence minimale de la Ville de Montréal ($BPN \geq 55$), confirmant ainsi leur aptitude à être utilisées en milieu routier. Toutefois, des différences sont apparues en fonction des finitions de surface.

Une chape en BFUP avec rainures transversales par rapport au trafic routier se distingue par une performance exceptionnelle avec un BPN de 91, démontrant une excellente résistance au glissement. Cependant, cette finition présente un inconvénient acoustique, la rendant moins adaptée en milieu urbain. Par ailleurs, les chapes avec surfaces lisses ou avec granulats/fibres exposés affichent des performances similaires ($BPN \approx 71$), tandis que la chape en BFUP avec rainures longitudinales par rapport au trafic offre une adhérence légèrement inférieure ($BPN = 67$), mais tout de même conforme à l'exigence de la Ville de Montréal.

Il est utile de mentionner que l'essai de pendule présente une certaine limitation dans la représentativité de ses mesures d'adhérence par rapport à celle probablement ressentie par les pneus de véhicules sur une surface de roulement. Il est attendu que la réalité du contact chaussée-pneu avec l'écrasement de ce dernier augmente l'effet de la rainure longitudinale ou transversale sur la mesure d'adhérence. Les surfaces rainurées pourraient donc possiblement être plus avantageuses.

En conclusion, la chape en BFUP apparaît comme une alternative aussi performante que celle en BO en termes d'adhérence, avec une variation assez limitée d'adhérence selon le fini de surface (à l'exception de la surface avec rainures transversales). Le choix de la finition de surface de la chape devra donc être optimisé plutôt en tenant compte des performances en abrasion et à l'écaillage mesurées dans le projet.

3.5 Synthèse des résultats

L'étude a mis en évidence la supériorité des chapes en BFUP par rapport à celle en béton ordinaire (BO) en termes de durabilité face aux sollicitations environnementales et mécaniques. En ce qui concerne la résistance à l'écaillage (section 3.2.3), les chapes en BFUP avec surface lisse ont montré des pertes de masse nettement inférieures à celles du BO après 56 cycles de gel-dégel en présence de sels, avec une réduction de 83 % pour la surface lisse (0.0048 kg/m² contre 0.0279 kg/m² pour le BO). Toutes les finitions de surface en BFUP étudiées montrent une perte très inférieure à la limite normative de 0.5 kg/m², bien que les surfaces à granulats/fibres exposés (jusqu'à 0.072 kg/m²) et rainurées (0.0105 kg/m²) présentent des pertes plus élevées. Ceci est relié respectivement à l'exposition des fibres qui corrodent et la fragilisation potentielle des particules de béton due au jet d'eau sous pression sur une plaque à durcissement retardé ainsi qu'à la présence des rainures qui augmente la surface de contact avec la solution saline de 64% par rapport à la surface lisse.

En ce qui concerne la résistance à l'abrasion (section 3.3.3), le BFUP montre une excellente performance avec des pertes de masse 76 % inférieures à celles du BO, grâce à sa densité et à ses fibres métalliques. Même après un endommagement préalable par écaillage, le BFUP avec surface lisse conserve une résistance 61 % supérieure. Les finitions de surface rugueuses ont toutefois réduit sa résistance à l'abrasion, les surface avec granulats/fibres exposées et rainurée présentent des pertes jusqu'à 2.2 et 6.8 fois supérieures à celles de la surface lisse. Ceci s'explique respectivement par la rugosité de surface et surtout les rainures sur lesquelles butent les lames de l'outil d'abrasion.

Enfin, sur le plan de l'adhérence (section 3.4.4), toutes les surfaces respectent l'exigence d'un BPN ≥ 55 de la Ville de Montréal, avec des indices d'adhérence comparables entre BFUP et BO (BPN environ 70) pour surfaces lisses. La meilleure adhérence du BFUP a été obtenue avec la finition de surface rainurée transversalement (BPN = 91) bien qu'elle soit peu adaptée aux milieux urbains en raison du bruit généré. Elle est suivie par la finition lisse et celle avec granulats/fibres exposés, qui présentent toutes deux un BPN de 71, puis par la finition rainurée longitudinalement, avec un BPN légèrement inférieur de 67. Ces résultats montrent que, malgré certaines différences, toutes les finitions testées sont conformes aux exigences minimales et peuvent convenir à une utilisation en

milieu routier, sous réserve d'un choix de finition tenant compte également du confort acoustique et des performances en durabilité.

Globalement, le BFUP démontre une excellente résistance à l'écaillage, à l'abrasion et maintient une adhérence sécuritaire, faisant de lui un matériau particulièrement adapté pour les chapes de pont et industrielles exposées aux environnements agressifs.

CHAPITRE 4 PERFORMANCE EN SERVICE DES JOINTS DE LA CHAPE EN BFUP

La présence de joints froids peut difficilement être évitée entre les différentes coulées de bétons de réparation. L'interface créée dans un joint froid représente une zone de faiblesse, tant au point de vue mécanique qu'au point de vue de la durabilité. Ce chapitre s'intéresse au comportement en traction et à la perméabilité à l'eau sous chargement des joints froids pouvant être présents dans une chape mince en BFUP. L'objectif est d'étudier la performance du joint BFUP-BFUP versus un joint BO-BO, ainsi que l'impact de la géométrie du joint BFUP-BFUP sur sa performance. Pour ce faire, des mesures de perméabilité à l'eau seront effectuées en continu sur des tirants armés comprenant un joint et simultanément sollicités en traction jusqu'à la plastification de l'armature.

Ce chapitre présente en premier lieu la procédure expérimentale adoptée ainsi que les programmes expérimentaux réalisés pour étudier la performance des joints. Les résultats d'essais sont ensuite présentés et analysés.

4.1 Procédure expérimentale

4.1.1 Géométrie des tirants

Des tirants en béton armé sont utilisés pour étudier la performance en service des joints d'une chape mince en béton. Les tirants utilisés dans cette étude ont une longueur de 350 mm, une section transversale de $120 \times 60 \text{ mm}^2$ et, en leur centre, une barre d'armature longitudinale de type 10M, de diamètre 11.3 mm. Les parties hors-béton de cette barre ont une longueur de 300 mm, de chaque côté, afin de permettre l'ancrage du spécimen dans les mâchoires de la presse hydraulique qui sera utilisée pour solliciter le tirant en traction directe (Figure 4.1 et Figure 4.2).

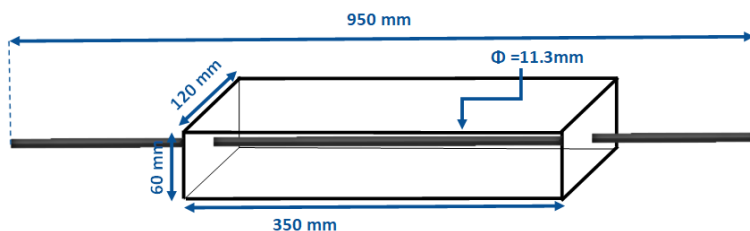


Figure 4.1 Schématisation des tirants



Figure 4.2 Photographies des tirants après démoulage

Ces tirants représentent une petite section d'une chape mince installée sur le substrat d'une dalle à réparer (Figure 4.3). L'épaisseur des tirants (60 mm) a donc été choisie pour être représentative des épaisseurs couramment utilisées (50 à 60 mm) dans les chapes minces en BFUP. Cette épaisseur permet également un recouvrement d'environ 25 mm dans cette direction, soit un recouvrement généralement recommandé pour le BFUP (CSA A23.3-04). La majorité des tirants ont été réalisés avec des joints au centre, afin de représenter une section de chape centrée sur le joint froid (Figure 4.3), dans lequel une armature est toujours ajoutée. Quelques tirants sans joint ont également été produits, à titre de comparaison de comportement avec les tirants avec joints. Ces tirants représentent une section de la partie hors joint de la chape, produite à partir d'une même production de BFUP, sans arrêt de coulée. Même si les chapes minces en BFUP peuvent comprendre ou ne pas inclure d'armatures en dehors de la zone des joints selon les exigences du propriétaire

d'ouvrages, l'armature est quand même présente dans ces tirants, pour une comparaison stricte de l'effet du joint versus un spécimen continu.

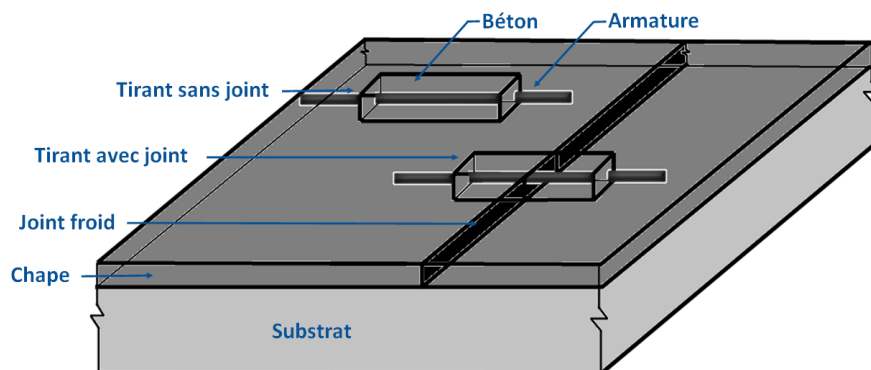


Figure 4.3 Zones de la chape mince simulées avec les tirants avec et sans joint

La largeur des tirants (120 mm) a été choisie en lien avec les dimensions de la cellule de perméabilité qui sera décrite à la section 4.1.5, alors que la longueur des tirants (350 mm) a été choisie de telle sorte à avoir une seule fissure sur les tirants sans joint.

4.1.2 Bétons à l'étude

Les BO et BFUP utilisés pour fabriquer les tirants sont les mêmes que ceux présentés à la section 3.1 du chapitre 3. Tel qu'indiqué dans cette section 3.1, les tirants avec joints ont été produits en deux étapes. La première portion des tirants (demi-longueur) utilisés dans le programme expérimental principal, qui sera présenté par la suite, a été produite avec le béton de la gâchée G1, alors que la deuxième portion des tirants a été produite avec le béton de la gâchée G2 (section 3.1.1). Les tirants sans joint ont, eux, été produits avec le béton de la gâchée G1. Les résultats aux états frais et durci obtenus des deux gâchées (G1 et G2), pour les deux types de béton, ont été présentés aux sections 3.1.23.1.3 (chapitre 3) respectivement.

4.1.3 Types de joints

Différentes configurations de joints froids ont été étudiées, soit un joint droit (pour BO et BFUP), un joint incliné à 45° et deux configurations de joints en escalier (pour BFUP seulement). Les formes et dimensions de ces joints ainsi que les coffrages utilisés pour produire les tirants avec ces joints, sont illustrées à la Figure 4.4. Les deux configurations de joints en escalier (Figure 4.4c et Figure 4.4d) se distinguent par la position de l'interface du joint qui est parallèle à l'armature, par rapport à la position de l'armature. Dans le cas de la configuration 1, cette interface se situe légèrement en-dessous de l'armature alors que, dans le cas de la configuration 2, elle est dans l'axe de l'armature. Bien que la configuration 2 soit la plus couramment utilisée dans les chapes minces en BFUP déjà réalisées, elle pourrait être plus propice à une délamination soudaine de l'interface du joint qui est parallèle à l'armature, dû au fait que cette zone plus faible est positionnée directement le long de la barre d'armature.

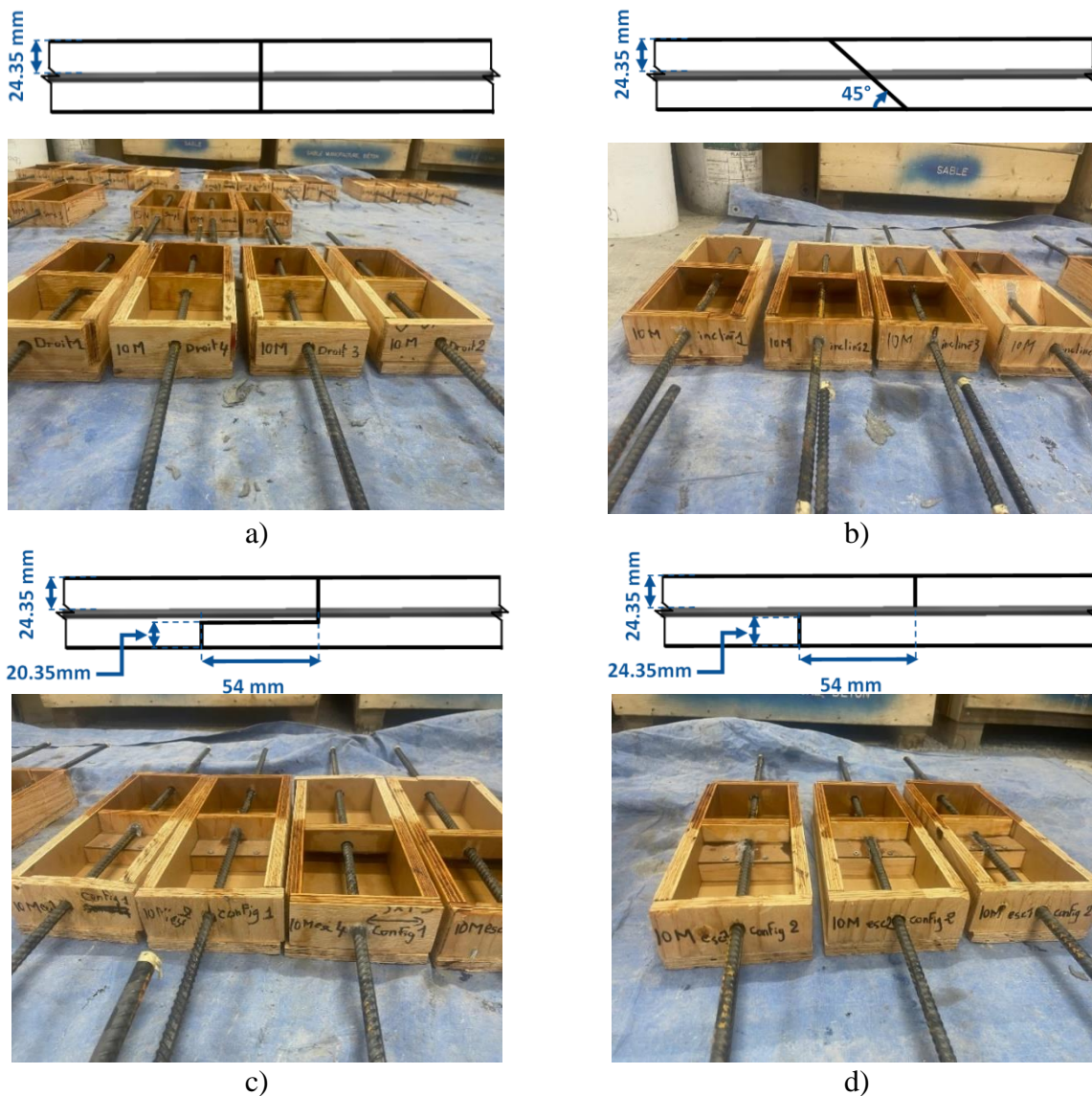


Figure 4.4 Types de joints froids, a) droit, b) incliné, c) escalier configuration 1, d) escalier configuration 2

4.1.4 Production des tirants

Alors que les tirants sans joint sont produits en une seule étape, qui consiste à remplir le tirant en favorisant un écoulement longitudinal d'un bout à l'autre du tirant pour une orientation préférentielle des fibres dans le BFUP, la production des tirants avec joint comprend plusieurs étapes. En premier lieu, un retardateur de prise est appliqué au pinceau sur les parois centrales du coffrage ayant la forme des joints. La demi-longueur du tirant en contact avec cette paroi est ensuite

coulée. Le lendemain, le joint est démoulé et un jet d'eau sous pression est appliqué sur la surface du joint, soit sur la couche de béton dont la prise a été retardée. La Figure 4.5 illustre l'état du joint avant (photos de gauche) et après (photos de droite) l'application du jet d'eau sous pression. Cette technique de préparation de surface à l'aide d'un retardateur de prise suivi plus tard de l'application d'un jet d'eau sous pression est la technique recommandée par le FHWA pour les chapes minces en BFUP (FHWA-HRT-22-065, 2022). Elle permet, dans le cas du BFUP, de fournir une bonne rugosité de surface et de dénuder les fibres en surface, afin que celles-ci puissent contribuer mécaniquement au comportement du joint. Dans le cas du BO, ce type de préparation de surface permet d'exposer les granulats pour atteindre la rugosité de surface requise environ CSP 6 pour assurer une adhérence adéquate avec le nouveau béton, tel que réalisé couramment pour les réparations classiques en BO. Une fois la surface du joint préparée avec la technique qui vient d'être décrite, elle est humidifiée, sans surplus d'eau, de telle sorte à obtenir une surface saturée superficiellement sèche (SSS). La deuxième portion est ensuite coulée. Que ce soit pour la production de la première ou la deuxième portion du tirant, le béton est mis en place avec une pelle à main en assurant un mouvement suivant l'axe longitudinal du tirant, de façon à obtenir un flux d'écoulement parallèle à l'armature. Cette technique de mise en place permet, dans le BFUP, d'orienter les fibres selon l'axe longitudinal des tirants.

