POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Réparations minces de parapets de ponts avec des bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP)
Auteur: Author:	Nicolas Charette
Date:	2017
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Charette, N. (2017). Réparations minces de parapets de ponts avec des bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/2709/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/2709/
Directeurs de recherche: Advisors:	Jean-Philippe Charron
Programme: Program:	Génie civil

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

RÉPARATIONS MINCES DE PARAPETS DE PONTS AVEC DES BÉTONS FIBRÉS À ULTRA-HAUTES PERFORMANCES (BFUP)

NICOLAS CHARETTE

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE, ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE CIVIL)

AOÛT 2017

© Nicolas Charette, 2017.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

RÉPARATIONS MINCES DE PARAPETS DE PONTS AVEC DES BÉTONS FIBRÉS À ULTRA-HAUTES PERFORMANCES (BFUP)

présenté par : CHARETTE Nicolas

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

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

M. MASSICOTTE Bruno, Ph. D., président