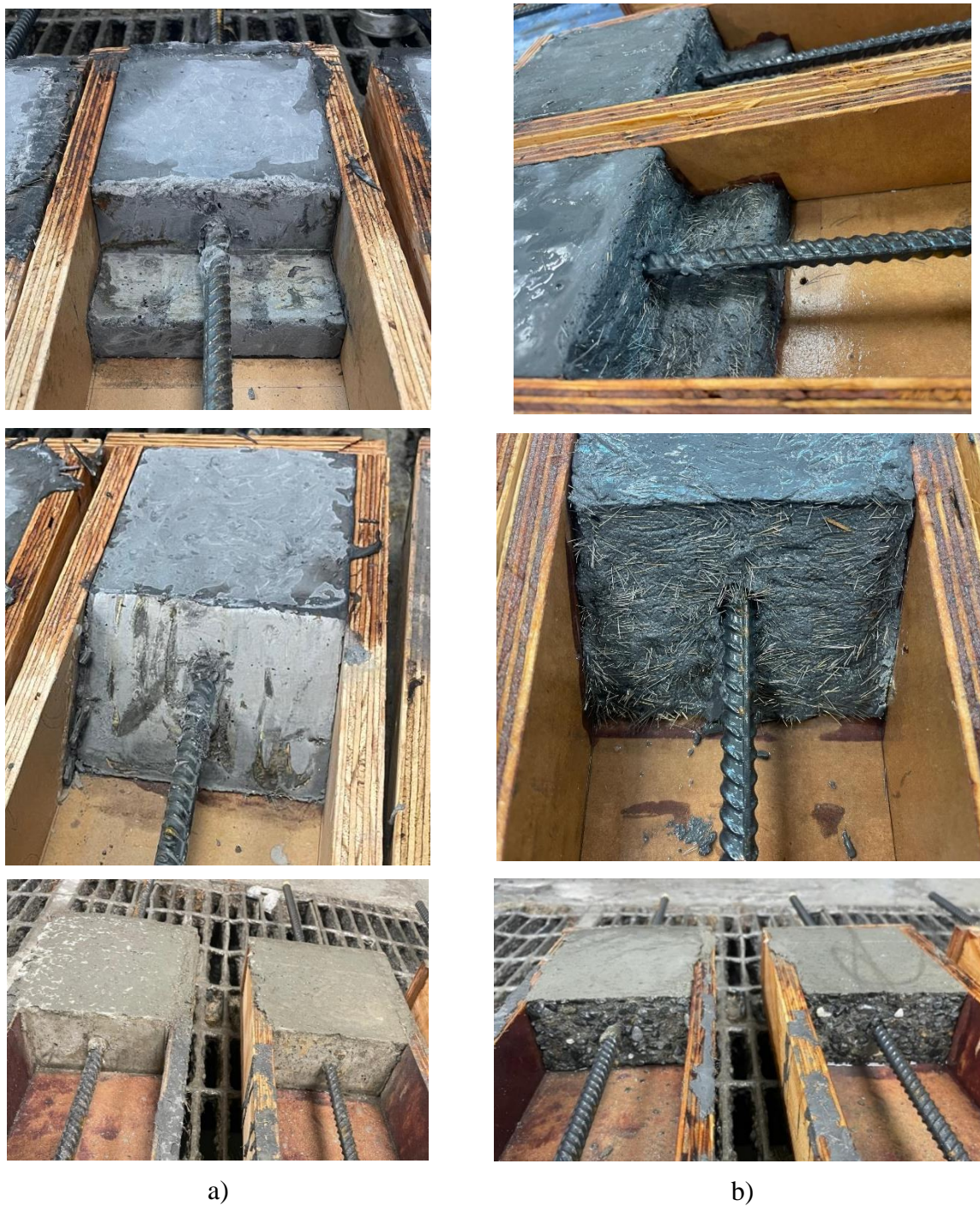


Figure 4.5 État de la surface du joint, a) après démoulage (photos de gauche), b) après le jet d'eau sous pression (photos de droite associées aux joints représentés à gauche)

4.1.5 Dispositif de perméabilité à l'eau

La perméabilité à l'eau peut être définie comme la capacité à laisser pénétrer l'eau sous l'effet d'un gradient de pression. La perméabilité est le phénomène de transport prédominant en présence d'une fissure dû à l'impact majeur de la fissure sur ce mode de transport, étant proportionnelle au cube de l'ouverture de fissure (loi de Poiseuille). La perméabilité à l'eau est également un indice de durabilité fréquemment utilisé pour caractériser le niveau d'étanchéité et, par suite, le niveau de durabilité d'un béton et/ou d'une structure.

Un dispositif de perméabilité permettant de mesurer la perméabilité unidirectionnelle d'un tirant sous chargement en traction avait déjà été développé à Polytechnique Montréal par Desmettre et Charron (Desmettre, 2011; Desmettre & Charron, 2012). Celui-ci a ensuite été utilisé à plusieurs reprises, et optimisé, pour différents projets de recherche (Escoffres, 2017; Hubert et al., 2015; Plagué et al., 2017; Prévost, 2019). Le principe de ce dispositif de perméabilité est schématisé à la Figure 4.6.

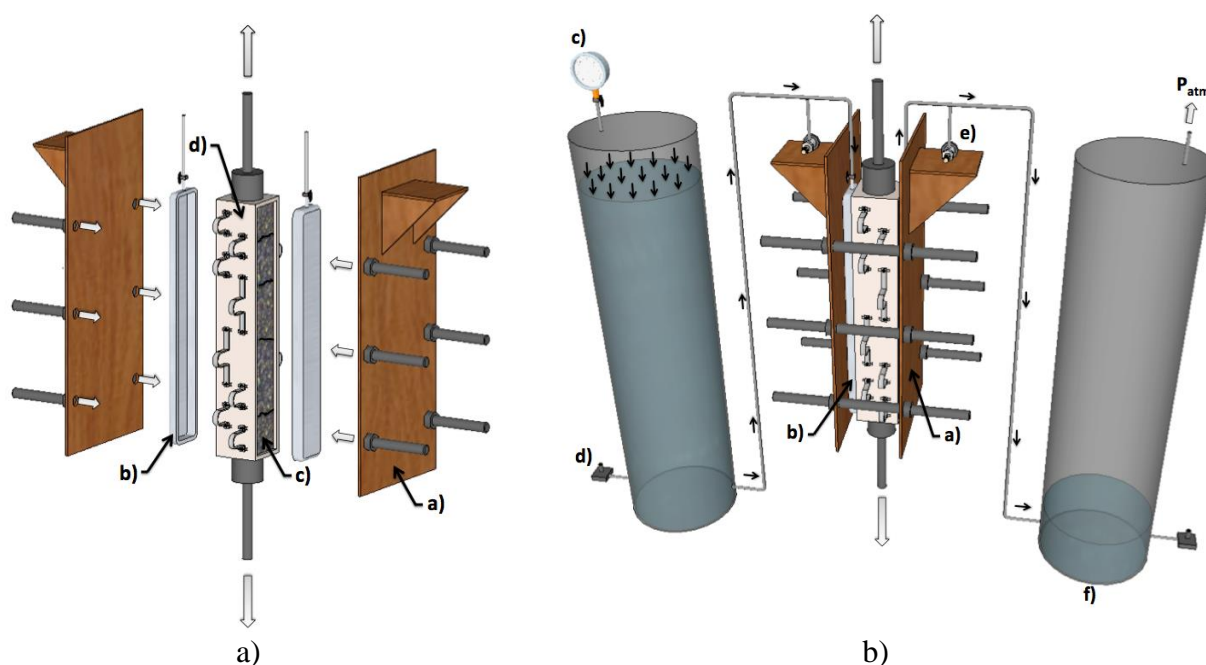


Figure 4.6 Dispositif de perméabilité : a) Cellule de perméabilité et b) Le système en entier
(Hubert et al., 2015)

Dans ce dispositif, deux faces opposées du tirant sont exposées à un écoulement d'eau unidirectionnel (Figure 4.6a). Les autres faces sont scellées à l'aide d'une membrane étanche. Des réservoirs en aluminium remplis d'eau sont positionnés et serrés sur les deux faces exposées du spécimen à l'aide d'un système de serrage, pour éviter toute fuite d'eau entre le spécimen et les réservoirs. L'ensemble spécimen, réservoirs en aluminium et système de serrage constitue la cellule de perméabilité représentée à la Figure 4.6a. Les réservoirs en aluminium sont ensuite reliés, via un système de tuyaux d'eau, à des cylindres (Figure 4.6b). L'ensemble du circuit entre le spécimen et les cylindres est saturé en eau avant le début de l'essai de perméabilité. Par la suite, l'eau contenue dans le cylindre d'entrée est mise sous pression, alors que le cylindre de sortie reste à pression atmosphérique. Cela crée un gradient de pression qui initie un écoulement d'eau unidirectionnel du cylindre d'entrée vers celui de sortie, en passant par le tirant. Des capteurs de pression installés à l'amont et l'aval du tirant (Figure 4.6b) permettent de mesurer le gradient de pression effectif au niveau du tirant, alors que des capteurs de hauteur différentielle installés à la base des cylindres d'entrée et de sortie (Figure 4.6b) permettent de mesurer l'évolution du volume d'eau dans les cylindres dans le temps et, par suite, le débit d'eau Q à l'entrée et à la sortie du tirant. Ce débit est ensuite utilisé pour calculer le coefficient de perméabilité K_w du tirant via l'équation de Darcy (Equation 4-1). Dans les projets antérieurs, le tirant avait une section transversale de $90 \times 90 \text{ mm}^2$ et une longueur de 610 mm, et le gradient de pression appliqué sur le tirant était de 50 kPa.

$$K_w = \frac{Q \times L}{A \times \Delta h} \quad \text{Equation 4-1}$$

Avec : K_w : Coefficient de perméabilité à l'eau (m/s)

Q : Débit d'eau (m^3/s)

L : Longueur traversée par le flux (m)

A : Aire de la surface exposée, normale à la direction du flux (m^2)

Δh : Hauteur d'eau différentielle entre l'entrée et la sortie du spécimen

Le dispositif de perméabilité décrit ci-dessus a été adapté dans ce projet pour répondre aux besoins spécifiques de cette étude. Tout d'abord, le tirant utilisé étant plus petit que celui utilisé dans les projets antérieurs, la cellule de perméabilité (spécimen avec scellement + réservoirs en aluminium + système de serrage) a dû être ajustée. Des réservoirs plus petits, de surface intérieure $96 \times 96 \text{ mm}^2$, qui avaient été utilisés dans un autre projet de perméabilité sur spécimens de flexion (Lauch, 2021) et qui étaient encore disponibles au laboratoire de Polytechnique, ont été utilisés. La dimension de la zone exposée à l'écoulement d'eau, et donc le scellement des tirants, a été adaptés à cette nouvelle dimension des réservoirs. Un nouveau système de serrage a également dû être fabriqué pour fixer ces nouveaux réservoirs sur le tirant. La Figure 4.7a présente une vue éclatée de la cellule de perméabilité utilisée dans ce projet alors que la Figure 4.7b en montre une photo. Les réservoirs sont positionnés au centre, dans le sens longitudinal du spécimen, qui correspond à la zone du joint, pour les tirants avec joint, ou à la zone où la fissure est attendue pour les tirants sans joint.

En plus de l'ajustement de la cellule de perméabilité, la technique de mise en place du scellement sur le tirant a également été revue pour optimiser le temps d'installation et la quantité de scellant à utiliser, et le gradient de pression appliqué sur le tirant durant l'essai de perméabilité a été légèrement réduit par rapport aux projets antérieurs. Ce gradient a été fixé à 30 kPa afin d'avoir une bonne qualité de la mesure de perméabilité tout en minimisant le risque d'une quelconque influence de la pression appliquée sur l'initiation de l'ouverture du joint.

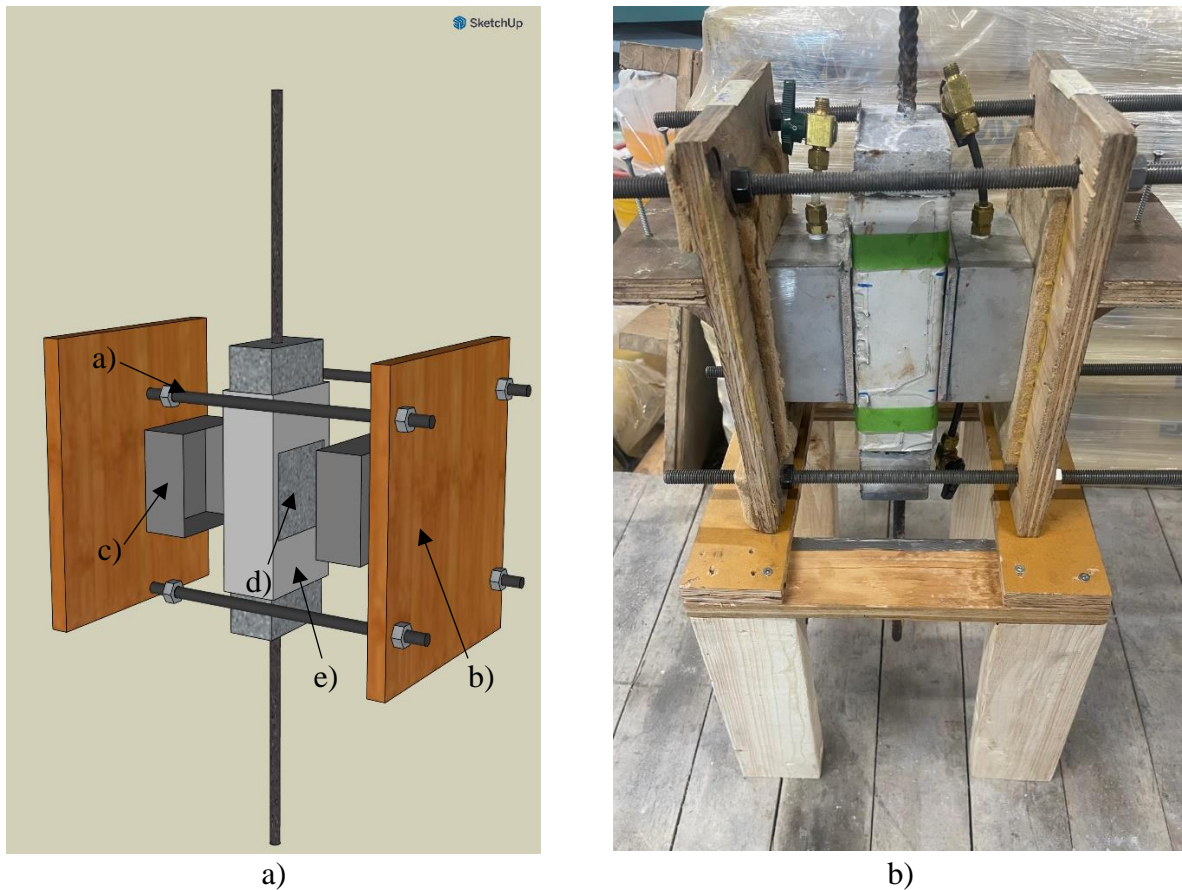


Figure 4.7 Cellule de perméabilité : a) Vue éclatée : a) Tiges filetées , b) Système de serrage, c) Réservoir d'eau en aluminium, d) Béton exposé, e) Membrane étanche et b) Photo de la cellule de perméabilité

Note importante : Dans le contexte où l'essai de perméabilité à l'eau est réalisé sur un tirant simultanément sollicité en traction, le temps de mesure de la perméabilité pour un état du tirant (quelques min/kN) est très court en comparaison à une mesure de perméabilité sur un spécimen sans chargement qui se prolonge pendant quelques heures voire quelques jours. En conséquence, il est difficile de déterminer avec précision une perméabilité inférieure à un coefficient $K_w = 5 \times 10^{-10}$ m/s qui correspond approximativement à la perméabilité de la matrice d'un béton ordinaire. Ainsi, ce projet se focalisera principalement sur l'augmentation de la perméabilité lors de la création d'une fissure ou l'ouverture d'un joint.

4.1.6 Dispositif de chargement en traction

Les tirants sont sollicités en traction uniaxiale à l'aide d'une presse hydraulique universelle d'une capacité de 2.5 MN. Les extrémités du tirant, soit les deux extrémités de la barre d'armature M10, sont serrées dans les mâchoires de la presse (Figure 4.8), en s'assurant de bien aligner l'axe central longitudinal du tirant avec l'axe de chargement, de telle sorte à éviter les efforts de flexion non désirables. Le chargement en traction est contrôlé par le déplacement progressif du vérin de la presse, à une vitesse de 0.03 mm/min. Cette vitesse a été choisie de telle sorte à permettre une mesure fiable de la mesure de perméabilité lors des essais simultanées de perméabilité et de traction.

Deux capteurs de déplacement (LVDT - Linear Variable Differential Transformer) sont fixés sur les faces de 60 mm de largeur, non exposées à l'écoulement d'eau, sur une longueur de 190 mm, afin de mesurer le déplacement vertical au niveau du centre du spécimen (Figure 4.8). Dès qu'une fissure (pour les tirants sans joint) ou ouverture de joint (pour les tirants avec joint) a lieu, le déplacement additionnel des LVDT représente l'ouverture de la fissure ou du joint respectivement. Afin que le déplacement mesuré ne soit pas faussé par une déformation du scellement, le scellement est retiré à l'endroit où sont fixés les points d'ancrage des LVDTs afin que ces derniers soient fixés directement sur le béton à l'aide d'une colle.

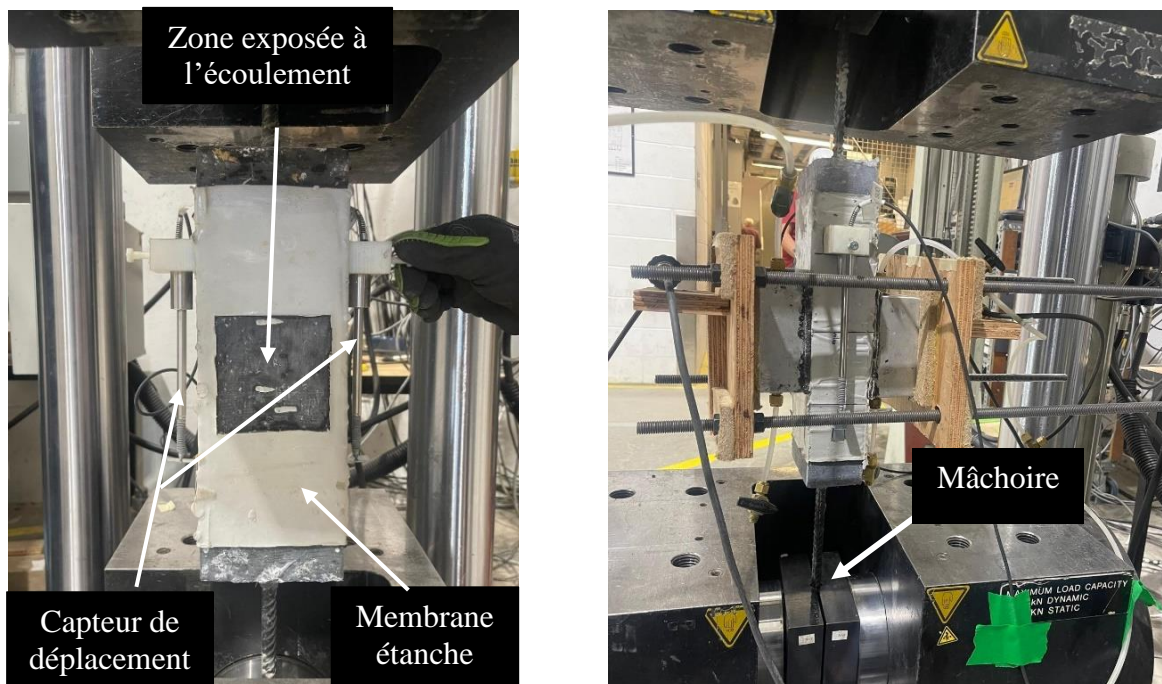


Figure 4.8 Tirant positionné dans la presse a) sans la cellule de perméabilité, b) avec la cellule de perméabilité

4.2 Programmes expérimentaux

4.2.1 Programme préliminaire

Suite aux modifications du dispositif de perméabilité décrites à la section 4.1.5, un programme expérimental préliminaire a été réalisé afin de valider ces modifications, se familiariser avec la procédure d'essai et avoir un premier aperçu de l'impact de certains joints sur le comportement des tirants en BFUP. Les joints étudiés, ainsi que le nombre de spécimens, sont résumés au Tableau 4.1. La composition du BFUP utilisé pour ce programme préliminaire est la même que celle indiquée à la section 3.1.1.

Tableau 4.1 Tirants en BFUP testés lors du programme préliminaire

Type du joint	Nombre de spécimens
Droit	2
Escalier config. 1	1

4.2.2 Programme principal

Le programme expérimental principal a ensuite été mené. Il a pour objectif de déterminer le comportement en traction et la perméabilité à l'eau de tirants en béton armé en BO et BFUP avec des joints froids de différentes configurations, pour évaluer leur efficacité dans un contexte de chape mince.

Le programme est composé de 7 conditions d'essais résumées au Tableau 4.2. Il comprend des tirants en BFUP et en BO sans joint servant de référence, ainsi que des tirants avec quatre configurations différentes de joints pour le BFUP et avec une seule configuration de joint pour le BO. Trois tirants ont été testés par condition, de manière à évaluer la variabilité des résultats au sein d'une même condition d'essai. Parmi les trois, un a été testé en traction seulement tandis que les deux autres, ont fait l'objet d'une mesure de perméabilité réalisée simultanément à leur chargement.

Tableau 4.2 Tirants en BFUP et BO testés lors du programme principal

Type du joint	BFUP	BO
Sans joint	2	2
Droit	3	3
Escalier config. 1	3	
Escalier config. 2	3	
Incliné	3	

4.3 Résultats du programme expérimental préliminaire

4.3.1 Comportement en traction des tirants

La Figure 4.9 présente l'évolution de la force en fonction de l'allongement des tirants mesuré par les LVDT installés sur deux côtés opposés des tirants. Les comportements des deux tirants en BFUP avec joint droit sont représentés à la Figure 4.9a alors que le comportement du tirant en BFUP avec le joint en escalier (configuration 1) est représenté à la Figure 4.9b.

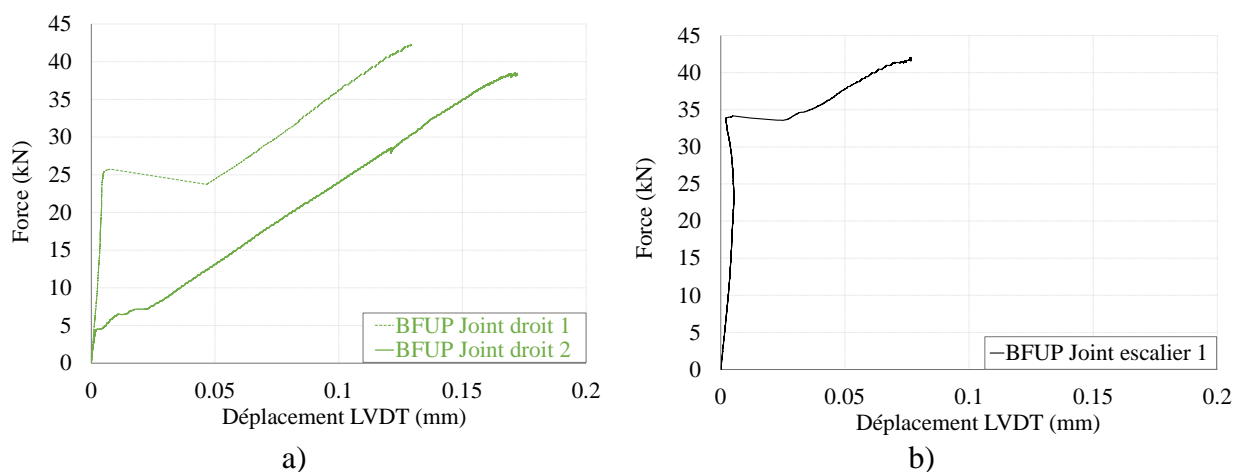


Figure 4.9 Comportement force-déplacement en traction des tirants en BFUP avec a) joint droit et b) joint escalier configuration 1

La charge appliquée augmente linéairement avec le déplacement jusqu'à l'initiation de l'ouverture du joint, qui cause un changement de rigidité important. Ensuite, la charge augmente à nouveau avec le déplacement jusqu'à la plastification de l'armature qui a lieu vers 40 kN. L'essai a été arrêté dès le début de la plastification. Aucune fissuration n'est notée dans le tirant mis à part l'ouverture du joint. Le joint contrôle donc le comportement mécanique observé.

Une variation notable de l'initiation de l'ouverture des joints est observée pour la résistance des joints droits (Figure 4.9a). Le joint droit du tirant 3 en BFUP commence à s'ouvrir progressivement dès 5 kN, alors que celui du tirant 2 résiste jusqu'à environ 25 kN avant de s'ouvrir plus soudainement et retrouver une rigidité post ouverture du joint similaire à celle du tirant 3.

L'allongement des deux tirants avec joint droit, au moment de la plastification de l'armature, est en moyenne de 0.15 mm. Cet allongement vient principalement de l'ouverture du joint.

Pour le tirant en BFUP avec joint en escalier configuration 1 (Figure 4.9b), l'initiation de l'ouverture du joint apparaît autour de 35 kN. Ensuite, la rigidité du tirant diminue et son allongement final (à la plastification de l'armature) atteint 0.08 mm. La force requise pour l'initiation de l'ouverture du joint escalier est plus élevée et l'allongement final plus faible que pour les tirants avec le joint droit. Ceci suggère que la géométrie du joint escalier, avec interface beaucoup plus grande (Figure 4.4c), permet un transfert des efforts nettement supérieur avant et après l'ouverture du joint.

4.3.2 Perméabilité à l'eau des tirants

Alors que les tirants joint droit 2 et escalier 2 présentés à la Figure 4.9 ont été seulement testés en traction, la perméabilité du tirant joint droit 3 a été mesurée simultanément à sa sollicitation en traction, selon la procédure décrite à la section 4.1.5. La Figure 4.10 présente le comportement force-coefficient de perméabilité de ce tirant. Initialement, la perméabilité est nulle, signe d'une bonne adhérence au niveau du joint. Alors que l'ouverture du joint s'initie vers 5 kN pour ce tirant à la Figure 4.9a (changement de rigidité), la perméabilité commence seulement à augmenter vers 8-10 kN, au niveau du deuxième changement de rigidité de la Figure 4.9a. Ceci indique qu'un changement de rigidité dans le comportement mécanique n'est pas nécessairement signe d'une perte d'étanchéité du joint. Le changement de rigidité peut être lié à une perte d'adhérence localisée dans le joint alors qu'une perte d'adhérence sur la pleine largeur du joint est requise pour que l'eau puisse traverser le spécimen et qu'il y ait donc perte d'étanchéité du joint. Après 8-10 kN, le joint a perdu son étanchéité et la perméabilité à l'eau augmente graduellement jusqu'à atteindre une perméabilité finale de 9×10^{-8} m/s.

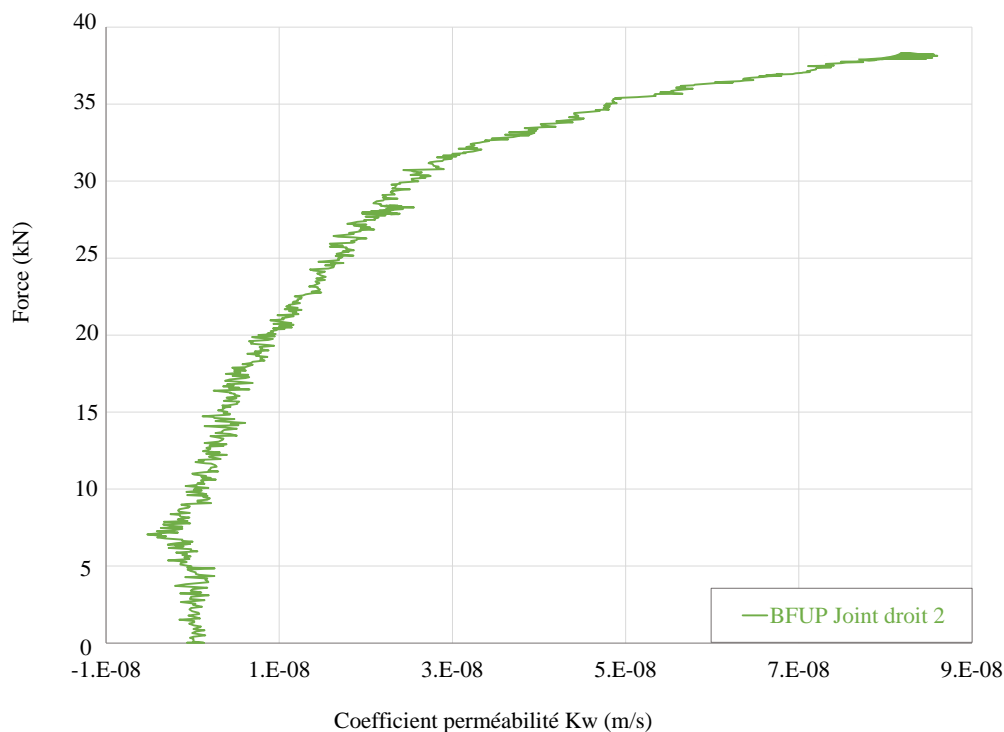


Figure 4.10 Courbes force-perméabilité d'un tirant en BFUP avec joint droit

4.3.3 Analyse et conclusions

Le programme expérimental préliminaire a permis de valider le bon fonctionnement de la procédure expérimentale présentée à la section 4.1, en particulier la méthode de production des joints, la vitesse de chargement et la configuration des LVDTs pour les essais de traction, ainsi que les ajustements apportés à la méthode de scellement des tirants, à la cellule de perméabilité et au gradient de pression, pour ce qui est des essais de perméabilité.

Le programme préliminaire a également mis en évidence quelques tendances concernant la résistance mécanique et la perméabilité des joints de béton sous charge de traction. Les résultats obtenus suggèrent que la géométrie du joint a un impact direct sur la résistance mécanique des tirants en BFUP. Les tirants avec joint droit présentent un risque accru d'ouverture précoce du joint avec une interface de joint limitée ($7\,200\text{ mm}^2$). Ceci limite la résistance d'initiation d'endommagement dans le joint et favorise son ouverture par la suite. Il a également été noté que

la force relative à l'initiation de l'ouverture du joint des tirants peut varier de manière importante. Cette variation peut être attribuée à plusieurs facteurs :

- Qualité d'interface du joint : Une variation de la rugosité de l'interface du joint obtenue suite à l'application du retardateur de prise et l'application du jet d'eau sous pression peut influencer la transmission des efforts au joint et impacter l'initiation de l'ouverture du joint.
- Humification de l'interface: Une variation entre les conditions d'humidité de l'interface du joint avant la mise en place de la deuxième couche de béton dans le tirant peut affecter la résistance du joint.
- Application de la cure et retrait du béton : Une variation de la qualité ou de la durée de la cure appliquée aux spécimens peuvent initier le retrait du béton plus rapidement. Un retrait restreint précoce au joint du tirant peut alors réduire la résistance de ce dernier.

En ce qui concerne la perméabilité à l'eau du tirant en BFUP, elle dépend fortement de l'ouverture du joint. Lorsque le joint du tirant n'est pas endommagé, le BFUP agit comme une barrière imperméable. L'initiation de l'endommagement dans le joint en BFUP, bien que résultant en une perte de rigidité dans le comportement mécanique, n'implique pas nécessairement une perte d'étanchéité instantanée, si le joint n'est pas ouvert sur sa pleine profondeur et/ou si l'ouverture du joint reste en deçà d'une certaine ouverture. Par la suite, même lorsque le joint est ouvert, la présence de fibres à l'interface du joint (Figure 4.5b) joue un rôle déterminant dans le contrôle de l'ouverture du joint et la limitation de la perméabilité. Il est donc important que la surface avec retardateur de prise soit bien préparée et qu'une attention particulière soit portée aux différents facteurs d'influence de la qualité du joint énumérés ci-dessus.

4.4 Résultats du programme expérimental principal

Cette section présente les résultats obtenus lors de la réalisation du programme expérimental principal décrit à la section 4.2.2. Le comportement mécanique en traction des tirants étudiés durant ce programme d'essais sera en premier lieu décrit aux sections 4.4.1 à 4.4.3. Leur comportement en perméabilité sera ensuite présenté aux sections 4.4.4 à 4.4.6, avant de résumer et discuter l'ensemble de ces résultats à la section 4.4.7.

4.4.1 Méthode d'analyse du comportement en traction des tirants

L'analyse du comportement en traction des tirants en BFUP et BO consiste à analyser leurs courbes force-déplacement. Étant donné que l'ensemble des tirants présentent la même capacité ultime relative à la plastification de l'armature M10, l'accent sera mis sur les différences de rigidité entre les tirants. La rigidité sera évaluée à différentes phases du chargement :

- Phase élastique (0-5 kN) : Elle correspond au domaine linéaire de la courbe force-déplacement, où le tirant se comporte de manière élastique.
- Phase en service (15-20 kN) : Cette phase représente l'état de chargement en service de la chape sous exploitation courante du trafic routier. À ce stade, l'ouverture des joints peut s'initier et influencer la rigidité des tirants.
- Phase ultime (35-40 kN) : Cette phase de chargement survient à l'approche de la plastification de l'armature.

4.4.2 Comportement en traction des tirants sans joint

La Figure 4.11 illustre le comportement force versus déplacement des tirants en BO et BFUP sans joint, jusqu'à la plastification de l'armature. Le Tableau 4.3 résume, quant à lui, la rigidité des tirants lors des trois phases expliquées à la section précédente.

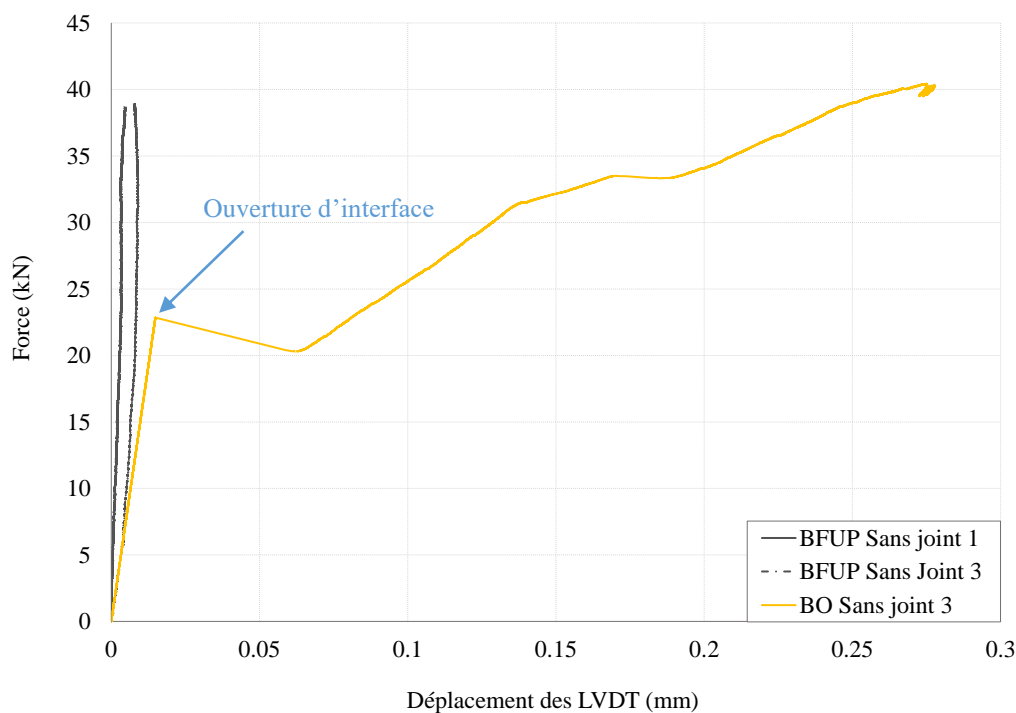


Figure 4.11 Comportement en traction des tirants en BO et BFUP sans joint

Tableau 4.3 Rigidités élastique, en service et ultime des tirants sans joint (en kN/mm)

	R_{élastique} (0-5 kN)	R_{service} (15-20 kN)	R_{ultime} (35-40 kN)
BFUP Sans Joint 1	6393	4995	2543
BFUP Sans Joint 3	1553	2908	4021
Moyenne BFUP sans joint	3973	3951	3282
BO Sans Joint	1537	1537	100

Les tirants en BFUP montrent un comportement presque linéaire élastique jusqu'à la plastification de l'armature vers 40 kN (Figure 4.11). Aucune fissuration localisée n'a été observée dans ces tirants. Le tirant en BO montre, lui, un comportement linéaire élastique jusqu'à l'initiation d'une fissure à 23 kN, qui s'ouvre soudainement à une ouverture approximative de 0.05 mm. Le tirant en BO présente ensuite un comportement non-linéaire avec la progression de l'ouverture de fissure

jusqu'à un déplacement de 0.28 mm où la plastification de l'armature survient. Une seule macrofissure localisée a été observée dans le tirant en BO.

Le Tableau 4.3 montre que les rigidités élastiques et de service des tirants en BFUP sont en moyenne presque trois fois plus grandes que celles du BO, avec des valeurs respectives de 3973 kN/mm et 3951 kN/mm pour le BFUP et de 1537 kN/mm pour le BO. Le BFUP conserve une rigidité élevée en phase ultime avec une rigidité moyenne de 3282 kN/mm contre 100 kN/mm pour le BO, soit une rigidité 30 fois plus grande. La grande résistance en traction et le contrôle de la microfissuration du BFUP, de même que son module élastique élevé ont permis de maintenir une rigidité très élevée tout au long du chargement du tirant en BFUP, nettement supérieure à celle du tirant en BO. La rigidité du tirant en BO est fortement réduite dès l'apparition de la première fissure et continue à diminuer avec l'ouverture de la fissure et l'endommagement probable de l'interface béton-armature. Les tirants en BFUP présentent une perte de rigidité limitée entre la phase élastique et ultime, soit environ 17% de diminution. En comparaison, le tirant en BO présente une perte de rigidité entre la phase élastique et ultime de 93%.

4.4.3 Comportement en traction des tirants avec joint

Cette section s'intéresse en premier lieu au comportement mécanique des tirants en BFUP et en BO avec joint droit avant de s'intéresser au comportement des tirants en BFUP avec les différentes configurations de joint par la suite.

La Figure 4.12 illustre le comportement force-déplacement des tirants en BO et BFUP avec joint droit alors que le Tableau 4.4 récapitule leurs rigidités dans les phases élastique, de service et ultime définies à la section 4.4.1.

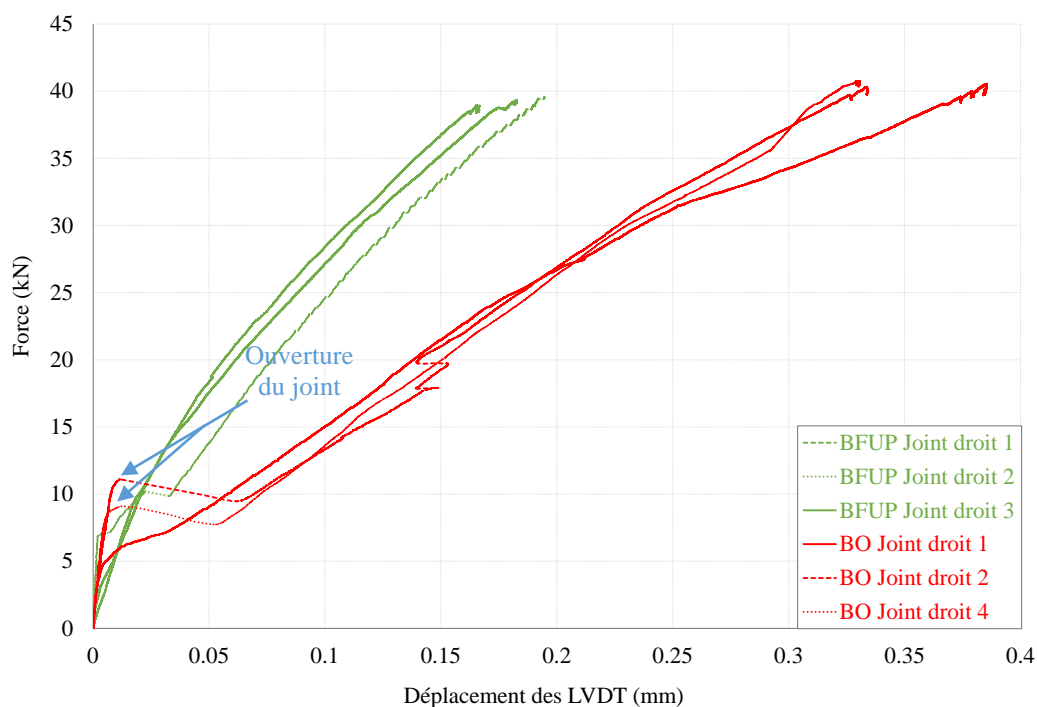


Figure 4.12 Comportement en traction des tirants en BO et BFUP avec joint droit

Tableau 4.4 Rigidités élastique, en service et ultime des tirants en BO et BFUP avec joint droit
(en kN/mm)

	R_{élastique} (0-5 kN)	R_{service} (15-20 kN)	R_{ultime} (35-40 kN)
BFUP Joint droit 1	526	257	132
BFUP Joint droit 2	3207	230	133
BFUP Joint droit 3	526	217	150
Moyenne BFUP Joint droit	1420	234	138
BO Joint droit 1	992	132	70
BO Joint droit 2	1414	130	88
BO Joint droit 4	2134	118	124
Moyenne BO Joint droit	1513	127	94

Les courbes des tirants en BFUP montrent un comportement d'ensemble plus rigide, avec un déplacement total d'environ 0.18 mm lors de la plastification de l'armature, soit deux fois plus faible que le déplacement final des tirants en BO. Il est cependant intéressant de remarquer que

l'initiation de l'ouverture du joint dans les tirants en BFUP, visible via un changement de rigidité, s'amorce à une force plus faible. La meilleure rigidité globale des tirants en BFUP malgré l'amorce d'endommagement précoce du joint indique que l'interface du tirant en BFUP avec joint droit s'ouvre nettement moins que celle en BO, grâce à la présence de fibres et à l'adhérence très élevée du BFUP sur une interface rugueuse. Une fois déchargé, il était d'ailleurs difficile d'observer l'ouverture du joint dans le tirant en BFUP dû à sa faible ouverture. Seule une humidification du tirant a permis de visualiser qu'il y avait bien un endommagement au niveau du joint (Figure 4.13), validant qu'il s'agit bien de la zone de plus faible résistance qui initie l'endommagement et la perte de rigidité observée dans les courbes de traction. Les tirants en BO avec joint droit montrent, eux, une ouverture de l'interface soudaine allant jusqu'à 0.05 mm, et qui continue de s'ouvrir ensuite beaucoup plus rapidement que pour les tirants en BFUP avec un déplacement final moyen d'environ 0.35 mm.



Figure 4.13 Visualisation du joint du tirant en BFUP joint droit2 (après essai et après humidification du tirant)

La présence d'un joint droit influence de manière significative la réponse mécanique des tirants (Tableau 4.4). La rigidité élastique des tirants en BFUP avec joint droit devient similaire à celle des tirants en BO (1420 kN/mm vs 1513 kN/mm). Cependant, les tendances changent radicalement en phase de service avec une rigidité moyenne des tirants en BFUP (234 kN/mm) qui fait presque le double de celle des tirants en BO (127 kN/mm). En phase ultime, les rigidités moyennes continuent de diminuer pour les deux types de tirants, tel qu'attendu, mais elles demeurent toujours nettement supérieures pour les tirants en BFUP (138 kN/mm vs 94 kN/mm pour le BO).

Il importe de noter que l'initiation de l'ouverture des joints droits dans les tirants en BFUP du programme principal s'est produite à des niveaux de force faibles (inférieurs à 7 kN), alors que le programme préliminaire avait montré parfois une force d'initiation d'ouverture plus élevée (5 kN à 25 kN). Il semble donc que les conditions de préparation de surface ou de cure aient mené à des joints de résistance inférieure dans le programme principal. Cet aspect sera discuté ultérieurement à la section 4.4.7. Malgré l'initiation hâtive de l'ouverture des joints droits en BFUP, l'ouverture reste très fine et possiblement partielle, limitant l'infiltration d'eau au travers du joint tel que cela sera démontré via les mesures de perméabilité à la section 4.4.6.

La Figure 4.14 présente maintenant le comportement force-déplacement des tirants en BFUP avec différentes configurations de joint vis-à-vis de ceux en BO avec joint droit. Le Tableau 4.5 résume, quant à lui, leurs rigidités selon les phases élastique, de service et ultime.

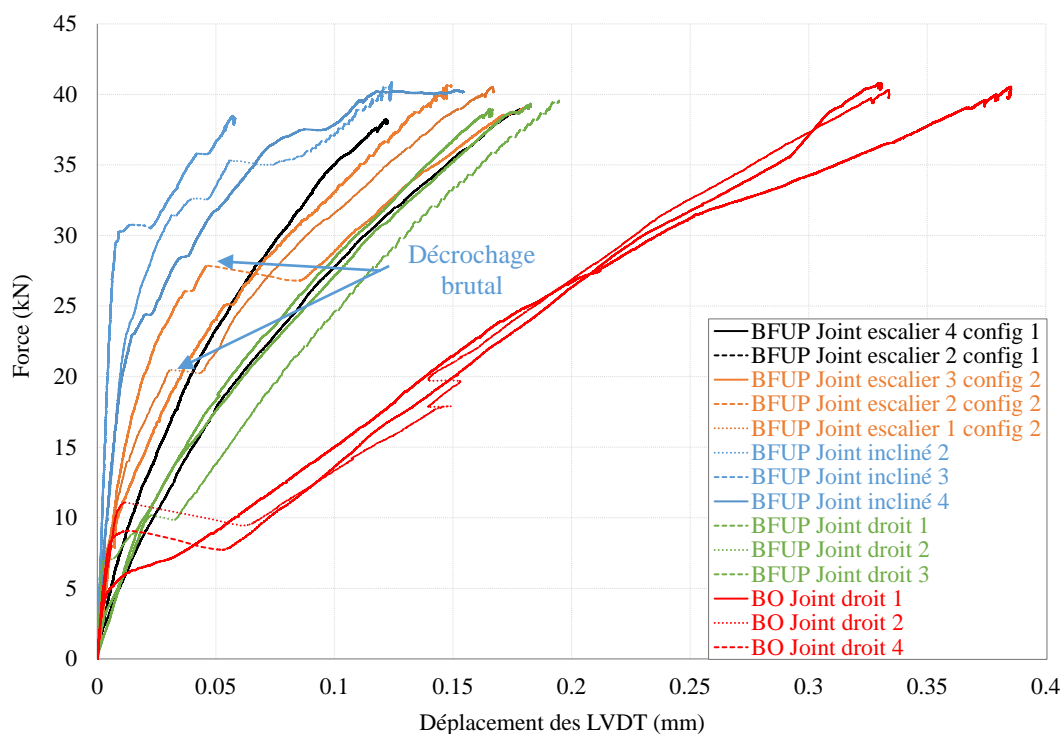


Figure 4.14 Courbes de traction des tirants du BFUP avec différentes configurations de joints

Tableau 4.5 Rigidités élastiques, en service et ultime des tirants avec différentes configurations de joints (en kN/mm)

	R_{élastique} (0-5 kN)	R_{service} (15-20 kN)	R_{ultime} (35-40 kN)
BFUP Joint incliné 2	3844	1830	123
BFUP Joint incliné 3	4790	4416	175
BFUP Joint incliné 4	2836	1448	168
Moyenne BFUP Joint incliné	3823	2565	155
BFUP Joint escalier 1 config. 2	4229	347	117
BFUP Joint escalier 2 config. 2	1411	635	126
BFUP Joint escalier 3 config. 2	4093	352	141
Moyenne BFUP Joint escalier config. 2	3244	445	128
BFUP Joint escalier 2 config. 1	479	260	122
BFUP Joint escalier 4 config. 1	815	334	123
Moyenne BFUP Joint escalier config. 1	647	297	123
BFUP Joint droit 1	526	257	131
BFUP Joint droit 2	3207	230	133
BFUP Joint droit 3	526	216	149
Moyenne BFUP Joint droit	1420	234	138
BO Joint droit 1	992	132	70
BO Joint droit 2	1414	130	88
BO Joint droit 4	2134	118	124
Moyenne BO Joint droit	1513	126	94

La Figure 4.14 démontre clairement que la modification de la configuration des joints influence le comportement mécanique d'ensemble des tirants. Tout d'abord, le déplacement final des tirants en BFUP avec différentes configurations de joint varie entre 0.06 et 0.19 mm, alors qu'il atteint 0.33 à 0.38 mm pour les tirants en BO avec joint droit.

Ensuite, les courbes force-déplacement des tirants en BFUP avec joint incliné montrent une rigidité très élevée, en condition élastique et de service (3823 kN/mm et 2565 kN/mm respectivement, Tableau 4.5), et une initiation tardive de l'ouverture du joint qui survient entre 20 et 30 kN, ce qui est significativement supérieur aux autres configurations (Figure 4.14). Ce type de joint possède une surface de contact de 10 200 mm² (Figure 4.4c), il assure ainsi une meilleure transmission des charges entre les deux parties du tirant, limitant l'initiation et l'ouverture du joint.

Les joints en escalier configuration 2 ont une surface de contact de 13 680 mm², soit une surface supérieure à celle du joint incliné. Dans cette configuration, l'interface du joint qui est parallèle à l'armature est en contact direct avec l'armature (Figure 4.4d). Il s'agit du type de joint utilisé

habituellement dans les chapes en BFUP. Le comportement en traction des tirants avec joint en escalier configuration 2 présente un compromis intéressant. La rigidité est très élevée en condition élastique (3244 kN/mm, similaire à celle du joint incliné) et modérée en condition de service (83 % moindre que celle du joint incliné) (Tableau 4.5). Toutefois, une ouverture soudaine du joint est observée entre 20 kN et 27 kN avec un déplacement atteignant 0.05 mm (Figure 4.14). Une grande partie de l'interface du joint est parallèle et au niveau de l'armature. Lorsque la fissuration s'initie à l'interface parallèle à l'armature, elle n'arrive plus à transmettre efficacement les efforts, entraînant une délamination rapide. La présence de l'armature directement à l'interface ne semble pas optimale.

Les tirants en BFUP avec joint en escalier configuration 1 ont de leur côté la même surface de contact de 13 680 mm². Cependant, la partie de l'interface parallèle à l'armature n'est pas dans l'axe de cette dernière (Figure 4.4c). Ces tirants en BFUP avec joint en escalier configuration 1 ont une rigidité plus modérée en service (88 % moindre que celle du joint incliné), mais l'amorce de la fissuration à l'interface et son ouverture sont plus progressives, avec moins de sauts soudains sur les courbes force-déplacement (Figure 4.14). Il est intéressant de noter, qu'à partir de 27 kN, les tirants avec les 2 types de joints escaliers montrent un comportement similaire jusqu'à la plastification de l'armature. À noter également que les tirants en BFUP avec joint en escalier configuration 1 démontrent des rigidités en service et à l'ultime assez similaires à ceux des tirants en BFUP avec joint droit. Le joint escalier configuration 1 ne semble donc pas apporter de gain significatif sur le plan mécanique, en comparaison à un joint droit, plus simple à mettre en œuvre. Les résultats de perméabilité qui seront présentés à la section 4.4.6 mettront cependant de l'avant un gain de cette géométrie sur le plan de la durabilité.

En résumé, les tirants en BFUP avec joint incliné offrent la meilleure rigidité élastique (3823 kN/mm) suivis de ceux avec joint en escalier configuration 2 (3244 kN/mm). En service, les tirants avec joint incliné demeurent plus rigides en comparaison aux autres configurations de joints. Finalement, à l'ultime, la rigidité des tirants en BFUP avec différentes configurations de joint est sensiblement la même. Quelle que soit la configuration de joint, les tirants en BFUP restent globalement nettement plus rigides que les tirants en BO joint droit, avec une rigidité plus de 1.8 fois supérieure en condition de service et une ouverture finale moyenne du joint de 2 à 3.5 fois inférieure.

4.4.4 Méthode d'analyse de la perméabilité à l'eau des tirants

La perméabilité des tirants a été mesurée simultanément à leur chargement en traction décrit précédemment. L'analyse de la perméabilité à l'eau des tirants en BFUP et BO consiste à analyser leurs courbes force - coefficient de perméabilité. En plus de l'analyse de la tendance globale des courbes, 3 critères spécifiques seront présentés dans des tableaux et discutés :

- Force de perte d'étanchéité : Elle correspond à la force à laquelle la perméabilité à l'eau augmente significativement, indiquant une fissure traversante (dans le cas du tirant sans joint) ou une ouverture à l'interface du joint suffisante pour induire un flux d'eau continu (dans le cas des tirants avec joint). Une ouverture partielle, ou vraiment très fine, de fissure ou à l'interface d'un joint ne fait pas perdre l'étanchéité du tirant.
- Perméabilité en service (15-20 kN) : La perméabilité à l'eau en condition élastique des tirants reste très faible et inférieure à la limite de détection du système de perméabilité, qui est d'environ 5×10^{-10} m/s (section 4.1.5). La perméabilité sera alors évaluée pour des forces comprises entre 15-20 kN, représentatif des conditions de service de la chape.
- Perméabilité à l'ultime (35-40 kN) : Il s'agit de la perméabilité à l'eau finale mesurée lorsque les tirants atteignent la plastification de l'armature.

4.4.5 Perméabilité à l'eau sous chargement des tirants sans joint

La Figure 4.15 présente le comportement force versus coefficient de perméabilité à l'eau des tirants en BFUP et en BO sans joint, jusqu'à la plastification de l'armature. Le Tableau 4.6 résume, quant à lui, les forces de perte d'étanchéité associées, ainsi que les coefficients de perméabilité en phases de service et ultime.

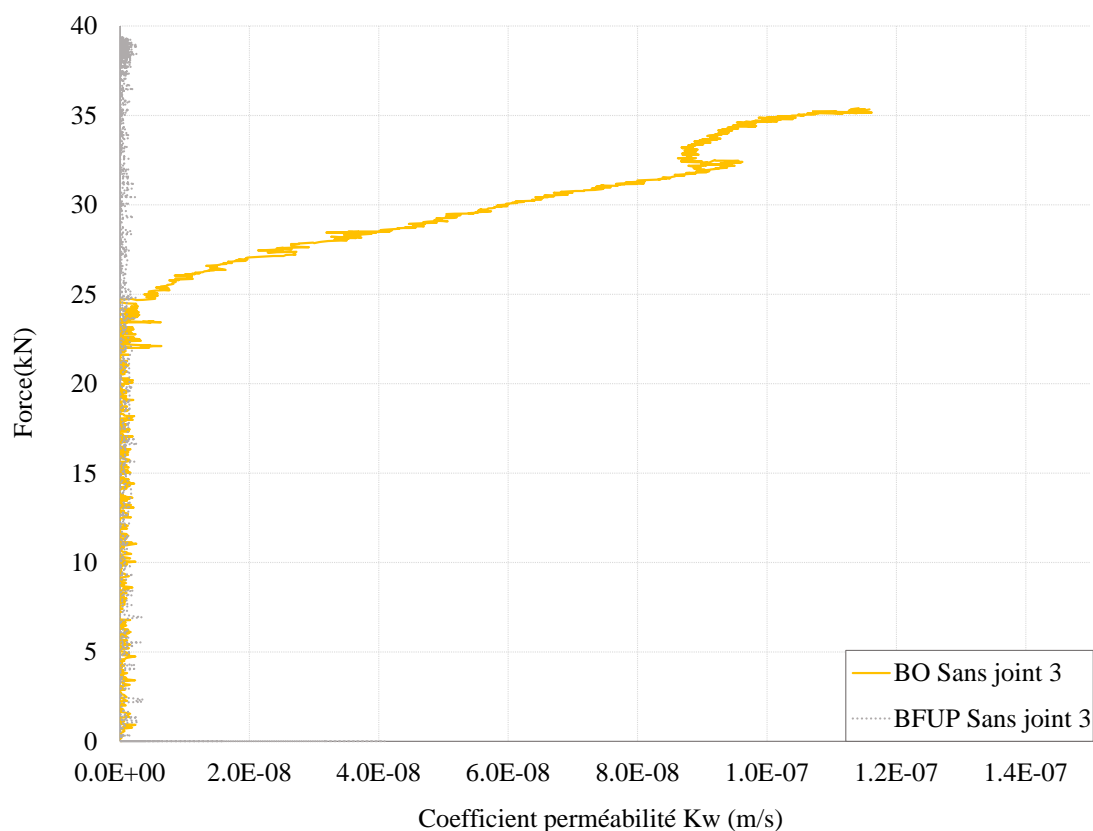


Figure 4.15 Perméabilité à l'eau des tirants en BFUP et BO sans joint

Tableau 4.6 Forces de perte d'étanchéité (en kN) et coefficients de perméabilité à l'eau (en m/s) en service et à l'ultime des tirants en BFUP et BO sans joint

	F_{perte d'étanchéité} (kN)	K_{service} (15-20 kN)	K_{ultime} (35-40 kN)
BFUP Sans joint 3	-	$< 5 \times 10^{-10} *$	$< 5 \times 10^{-10} *$
BO Sans joint 3	25	$< 5 \times 10^{-10} *$	1.1×10^{-7}

* Perméabilité inférieure à la limite de détection

La courbe de perméabilité du tirant en BFUP indique que celle-ci n'a pas évolué pendant le chargement jusqu'à la plastification de l'armature (Figure 4.15), le coefficient est demeuré inférieur à 5×10^{-10} m/s. Ceci est cohérent avec le comportement en traction de ces tirants sans joint qui n'ont présenté visuellement aucune fissuration localisée (4.4.2). Ceci est dû à la très faible porosité

du BFUP qui empêche efficacement la pénétration de l'eau et à son contrôle de la fissuration exceptionnelle qui évite l'apparition d'une macrofissure localisée dans les tirants. En effet, à ce stade, sa matrice cimentaire l'emporte et empêche toute infiltration d'eau, vu qu'elle est particulièrement dense (Androuët & Charron, 2021; Charron & Desmettre, 2013; Eide & Hisdal, 2012). Ainsi, la force de perte d'étanchéité n'est pas atteinte et la perméabilité demeure équivalente au seuil de détection de l'appareil.

Le tirant en BO sans joint montre une perte d'étanchéité dès 25 kN. La macrofissure localisée créée permet un flux d'eau traversant le spécimen qui augmente au fur et à mesure que la fissure s'ouvre sous le chargement de traction pour atteindre une valeur de 1.1×10^{-7} m/s à la plastification de l'armature. Il s'agit d'un niveau de perméabilité au minimum de 222 fois plus élevé que celle du BFUP.

4.4.6 Perméabilité à l'eau sous chargement des tirants avec joint

Cette section s'intéresse en premier lieu à la perméabilité des tirants en BFUP et en BO avec joint droit avant de s'intéresser au comportement des tirants en BFUP avec les différentes configurations de joint par la suite. Ces résultats peuvent être mis en relation avec le comportement en traction des tirants présenté à la section 4.4.3.

La Figure 4.16 illustre le comportement force versus coefficient de perméabilité à l'eau des tirants en BFUP et BO avec joint droit, alors que le Tableau 4.7 résume les forces de perte d'étanchéité associées, ainsi que les coefficients de perméabilité en service et à l'ultime.

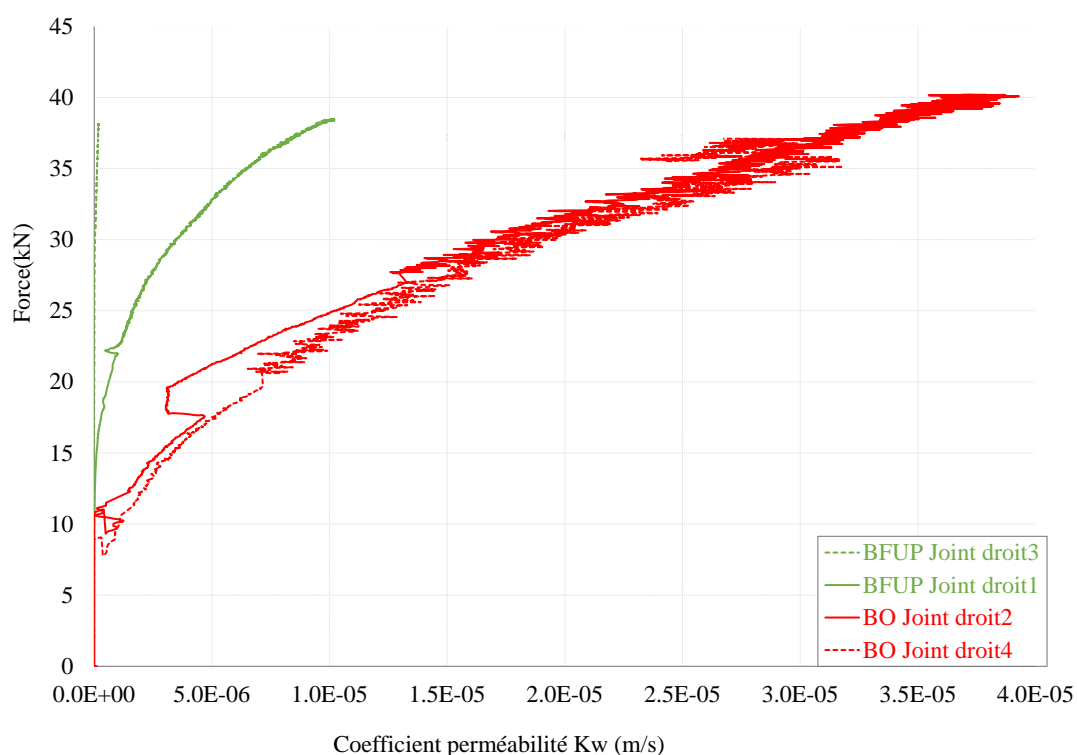


Figure 4.16 Perméabilité à l'eau des tirants du BFUP et BO avec joint droit

Tableau 4.7 Forces de perte d'étanchéité (en kN) et coefficients de perméabilité à l'eau (en m/s) en service et à l'ultime des tirants en BFUP et BO avec joint droit

	F _{perte d'étanchéité} (kN)	K _{service} (15-20 kN)	K _{ultime} (35-40 kN)
BFUP Joint droit 1	8	3.2×10^{-7}	8.3×10^{-6}
BFUP Joint droit 3	19.5	1.1×10^{-9}	1.4×10^{-7}
Moyenne BFUP Joint droit	13.8	1.6×10^{-7}	4.2×10^{-6}
BO Joint droit 2	11	3.5×10^{-6}	3.4×10^{-5}
BO Joint droit 4	9	5.2×10^{-6}	2.7×10^{-5}
Moyenne BO Joint droit	10	4.3×10^{-6}	3.1×10^{-5}

La force de perte d'étanchéité pour les tirants en BFUP avec joint droit varie entre 8 et 19.5 kN. Par la suite, la perméabilité augmente en condition de service pour le tirant qui a perdu son étanchéité à 8 kN (joint droit1), alors qu'elle n'augmente pas pour le tirant pour lequel la perte

d'étanchéité est survenue plus tard à 19 kN (joint droit³). La perméabilité augmente ensuite pour les deux tirants, pour atteindre une perméabilité de 8.3×10^{-6} m/s et 1.4×10^{-7} m/s à l'ultime, respectivement. Pour les tirants en BO avec joint droit, la force de perte d'étanchéité a varié entre 9 et 11 kN, soit un niveau assez similaire à ceux des tirants en BFUP. La perméabilité à l'eau augmente cependant beaucoup plus rapidement et à un niveau nettement supérieur dans les tirants en BO que dans ceux en BFUP, avec une perméabilité moyenne 7 à 27 fois plus grande en service et à l'ultime (1.6×10^{-7} m/s et 4.2×10^{-6} m/s pour le BFUP respectivement vs 4.3×10^{-6} m/s et 3.1×10^{-5} m/s pour le BO).

La différence de perméabilité observée entre les tirants en BFUP et BO avec joint droit est cohérente avec les différences de comportement en traction observées pour les deux types de tirant à la section 4.4.3. Le meilleur contrôle de l'ouverture du joint dans les tirants en BFUP, lié à une action mixte de l'action des fibres et de la capacité d'adhérence du BFUP, résulte à la fois en une rigidité nettement accrue du tirant en BFUP en comparaison au tirant en BO avec joint droit (section 4.4.3) et en une perméabilité moindre, qui évolue moins rapidement (Figure 4.16). Il est également intéressant de noter que, malgré l'amorce d'endommagement précoce du joint dans les tirants en BFUP avec joint droit (section 4.4.3), la perméabilité n'augmente pas durant cette initiation de l'endommagement, confirmant l'hypothèse d'une amorce seulement partielle de l'ouverture et/ou d'une ouverture du joint extrêmement fine ne nuisant pas à l'étanchéité du joint à ce stade. En comparaison, le joint droit présent dans les tirants en BO s'ouvre soudainement (section 4.4.3), résultant en une perte quasi instantanée de l'étanchéité du joint.

Bien que les tirants avec joint droit en BFUP performant déjà mieux que ceux en BO en termes d'étanchéité, la suite de cette section s'intéresse à l'amélioration d'étanchéité que peuvent apporter les autres configurations de joint étudiées pour le BFUP.

La Figure 4.17 présente le comportement force versus coefficient de perméabilité des tirants en BFUP avec différentes configurations de joint. Le Tableau 4.8 résume, quant à lui, les forces de perte d'étanchéité associées, ainsi que les coefficients de perméabilité en service et à l'ultime.

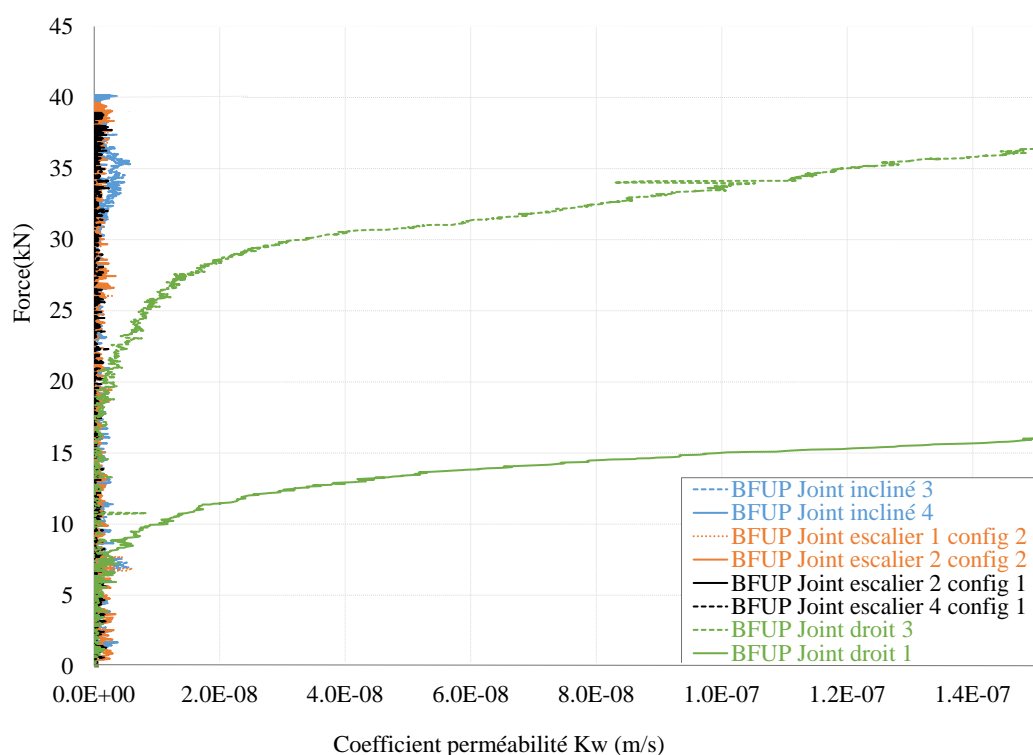


Figure 4.17 Perméabilité à l'eau des tirants du BFUP des différentes configurations de joints

Tableau 4.8 Forces de perte d'étanchéité et des coefficients de perméabilité à l'eau en service et ultimes des tirants du BFUP avec différentes configurations de joints

	F_{perte d'étanchéité} (kN)	K_{service}(15-20kN)	K_{ultime}(35-40kN)
BFUP Joint incliné 3	-	$< 5 \times 10^{-10} *$	$< 5 \times 10^{-10} *$
BFUP Joint incliné 4	-	$< 5 \times 10^{-10} *$	$< 5 \times 10^{-10} *$
BFUP Joint escalier 1 config. 2	-	$< 5 \times 10^{-10} *$	$< 5 \times 10^{-10} *$
BFUP Joint escalier 2 config. 2	-	$< 5 \times 10^{-10} *$	$< 5 \times 10^{-10} *$
BFUP Joint escalier 2 config. 1	-	$< 5 \times 10^{-10} *$	$< 5 \times 10^{-10} *$
BFUP Joint escalier 4 config. 1	-	$< 5 \times 10^{-10} *$	$< 5 \times 10^{-10} *$
BFUP Joint droit 1	8	3.2×10^{-7}	8.3×10^{-6}
BFUP Joint droit 3	19.5	1.1×10^{-9}	1.4×10^{-7}
Moyenne BFUP Joint droit	13.8	1.6×10^{-7}	4.2×10^{-6}

* Perméabilité inférieure à la limite de détection

Les configurations de tirants en BFUP avec joints incliné ou escalier (configurations 1 et 2) n'ont montré aucune perte d'étanchéité avec des valeurs de perméabilité à l'eau extrêmement faibles inférieures à la limite de la capacité de détection de l'appareil (5×10^{-10} m/s) jusqu'à la plastification de l'armature. Ce résultat est très différent de celui observé pour les tirants en BFUP avec joint droit qui montrent une perméabilité minimalement plus de 320 fois supérieure (1.6×10^{-7} m/s) en service et 8400 fois supérieure (4.2×10^{-6} m/s) à l'ultime (Tableau 4.8). Il importe cependant de mentionner que malgré cette performance moindre du joint droit en BFUP, il possède quand même une perméabilité à l'eau environ 7 à 27 fois inférieures à celles des tirants en BO avec joint droit en service (4.2×10^{-6} m/s) et à l'ultime (3.1×10^{-5} m/s) respectivement (Tableau 4.7). Ceci permet d'affirmer que l'étanchéité des joints inclinés et escaliers est nettement supérieure à celle d'un joint droit.

Il peut paraître surprenant que la perméabilité des tirants en BFUP avec joints incliné et en escalier n'évolue pas et demeure inférieure à 5×10^{-10} m/s, alors que la rigidité diminue progressivement jusqu'à la plastification de l'armature (section 4.4.3). Ceci peut s'expliquer par le fait que la rigidité évolue dans le comportement en traction (passage de la rigidité élastique à la rigidité en service par exemple) lorsqu'un endommagement se développe par exemple avec l'initiation ou la propagation de l'ouverture du joint. Cependant, si l'ouverture du joint demeure partielle ou vraiment très fine, la perméabilité à l'eau demeure souvent inchangée, comme c'est le cas pour ces types de joint.

4.4.7 Analyse et conclusions

Cette section résume les résultats présentés aux sections 4.4.2 à 4.4.6 et présente certaines conclusions et recommandations sur les joints froids des chapes en béton.

Sans surprise, les chapes en BFUP et BO présentent un comportement différent avec et sans joint. Les tirants en BFUP sans joint, qui représentent le comportement général de la chape, ont montré un comportement en traction exceptionnel, avec une rigidité très élevée tout au long du chargement jusqu'à la plastification de l'armature (Figure 4.11), et aucune macrofissure localisée. En conséquence, la perméabilité à l'eau de la chape est extrêmement faible peu importe le niveau de chargement atteint dans le BFUP (Figure 4.15), même en présence de nombreuses microfissures très fines (Hubert et al., 2015). À l'opposé, les tirants en BO sans joint ont montré le développement d'une fissure localisée qui a réduit de manière significative (2.6 fois) la rigidité en service et haussé

drastiquement (jusqu'à 27 fois) la perméabilité à l'eau. Le comportement mécanique et la durabilité d'une chape en BFUP à l'extérieur des zones de joints sont donc très significativement améliorés par rapport à une chape en BO.

La présence des joints influence localement grandement le comportement mécanique et la durabilité de la chape. La Figure 4.18 et la Figure 4.19 illustrent ces effets pour le joint incliné (le plus performant) et le joint droit (le moins performant) dans les tirants en BFUP, et pour le joint droit en BO respectivement.

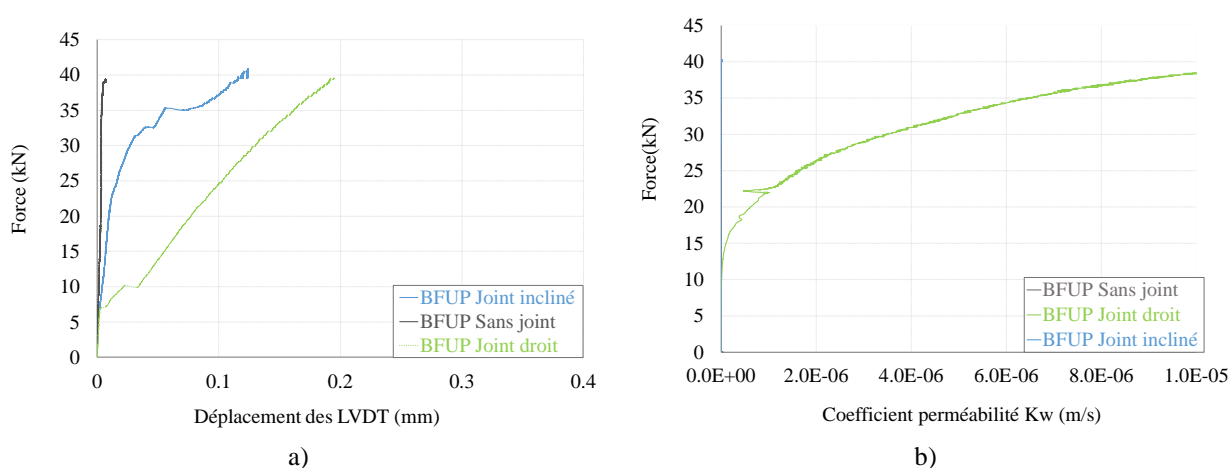


Figure 4.18 Comportement des tirants en BFUP sans joint et avec joint droit ou incliné : a) comportement en traction, b) comportement en perméabilité

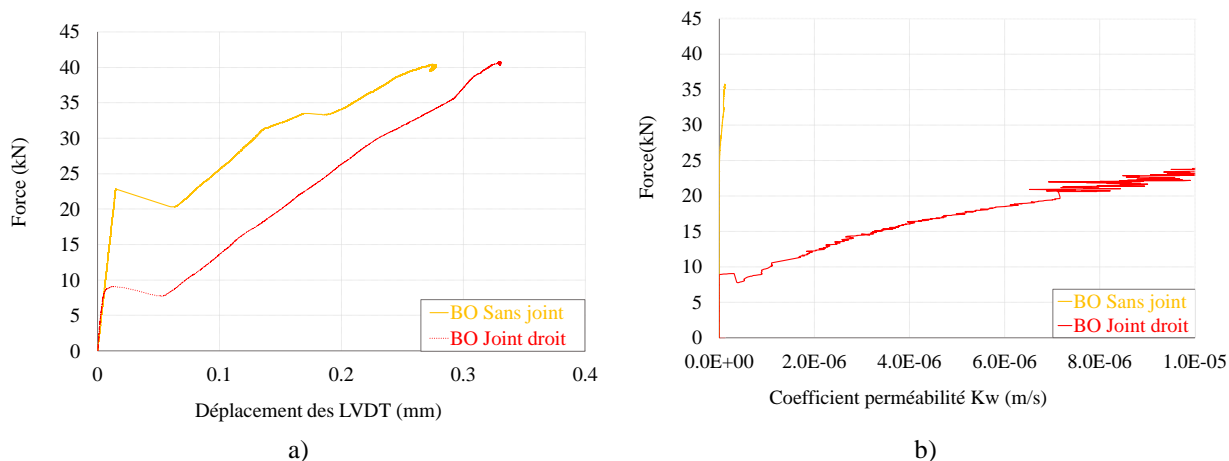


Figure 4.19 Comportement des tirants en BO sans joint et avec joint droit : a) comportement en traction, b) comportement en perméabilité

Quelle que soit la configuration du joint en BFUP, l'ajout d'un joint froid dans le tirant réduit significativement sa rigidité globale (Figure 4.18a). Cette réduction de la rigidité en traction n'est cependant pas nécessairement accompagnée d'une perte d'étanchéité du joint (Figure 4.18b). Les joints inclinés sont capables de transférer les charges de part et d'autre du joint, et restent performants mécaniquement et étanches jusqu'à la plastification de l'armature. Les joints en escalier avec les 2 configurations étudiées se sont avérés également étanches sous chargement et peuvent représenter un bon compromis, mais leur rigidité en traction est moindre que celle du joint incliné. La présence de l'interface parallèle à l'armature et à l'axe des efforts de traction ne semble pas idéale. Le joint droit dans la chape en BFUP est la configuration la plus vulnérable avec une initiation plus rapide de l'ouverture du joint et une perméabilité à l'eau qui augmente avec cette ouverture. Une chape en BFUP avec joint droit présente une perméabilité au niveau du joint nettement plus élevée que les autres configurations de joint incliné et en escalier, tout en restant bien inférieure à celle d'une chape en BO avec joint droit (environ 27 fois plus étanche en service). Quelque que soit le type de joint, la capacité d'adhérence élevée du BFUP sur une surface rugueuse (Semendary et al., 2022) et la présence des fibres dénudées à l'interface du joint d'une chape en BFUP procurent un comportement en traction et en durabilité clairement supérieurs à ceux d'un joint d'une chape en BO.

La présence d'un joint droit dans une chape en BO initie plus rapidement une perte de rigidité, liée à l'ouverture du joint, que dans une chape sans joint (Figure 4.19). L'ouverture du joint, ou de la fissure dans le cas de la chape sans joint, se produit en général quasi-instantanément sur toute la profondeur de la chape, résultant en une ouverture plus soudaine et plus marquée (saut instantané d'environ 0.05 mm, Figure 4.19) que pour le BFUP. Cet endommagement soudain résulte en une perte locale d'étanchéité quasi-instantanée de la chape en BO. Une fois le joint ouvert ou la fissuration créée, dans l'interface ou la chape respectivement, la rigidité en présence ou non d'un joint est assez similaire. La progression de la perméabilité reste initialement plus modérée pour la chape en BO sans joint comparée à celle avec joint droit. L'endommagement, bien que brutal, ne conduit pas immédiatement à une large ouverture continue. Ceci est probablement relié au profil de la fissuration dans la chape sans joint qui est plus aléatoire et rugueux que l'interface du joint.

Il importe de mentionner quelques aspects particuliers de ces essais sur tirants avec joints. D'abord, l'analyse du comportement en traction des tirants avec différentes formes de joints présente une certaine complexité. Celle-ci vient du fait que les joints ont des profils particuliers qui créent 2 blocs de béton non uniformes. Lorsque l'interface du joint s'ouvre partiellement, cela peut causer certains effets de flexion qui perturbent l'analyse des résultats et/ou amène une certaine variabilité dans ces derniers. Ensuite, les essais de traction sur tirant avec joint ont démontré l'importance de porter une attention particulière à la préparation de surface et à la cure des joints. Une variation entre les conditions d'humidité de l'interface du joint avant la mise en place de la deuxième couche de béton peut affecter la résistance du joint et initier une ouverture précoce. Une variation de la qualité ou de la durée de la cure appliquée aux spécimens peuvent initier le retrait du béton plus rapidement. Un retrait restreint précoce au joint du tirant peut alors réduire la résistance de ce dernier. Les joints étudiés dans le programme expérimental principal de ce projet n'ont pas présenté une résistance optimale, avec une résistance nettement moindre que celle attendue suite aux résultats obtenus lors du programme expérimental préliminaire (résultats du programme principal plutôt conservateurs). La raison précise n'a pas pu être déterminée clairement. Malgré tout, les tirants en BFUP avec joints incliné et escalier ont présenté une étanchéité jusqu'à la plastification de l'armature et ceux avec joint droit ont présenté un comportement amélioré en comparaison au même tirant en BO. Ceci démontre que même en condition défavorable (qualité de surface de préparation ou de cure), les joints de la chape en BFUP assurent une durabilité exceptionnelle.

En conclusion, les joints en BFUP incliné et en escalier sont les meilleures solutions pour garantir une étanchéité durable, tandis que les joints droits en BO et BFUP sont plus vulnérables à la perte d'étanchéité sous chargement.

Jusqu'à présent, les réparations des dalles de pont et industrielles sont majoritairement réalisées avec du BO dont les joints droits entre les coulées ou les zones de réparation constituent des zones de faiblesse. Ces zones fissurent rapidement, entraînant une perte d'étanchéité et une dégradation accélérée, d'où la nécessité de l'installation d'une membrane d'étanchéité sur la chape de réparation. La chape en BFUP, particulièrement celle avec joint incliné, démontre une amélioration majeure pour le comportement en traction et la perméabilité à l'eau par rapport à la chape en BO avec joint droit, avec une rigidité sous chargement en service 20 fois plus élevée et une étanchéité à l'eau jusqu'à la plastification des armatures dans les zones avec ou sans joint. Ces résultats valident donc l'intérêt d'une chape en BFUP comme solution de réparation pour les dalles de pont et industrielles sans besoin d'installer une membrane d'étanchéité.

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce chapitre se veut une rétrospective des principaux résultats obtenus dans ce projet de recherche. Il rappelle d'abord les objectifs du projet, présente ensuite les faits saillants concernant la performance en service de la chape en BFUP ainsi que ses joints de construction, et enfin décrit les recommandations tirées des travaux de recherche.

5.1 Rappel des objectifs

L'objectif général du projet était d'étudier le comportement en service des chapes minces en BFUP sans membrane d'étanchéité et sans enrobé bitumineux. Plus spécifiquement les travaux ont été consacrés au comportement de la surface de roulement de la chape en BFUP ainsi qu'au comportement des joints de construction de cette dernière. Les objectifs spécifiques étaient les suivants :

1. Évaluer l'adhérence, la résistance à l'écaillage et la résistance à l'abrasion de la surface de roulement en BFUP;
2. Évaluer le comportement en traction et la perméabilité à l'eau de différentes configurations de joints de construction de chape mince en BFUP;
3. Proposer des recommandations concernant la finition de la surface de roulement en BFUP ainsi que la conception des joints de construction en BFUP.

5.2 Performance en service de la chape en BFUP

5.2.1 Résistance à l'écaillage

L'objectif du développement du protocole expérimental de l'essai d'écaillage dans cette étude était d'évaluer la résistance aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déglçage de la chape en BFUP. L'approche expérimentale adoptée (CSA A23.2-22C, 2019) a permis de simuler des conditions très sévères d'exposition aux sels de déglçage, tout en assurant un contrôle rigoureux des paramètres influençant la dégradation des surfaces. Trois finitions de surface de la chape en

BFUP ont été considérés (lisse, rainuré et avec granulats/fibres exposés) pour représenter une condition de référence et deux conditions envisageables pour l'application visée.

Les résultats de la campagne expérimentale ont démontré que la chape en BFUP avec surface lisse offrait une résistance à l'écaillage nettement supérieure à celle du BO dans la même condition de référence. Après 56 cycles de gel-dégel, les pertes de masse cumulatives moyennes étaient 83 % plus faibles pour la chape en BFUP, avec seulement 0.0048 kg/m² de pertes contre 0.0279 kg/m² pour celles en BO. Ces pertes de masse des chapes en BFUP et en BO sont respectivement plus de 100 et 10 fois inférieures à la limite normative de 0.5 kg/m². Le comportement du BFUP s'explique par sa densité très élevée qui lui permet de résister de manière exceptionnelle aux pressions internes causées par les cycles de gel-dégel en présence de sels.

L'influence de la finition de surface de la chape en BFUP a également été mise en évidence dans ce projet. La surface lisse a montré la meilleure performance, tandis que les finitions avec granulats/fibres exposés et rainurées ont entraîné des pertes de masse plus importantes en écaillage. Pour la finition avec granulats/fibres exposés, les pertes ont atteint 0.0720 kg/m² en incluant les bouts de fibres retrouvées parmi les débris, et 0.0441 kg/m² en les excluant (soit respectivement 15 et 9.2 fois supérieures à celles de la surface lisse). Cette réduction de la performance avec une finition en granulats/fibres exposés s'explique par l'action du retardateur de prise et du jet d'eau sous pression qui exposent l'extrémité de fibres en surface à la corrosion et fragilise légèrement la surface. Pour la surface rainurée, les pertes de masse ont été plus modérées à 0.0105 kg/m², mais néanmoins 2.2 fois supérieures à celles de la surface lisse. Cette hausse s'explique par la sollicitation accrue des arêtes des rainures par le gel et l'augmentation de la surface exposée à la solution saline qui augmente de 64% par rapport à la surface lisse. Malgré ces différences, toutes les finitions restent très en dessous de la limite normative de 0.5 kg/m², confirmant la bonne résistance du BFUP à l'écaillage, même dans des conditions sévères.

5.2.2 Résistance à l'abrasion

L'essai d'abrasion a été développé afin d'évaluer la résistance de la surface des chapes en BFUP et en BO face à l'usure mécanique, soit causée par la circulation de véhicules sur les dalles de pont ou par les chocs ou charges ponctuelles intenses sur les dalles industrielles. La résistance à l'abrasion a été obtenue en appliquant le protocole expérimental de la norme ASTM C944 (2019).

L'objectif était à nouveau de caractériser la performance de la chape en BFUP en comparaison à celle en BO, et d'évaluer l'influence de la finition de surface de la chape en BFUP sur la résistance à l'abrasion. De plus, l'effet d'un endommagement combiné causé par l'écaillage et l'abrasion a été étudié pour reproduire la réalité d'exposition des chapes.

Le développement de l'essai d'abrasion a été débuté à l'interne, plusieurs ajustements de montage ont été réalisés sur une perceuse à colonne disponible au laboratoire. Un outil rotatif d'abrasion a été réalisé avec succès. Ensuite, un dispositif de fixation a été conçu pour maintenir la plaque en béton en place tout en évitant la fissuration induite par le serrage de cette dernière sur la perceuse. Différentes méthodes d'application de la charge ont été testées avec mesures de cette dernière avec une cellule de charge. Malheureusement, les vibrations causées l'outil rotatif sur la plaque de béton n'ont pas permis d'obtenir un contrôle précis de la charge appliquée pour assurer la fiabilité des résultats. Ces observations ouvrent la voie à une optimisation future du dispositif au laboratoire. Face à ces difficultés, les essais d'abrasion ont finalement été réalisés au laboratoire du CRIB de l'Université de Sherbrooke.

Le programme expérimental a mis en évidence des différences marquées de comportement entre les chapes de référence avec surface lisse en BFUP et celle en BO. Après les 3 cycles d'abrasion de 2 minutes réglementaires, les pertes de masse cumulatives de la chape en BFUP ont été de 76 % inférieures à celles de la chape en BO sans endommagement préalable. Le BFUP, grâce à sa très faible porosité et à sa microstructure dense renforcée par des fibres métalliques, résiste mieux à l'arrachement de matière sous sollicitation mécanique. Avec endommagement préalable à l'écaillage, les pertes à l'abrasion de la surface en BFUP ont été de 61 % inférieures à celles du BO. Curieusement, la performance à l'abrasion de la surface en BO avec écaillage préalable a été meilleure, car l'écaillage a retiré une couche superficielle initialement plus fragile et plus poreuse, exposant une matrice plus dense et plus résistante en profondeur pour résister à l'abrasion.

En ce qui concerne l'effet de la finition de surface, des écarts marqués ont été observés. Les surfaces avec granulats/fibres exposés et les surfaces rainurées ont présenté des pertes de masse par abrasion significativement plus élevées que celles de la surface lisse. Après trois cycles d'abrasion, les pertes de masse cumulatives étaient 2.2 fois supérieures pour les surfaces à granulats/fibres exposés et jusqu'à 6.8 fois supérieures pour les surfaces rainurées. Pour la finition avec granulats/fibres exposés, la rugosité accrue combinée à la présence de fibres partiellement ancrées en surface a

facilité leur arrachement sous l'action de l'outil rotatif. Pour la finition rainurée, les pertes de masse ont été particulièrement concentrées au niveau des arêtes des rainures, qui subissent des sollicitations mécaniques intenses et localisées par l'outil rotatif, amplifiant l'usure. Ces observations confirment que si la rugosité de surface peut améliorer l'adhérence, elle peut en revanche réduire la durabilité face à l'abrasion, en particulier avec l'essai ASTM C944 (2019) utilisé.

5.2.3 Mesures d'adhérence

L'essai d'adhérence a été réalisé afin d'évaluer la résistance au glissement des surfaces de chapes en béton en appliquant la méthodologie du pendule britannique ASTM E303 (2022). L'objectif était d'analyser l'impact du type de béton de la chape (BFUP vs BO) et de la finition de surface de la chape en BFUP (lisse, granulats/fibres exposés, rainuré longitudinalement et rainuré transversalement) sur l'adhérence, un paramètre essentiel pour la sécurité des véhicules circulant sur les chapes. Les essais ont été menés en collaboration avec la Ville de Montréal sur un dispositif certifié fournissant les indices BPN (British Pendulum Number).

Les résultats de la campagne expérimentale ont montré que toutes les surfaces testées respectaient l'exigence de $BPN \geq 55$ de la Ville de Montréal pour les enrobés bitumineux. Ainsi, les chapes en BO et en BFUP, toutes finitions de surface confondues, ont présenté une adhérence satisfaisante. Les indices d'adhérence obtenus pour une chape en BFUP lisse ($BPN = 71$) et en BO lisse ($BPN = 73$) sont équivalentes, l'usage d'une chape en BFUP n'impacte donc pas négativement l'adhérence. La finition de surface de la chape en BFUP a modifié l'adhérence mesurée. Les surfaces avec granulats/fibres exposés ($BPN = 71$) et lisses ont présenté des performances similaires, tandis que la surface rainurée longitudinalement dans le sens de la circulation a montré une légère diminution d'adhérence ($BPN = 67$). En revanche, le fini rainuré transversalement au sens de la circulation a offert la meilleure adhérence ($BPN = 91$). Les rainures transversales étant très bruyantes pour la circulation automobile, son application est cependant peu adaptée en milieu urbain.

5.2.1 Bilan

L'analyse des résultats d'essais et des modes de dégradation observés permet de formuler quelques conclusions concernant la chape en BFUP exposés aux intempéries de même qu'à la circulation routière et industrielle.

La chape en BFUP a présenté un excellent comportement en service en comparaison à la chape en BO pour les propriétés étudiées dans le cadre de ce projet. Pour une surface de finition lisse de référence, l'adhérence de la chape en BFUP est comparable à celle en BO. En revanche, les résistances à l'écaillage et à l'abrasion sont très significativement supérieures à celle en BO.

La finition de surface lisse de la chape en BFUP a mieux performé que les autres, cependant elle ne s'avère pas adéquate pour l'évacuation de l'eau pour une surface de circulation routière. Les surfaces avec rugosité élevée sont d'usage plus réaliste. Les surfaces rainurées ont montré moins de pertes à l'écaillage, mais davantage de pertes à l'abrasion. Ce dernier résultat est cependant relié aux impacts répétés de l'outil rotatif dans les rainures qui favorisent l'endommagement. Il est attendu qu'un essai d'abrasion causant une usure de surface plus représentative des conditions routières (Three-Wheel Polishing Device) limiterait beaucoup l'effet négatif des rainures. En ce sens, la chape en BFUP rainurée longitudinalement est donc l'option recommandée.

5.3 **Performance en service des joints de la chape en BFUP**

Dans cette étude, la perméabilité à l'eau du béton armé a été mesuré sur des sections de chapes (tirants) en BO et en BFUP, avec et sans joints, soumis simultanément à un chargement quasi-statique en traction uniaxiale. L'essai de perméabilité, basé sur le protocole initialement développé par Desmettre (2011), a été adapté à l'étude de tirants courts avec joints froids de différentes configurations (droit, incliné, escalier de configuration 1 et 2).

5.3.1 Comportement entre les joints de construction

Le programme expérimental principal de ce projet a d'abord permis d'évaluer le comportement en traction et la perméabilité à l'eau d'une chape entre les joints de construction (en l'absence de joint). Sous chargement de traction uniaxiale, le tirant en BO sans joint a présenté une fissure

localisée à 23 kN, une perte de rigidité importante et une perméabilité à l'eau élevée à 25 kN (allant jusqu'à $K_w = 1.1 \times 10^{-7}$ m/s en ultime). Une telle chape en BO pourrait donc difficilement demeurer étanche sans la présence d'une membrane d'étanchéité protégeant la dalle des infiltrations de l'eau et des agents agressifs. En revanche, une chape en BFUP n'a présenté aucune fissuration localisée, une perte de rigidité très faible en service et est demeurée étanche à l'infiltration d'eau ($K_w < 5 \times 10^{-10}$ m/s) jusqu'à la plastification de l'armature ($F > 40$ kN). Une chape en BFUP sans joint démontrera ainsi une durabilité exceptionnelle et ne requiert pas de membrane d'étanchéité.

5.3.2 Comportement aux joints de construction

L'impact de la présence de joints froids dans une chape en béton a aussi été évaluée sur le comportement en traction et la perméabilité à l'eau de tirants. L'optimisation de la configuration des joints en utilisant des joints inclinés et en escalier a permis d'améliorer la transmission des efforts, de retarder l'initiation de l'ouverture du joint et de réduire l'infiltration d'eau par rapport au joint droit.

Les joints froids inclinés dans une chape mince en BFUP sont capables de transférer les charges de part et d'autre du joint, ils restent performants mécaniquement et étanches jusqu'à la plastification de l'armature ($K_w < 5 \times 10^{-10}$ m/s, plus que 62 000 fois inférieure à celle des joints droits en BO). Cette performance supérieure est notamment reliée à l'augmentation de la surface de contact au joint. Les joints en escalier avec 2 configurations étudiées se sont avérés également étanches sous chargement (semblables aux joint inclinés) et peuvent représenter un bon compromis, mais leur rigidité en traction est 6 à 9 fois moindre en condition de service que celle du joint incliné. La présence de l'interface parallèle à l'armature et à l'axe des efforts de traction ne semble pas idéale pour les joints en escalier. Le joint droit dans la chape de BFUP est la configuration la plus vulnérable avec une rigidité 11 fois moindre en condition de service par rapport à celle du joint incliné, une initiation plus rapide de l'ouverture du joint et une perméabilité à l'eau qui augmente avec cette ouverture. Une chape en BFUP avec joint droit présente une perméabilité nettement plus élevée (jusqu'à $K_w = 4.2 \times 10^{-6}$ m/s) que les autres configurations de joint incliné et en escalier, mais tout de même 7.4 fois inférieure à celle d'une chape en BO avec joint droit. Quelque que soit le type de joint, la capacité d'adhérence élevée du BFUP sur une surface rugueuse et la présence des fibres dénudées à l'interface du joint procurent un

comportement en traction et une résistance à l'infiltration d'eau clairement supérieurs à ceux d'un joint droit en BO.

Sur la base des résultats obtenus, les joints inclinés sont recommandés dans la chape en BFUP pour assurer un meilleur transfert d'efforts à l'interface des coulées de BFUP et garantir l'étanchéité à l'eau en condition de service, permettant ainsi d'éviter l'installation d'une membrane d'étanchéité.

5.4 Recommandations et perspectives

Afin d'assurer une durabilité optimale des chapes en BFUP, il est essentiel d'optimiser à la fois la finition de la surface de roulement et la conception des joints froids. Les résultats expérimentaux démontrent que ces deux paramètres influencent directement la résistance mécanique, l'étanchéité et la longévité des infrastructures routières et industrielles. Ainsi, le choix de la finition de la chape en BFUP et du type de joint de construction doivent résulter d'un compromis entre résistance mécanique, durabilité, performance fonctionnelle (adhérence) et contraintes d'exploitation, en tenant compte du contexte d'usage (milieu urbain, industriel, ou routier).

5.4.1 Optimisation de la finition de la chape en BFUP

Le choix de la finition de surface de la chape joue un rôle déterminant dans la résistance à l'écaillage, à l'abrasion et l'adhérence. Certes, une surface lisse s'est révélée être la plus résistante aux cycles de gel-dégel en présence de solution saline et à l'abrasion mécanique, minimisant les pertes de matériau et la dégradation prématurée. Cependant, dans des environnements nécessitant une adhérence adéquate avec une bonne capacité d'évacuation d'eau, un fini rainuré longitudinalement doit être envisagé pour la chape en BFUP. Il offre un bon coefficient de frottement en limitant les nuisances sonores et présente d'excellente résistance à l'écaillage et à l'abrasion. Il importe de mentionner que le rainurage du BFUP dans ce projet a été réalisé à l'aide de coffrage au lieu d'un équipement mécanique (qui avait une taille incompatible avec les spécimens de laboratoire). En contexte de chantier, un équipement de rainurage puissant et de grande capacité devra être utilisé sur la chape en BFUP pour être fonctionnel en toute circonstance (dureté du béton augmente en condition hivernale). Une calibration de l'équipement devra aussi être effectuée pour valider la profondeur à atteindre pour les rainures.

L'utilisation d'une surface avec exposition des granulats et de fibres en surface de la chape en BFUP doit être bien encadrée, car elle favorise une usure supérieure par abrasion et écaillage par rapport à la surface lisse en BFUP, particulièrement dans les premières phases de sollicitation. Une attention particulière doit être portée à la méthode de réalisation de ce type de finition, notamment en ce qui concerne l'utilisation du retardateur de prise et le lavage à l'eau à haute pression. Il faut éviter toute fragilisation de la pâte de ciment en surface, par exemple en appliquant la méthode trop hâtivement. En contexte de chantier, un équipement d'hydrodémolition ou équivalent devra être utilisé pour effectuer rapidement une préparation de surface uniforme. Une calibration devra également être effectuée avec le produit retardateur et l'équipement de nettoyage pour valider la profondeur de rugosité de surface à atteindre.

5.4.2 Optimisation de la forme des joints froids en BFUP

Les joints froids constituent des zones critiques pouvant altérer la résistance mécanique et l'étanchéité de la chape en BFUP. Les résultats ont mis en évidence l'excellente performance des joints de construction inclinés, qui offrent une rigidité en service 11 fois supérieure aux joints droits en BFUP et une perméabilité extrêmement faible inférieure à la limite de détection du système de perméabilité, plus que 320 fois inférieure à celle du joint droit en BFUP en condition de service. Cette géométrie permet une transmission progressive des charges et limite l'ouverture de l'interface du joint incliné sous chargement de traction, réduisant ainsi les infiltrations d'eau.

À défaut d'utiliser un joint de construction incliné, un joint en BFUP avec la configuration en escalier (configuration 1) représente une alternative viable. Le joint en escalier de configuration 1 fournit un bon compromis avec une rigidité intermédiaire sous chargement en traction et conserve une étanchéité à l'eau. En revanche, le joint droit en BFUP doit être évité autant que possible, car il présente une perte de rigidité plus rapide sous chargement de traction et une infiltration d'eau une fois le joint ouvert.

Une préparation soignée de l'interface des joints de construction de la chape en BFUP est essentielle pour assurer une adhérence optimale entre les coulées. L'utilisation d'une surface en granulats/fibres exposés est recommandée. Elle est réalisée avec l'usage d'un retardateur de prise sur le coffrage du joint et l'application d'un jet d'eau sous pression après le démoulage afin d'améliorer la rugosité de surface et la transmission des efforts à travers le joint. L'humidification

de la surface du joint avant la coulée de BFUP subséquente doit être rigoureusement contrôlée pour garantir une surface saturée superficiellement sèche (SSS).

5.4.3 Programme d'essais complémentaires

Les programmes expérimentaux complétés ont permis d'étudier la performance en service de la chape en BFUP en différentes conditions. Cependant, d'autres mesures ou conditions d'essais seraient également intéressantes à évaluer:

- L'utilisation d'un essai plus représentatif de l'abrasion de véhicules retrouvée dans des conditions routières, tel que le Three-Wheel Polishing Device. En effet, des pertes de masse élevées sur des surfaces texturées sont surestimées par l'essai ASTM C944. En effet, la sollicitation d'abrasion est localisée principalement sous les lames de l'outil rotatif, cette concentration d'efforts ne reflète pas l'usure réelle des surfaces sous les pneus des véhicules de trafic routier, où les interactions roue-chape sont réparties sur une plus grande surface (empreinte de pneus).
- L'utilisation d'un essai mieux adapté aux conditions routières pour évaluer l'adhérence des surfaces de roulement. En effet, l'essai de pendule britannique, bien que pratique en laboratoire, reste limité pour représenter les conditions réelles de grande surface. Un essai complémentaire à l'aide de la remorque SCRIM ou un test de freinage avec véhicule instrumenté permettrait d'évaluer l'adhérence de manière plus représentative des conditions de circulation, notamment en présence d'eau ou à vitesse variable.
- L'étude de l'effet de la cure, en particulier au niveau des interfaces de joints. En effet, une cure inadéquate ou une préparation de surface insuffisante peuvent entraîner une initiation précoce de l'ouverture du joint, une diminution de la rigidité en service, ainsi qu'une augmentation prématurée de la perméabilité à l'eau.
- L'impact de l'amplitude du retrait du BFUP, en particulier le retrait restreint pouvant apparaître au niveau des joints. Une trop grande amplitude de retrait pourrait fragiliser l'interface entre deux coulées et nuire à la performance mécanique et à l'étanchéité de la chape en BFUP.

- La variation du pourcentage de fibres du BFUP pourrait également explorée afin d'optimiser l'ouvrabilité, la performance mécanique et durabilité du BFUP, notamment pour des applications en chape mince.

5.4.4 Modèles numériques

Les résultats de cette recherche ont permis d'évaluer le comportement en service de chapes minces en BFUP par des mesures de résistance à l'écaillage, à l'abrasion et d'adhérence. L'étude a également permis de caractériser le comportement en traction et la perméabilité à l'eau des joints froids avec différentes configurations représentatives d'une utilisation en service.

Ces données expérimentales, notamment les essais sur tirants en traction, pourraient être intégrées dans un modèle d'analyse par éléments finis. Une fois validé par les résultats obtenus, ce modèle pourrait permettre d'étudier de nouvelles finitions de surfaces et de joints froids d'une chape mince en BFUP et d'analyser leur comportement mécanique et étanchéité dans des contextes structurels variés. Ceci permettrait de réduire le besoin d'essais expérimentaux supplémentaires.

RÉFÉRENCES

- ASTM C944. (2019). Standard test method for abrasion resistance of concrete or mortar surfaces by the rotating-cutter method.
- ASTM E303. (2022). Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester.
- CSA A23.2-22C. (2019). Calcul de la résistance à l'écaillage des surfaces de béton exposées à des produits chimique de déglçage utilisant la perte de masse.
- Desmettre, C. (2011). *Contribution à l'étude de la perméabilité du béton armé sous sollicitations statiques et cycliques*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Abdal, S., Mansour, W., Agwa, I., Nasr, M., Abadel, A., Onuralp Özkılıç, Y., & Akeed, M. H. (2023). Application of ultra-high-performance concrete in bridge engineering: Current status, limitations, challenges, and future prospects. *Buildings*, 13(1), 185.
- Abellán-García, J., Carvajal-Muñoz, J. S., & Ramírez-Munévar, C. (2024a). Application of ultra-high-performance concrete as bridge pavement overlays: Literature review and case studies. *Construction and Building Materials*, 410, 134221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134221>
- Abellán-García, J., Carvajal-Muñoz, J. S., & Ramírez-Munévar, C. (2024b). Application of ultra-high-performance concrete as bridge pavement overlays: Literature review and case studies. *Construction and Building Materials*, 410. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134221>
- Abid, S. (2021). *Confinement de L'expansion Causée par la Réaction Alcalis-Granulats Avec du Béton Fibré à Ultra-Hautes Performances (BFUP)*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Al-Basha, A. J., Toledo, W. K., Newton, C. M., & Weldon, B. D. (2019). Ultra-High Performance Concrete Overlays for Concrete Bridge Decks.
- Al-Osta, M. A., Ahmad, S., Al-Madani, M. K., Khalid, H. R., Al-Huri, M., & Al-Fakih, A. (2022). Performance of bond strength between ultra-high-performance concrete and concrete substrates (concrete screed and self-compacted concrete): An experimental study. *Journal of Building Engineering*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104291>
- Alvarez, A., Toledo, W. K., Weldon, B. D., & Newton, C. M. (2024). Construction Methods and Lessons Learned for a Non-Proprietary Ultra-High Performance Concrete Overlay. *Construction Materials*, 4(1), 271-291.
- Androuët, C., & Charron, J.-P. (2021). Shrinkage mitigation of an ultra-high performance concrete submitted to various mixing and curing conditions. *Materials*, 14(14), 3982.
- ASTM C131. (2006). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
- ASTM C469. (2021). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.

- ASTM C672. (2016). Evaluation of Modifications to the ASTM C672 Deicer Salt Scaling Test for Concrete Containing Slag Cement.
- ASTM C944. (1999). Standard test method for abrasion resistance of concrete or mortar surfaces by the rotating-cutter method.
- ASTM C944. (2019). Standard test method for abrasion resistance of concrete or mortar surfaces by the rotating-cutter method.
- ASTM C1138. (2019). Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method).
- ASTM E303. (2022). Standart Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester.
- Bamonte, P., Gambarova, P. G., & Panzeri, P. (2007). Thermal properties and residual behavior of heat-damaged self-compacting concrete. *Actes des journées scientifiques du LCPC*, 1609-1616.
- Batoz, J.-F., & Rivallain, M. (2010). la contribution des bétons ultra performants au développement durable.
- Beaudoin, A. (2021). *Développement d'une méthode d'analyse inverse pour déterminer le comportement en traction d'un BFUP à l'aide de son comportement en flexion*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Beaurivage, F. (2009). *Étude de l'influence des paramètres structuraux sur les lois de comportement des bétons fibrés pour la conception de structures* École Polytechnique de Montréal].
- Behloul, M., & Lee, K. (2003). Ductal® seonyu footbridge. *Structural Concrete*, 4(4), 195-201.
- Benoît Marleau, B. M., Jea-Philippe Charron. (2018). *Performance under fatigue loading of field-cast UHPC joints in positive moment regions between precast bridge deck panels* 3rd FRC International Workshop Fibre Reinforced Concrete: from Design to Structural Applications, Desenzano, Lake Garda, Italy.
- Bertola, N., Schiltz, P., Denarié, E., & Brühwiler, E. (2021). A review of the use of UHPFRC in bridge rehabilitation and new construction in Switzerland. *Frontiers in Built Environment*, 7, 769686.
- Bouhaya, L., Le Roy, R., & Feraille-Fresnet, A. (2009). Simplified environmental study on innovative bridge structure. *Environmental science & technology*, 43(6), 2066-2071.
- Boulet, M., Deffieux, J.-C., Delalande, G., Do, M.-T., Gothie, M., Goyat, T., Le Turdu, V., Martin, J., & Mouchel, I. (2006). Mesure de l'adhérence des chaussées routières et aéronautiques. *Techniques et méthodes des Laboratoires des ponts et chaussées*.
- Braike, S. (2007). Conception of precast bridge elements with high and ultra high fibre reinforced concretes. *M. Sc. A. Thesis Ecole Polytechnique of Montreal. In French*.
- Brühwiler, E., & Bastien Masse, M. (2015). Strengthening the Chillon viaducts deck slabs with reinforced UHPFRC. IABSE Conference Geneva 2015'Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges',

- Brühwiler, E., & Denarié, E. (2013). Rehabilitation and strengthening of concrete structures using ultra-high performance fibre reinforced concrete. *Structural Engineering International*, 23(4), 450-457.
- Brühwiler, E., & Denarié, E. (2018). Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete. *Structural Engineering International*, 23(4), 450-457. <https://doi.org/10.2749/101686613x13627347100437>
- Cao, J., Shao, X., Zhan, J., Zhang, J., & Wang, Y. (2023). A simplified analysis method for long-span suspension bridges within the deck overlay retrofitting process from asphalt to UHPC. *Engineering Structures*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116122>
- Cavill, B., & Chirgwin, G. (2003). The worlds first Ductal road bridge Sherpherds gully creek bridge, NSW. 21st Biennial Conference of the Concrete Institute of Australia, Brisbane,
- CEN/TS 12390-9. (2006). Essais pour béton durci – Partie 9 : Résistance au gel-dégel – Écaillage.
- Charette, N. (2017). *Réparations minces de parapets de ponts avec des bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP)*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Charron, J.-P. Bétons renforcés de fibres Technologie du béton note de cours CIV-6505.
- Charron, J., & Desmettre, C. (2013). Intérêt de l'utilisation des bétons renforcés de fibres pour la construction d'ouvrages d'art durables. *Rapport de Recherche SR13, 1*.
- CSA A23.1-22C:19. (2019). Concrete materials and methods of concrete construction.
- CSA A23.1:19 Annexe U. (2019). Concrete materials and methods of concrete construction.
- CSA A23.2-9C. (2019). Compressive strength of cylindrical concrete specimens.
- CSA A23.2-13C. (2019). Résistance à la traction par écrasement latéral d'éprouvettes de béton cylindriques (dit «Brésilien»).
- CSA A23.2-22C. (2019). Calcul de la résistance à l'écaillage des surfaces de béton exposées à des produits chimique de déglacage utilisant la perte de masse.
- CSA A23.2:19. (2019). Test methods and standard practices for concrete.
- CSA A23.3-04. (2004). Design of Concrete Structures Standard.
- CSA A23.4-16. (2016). Béton préfabriqué - Constituants et exécution des travaux.
- CSA S6:19. (2019). Code canadien sur le calcul des ponts routiers.
- Desmettre, C. (2011). *Contribution à l'étude de la perméabilité du béton armé sous sollicitations statiques et cycliques*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Desmettre, C., & Charron, J.-P. (2012). Water permeability of reinforced concrete with and without fiber subjected to static and constant tensile loading. *Cement and concrete research*, 42(7), 945-952.
- Du, G., Xu, B., & Bu, L. (2022). Experimental study and numerical simulation of the interfacial bonding performance of ordinary concrete reinforced with reactive powder concrete. *Journal of Building Engineering*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105352>

- Du, J., Meng, W., Khayat, K. H., Bao, Y., Guo, P., Lyu, Z., Abu-Obeidah, A., Nassif, H., & Wang, H. (2021). New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Part B: Engineering*, 224, 109220.
- Eide, M. B., & Hisdal, J.-M. (2012). Ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)—State of the art: FA 2 Competitive constructions: SP 2.2 Ductile high strength concrete.
- El-Helou, R. G., Haber, Z. B., & Graybeal, B. A. (2022). Mechanical Behavior and Design Properties of Ultra-High-Performance Concrete. *ACI Materials Journal*, 119(1).
- Escoffres, P.-C.-R. (2017). *Effet de l'utilisation d'ajouts cristallins sur le potentiel de cicatrisation de bétons à hautes performances en condition de service* École Polytechnique de Montréal].
- Ferrara, L., Krelani, V., & Moretti, F. (2016). On the use of crystalline admixtures in cement based construction materials: from porosity reducers to promoters of self healing. *Smart materials and structures*, 25(8), 084002.
- FHWA-HRT-16-081. Bond of Field-Cast Grouts to Precast Concrete Elements.
- FHWA-HRT-17-096. (2017). Field Testing of an Ultra-High Performance Concrete Overlay.
- FHWA-HRT-22-065. (2022). Design and Construction of UHPC-Based Bridge Preservation and Repair Solutions. <https://doi.org/10.21949/1521867>
- Graybeal, & Tanesi. (2007). Durability of an Ultrahigh-Performance Concrete. <https://doi.org/10.1061/共ASCE厶0899-1561共2007厶19:10共848厶>
- Haber Zachary B., Munoz Jose F., Igor de la Varga, & Graybeal, B. (2018). Bond characterization of UHPC overlays for concrete bridge decks: Laboratory and field testing.
- Haber, Z. B., Munoz, J. F., De la Varga, I., & Graybeal, B. A. (2018). Bond characterization of UHPC overlays for concrete bridge decks: Laboratory and field testing. *Construction and Building Materials*, 190, 1056-1068.
- Haber, Z. B., Munoz, J. F., & Graybeal, B. A. (2017). *Field testing of an ultra-high performance concrete overlay*.
- Hajar, Z., Resplendino, J., Lecointre, D., Petitjean, J., & Simon, A. (2004). Ultra-high-performance concretes: First recommendations and examples of application. fib Symposium,
- Harris, D. K., Carbonell Muñoz, M. A., Gheitasi, A., Ahlborn, T. M., & Rush, S. V. (2015). The Challenges Related to Interface Bond Characterization of Ultra-High-Performance Concrete With Implications for Bridge Rehabilitation Practices. *Advances in Civil Engineering Materials*, 4(2), 75-101. <https://doi.org/10.1520/acem20140034>
- Hassan, A., Jones, S., & Mahmud, G. (2012). Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). *Construction and Building Materials*, 37, 874-882.
- Helsel, M. A., Munoz, J. F., Haber, Z. B., & varga, I. d. l. (2023). Effect of bridge deck surface preparation on the consolidation and bond of UHPC overlays.

- Hubert, M., Desmettre, C., & Charron, J.-P. (2015). Influence of fiber content and reinforcement ratio on the water permeability of reinforced concrete. *Materials and Structures*, 48, 2795-2807.
- International Concrete Repair Institute. (2016). *Concrete Surface Preparation & Profiles*.
- Jang, H.-O., Lee, H.-S., Cho, K., & Kim, J. (2017). Experimental study on shear performance of plain construction joints integrated with ultra-high performance concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, 152, 16-23.
- Kamen Aicha. (2007). *Comportement au jeune âge et différé d'un BFUP écrouissant sous les effets thermomécaniques*.
- Khayat, K. H. (2023). Performance of Cost-Effective Non-Proprietary UHPC in Thin-Bonded Bridge Overlays.
- Khayat, K. H., Teng, L., & Addai-Nimoh, A. (2023). *Performance of Cost-Effective Non-Proprietary UHPC in Thin-Bonded Bridge Overlays*.
- Lachemi, M., Hossain, K. M. A., Ramcharitar, M., & Shehata, M. (2007). Bridge deck rehabilitation practices in North America. *Journal of infrastructure systems*, 13(3), 225-234.
- Lauch, K.-S. (2021). *Self-healing of fibre reinforced concretes containing various admixtures under laboratory and outdoor conditions*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Leboeuf, S. V. (2016). *Développement de joints de connexion en BFUP pour des dalles de pont préfabriquées*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Lee, M.-G., Wang, Y.-C., & Chiu, C.-T. (2007). A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material. *Construction and Building Materials*, 21(1), 182-189.
- Li, J., Wang, X., Chen, D., Wu, D., Han, Z., Hou, D., Zhen, Z., Peng, C., Ding, Q., & Yin, B. (2021). Design and application of UHPC with high abrasion resistance. *Construction and Building Materials*, 309, 125141.
- Li, J., Wu, Z., Shi, C., Yuan, Q., & Zhang, Z. (2020). Durability of ultra-high performance concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 255. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119296>
- Liu, J., Chen, Z., Guan, D., Lin, Z., & Guo, Z. (2020). Experimental study on interfacial shear behaviour between ultra-high performance concrete and normal strength concrete in precast composite members. *Construction and Building Materials*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120008>
- Louis Guingot , D. D. a. P. S. (2013). Strengthening of hydraulic structures with uhpc.
- McDonagh, F.-H.-Z. B. H. B. A. G. M. (2022). Ultra-high performance concrete (uhpc) overlays: An example of lifecycle cost analysis. <https://doi.org/10.21949/1521955>
- Ministère des Transports du Québec. (2023a). *Devis de construction et réparation des structures du MTQ Article RE-11*.
- Ministère des Transports du Québec. (2023b). *Manuel d'entretien des structures*.

- Ministère des Transports du Québec. (2023c). *Tome III – conception ouvrages d’art*.
- Ministère des Transports du Québec. (2023d). *Tome VII – Matériaux norme 3101*.
- Missemer, L. (2011). *Etude du comportement sous très hautes températures des bétons fibrés à ultra performances: application au BCV* Université de Grenoble].
- Muzenski, S., & Graybeal, B. (2023). *Structural Performance of UHPC Overlays* Third International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete,
- Oesterlee, C., Sadouki, H., & Brühwiler, E. (2008). Analyse structurale d’un pont composé de BFUP et de béton armé.
- Okuma, H. a. (2006). The first highway bridge applying ultra high strength fiber reinforced concrete in Japan. Proceedings of the 7th International Conference on Short and Medium Span Bridges, Montreal, 2006,
- Ollivier, J.-P., & Torrenti, J.-M. (2008). La structure poreuse des bétons et les propriétés de transfert. *La durabilité des bétons*, 1.
- Petitjean, J., & Resplendino, J. (2002a). Recherche et innovation-Recommandations francaises pour les betons fibres a ultra-hautes performances. La technique francaise du beton-the first fib congress 2002, October 13-19 2002, Osaka, Japan,
- Petitjean, J., & Resplendino, J. (2002b). Recommandations francaises pour les betons fibres a ultra-hautes performances. *France*.
- Piérard, J., Dooms, B., & Cauberg, N. (2012). Evaluation of durability parameters of UHPC using accelerated lab tests. Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, Germany,
- Plagué, T., Desmettre, C., & Charron, J.-P. (2017). Influence of fiber type and fiber orientation on cracking and permeability of reinforced concrete under tensile loading. *Cement and concrete research*, 94, 59-70.
- Prévost, M.-O. (2019). *Etude de la pénétration de l'eau dans le béton armé sous sollicitations mécaniques et environnementales*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Qasim, O. A., & Sultan, H. K. (2020). Experimental investigation of effect of steel fiber on concrete construction joints of prism. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,
- Ralli, Z. G. (2023). Evaluation of CSA Prequalification Procedures of UHPC Materials for Bridge Construction.
- Rebentrost, M., & Wight, G. (2009). UHPC perspective from a specialist construction company. *Proceedings of UHPFRC*.
- Rossi, P., Charron, J. P., Bastien-Masse, M., Tailhan, J.-L., Le Maou, F., & Ramanich, S. (2014). Tensile basic creep versus compressive basic creep at early ages: comparison between normal strength concrete and a very high strength fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*, 47, 1773-1785.
- Savino, V., Lanzoni, L., Tarantino, A. M., & Viviani, M. (2019). Modèle prédictif visant à optimiser les composants du BFUP en réponse aux exigences d’application. *Proceedings of the Troisième Journé d’Étude BFUP—Béton Fibré Ultra-Performant: Concevoir, Dimensionner, Construire*, Fribourg, Switzerland, 101-111.

- Semendary, A. A., Kriegl, A. J., & Svecova, D. (2022). Experimental study on bond performance at UHPC-UHPC cold joints. *Construction and Building Materials*, 344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128237>
- Sritharan, S., Doiron, G., Bierwagen, D., Keierleber, B., & Abu-Hawash, A. (2017). A UHPC Overlay for Deteriorated Bridge Decks. AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC 2017), Montpellier,
- Sritharan, S., Doiron, G., Bierwagen, D., Keierleber, B., & Abu-Hawash, A. (2018). First application of UHPC bridge deck overlay in North America. *Transportation Research Record*, 2672(26), 40-47.
- Toutlemonde, F., Renaud, J., Lauvin, L., Simon, A., Behloul, M., Bouteille, S., & Resplendino, J. (2008). Experimental validation of a ribbed UHPFRC bridge deck. *Ultra High Performance Concrete (UHPC)*, 2, 05-07.
- Toutlemonde, F. o., Foure, B., Marchand, P., Josef, F., & Professeur, U. (2009). Efforts et acquis de recherche sur les BFUP depuis 2002 en vue de l'actualisation des recommandations de l'AFGC.
- Valenza II, J. J., & Scherer, G. W. (2007). A review of salt scaling: I. Phenomenology. *Cement and concrete research*, 37(7), 1007-1021.
- Wibowo, H., & Sritharan, S. (2018). *Use of ultra-high-performance concrete for bridge deck overlays*.
- Winkler, P. (2013). Selecting and Specifying Concrete Surface Preparation for Sealers, Coatings, Polymer Overlays, and Concrete Repair. *Internation Concrete Repair Institute*.
- Yang, J., Chen, B., Su, J., Xu, G., Zhang, D., & Zhou, J. (2022). Effects of fibers on the mechanical properties of UHPC: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(3), 363-387.
- Zhang, B., Yu, J., Chen, W., Sun, H., Chen, S., & Wang, H. (2022). Interfacial properties between ultra-high performance concrete (UHPC) and steel: From static performance to fatigue behavior. *Engineering Structures*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115145>
- Zhang, X., Liu, Z., & Wang, F. (2019). Autogenous shrinkage behavior of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 226, 459-468.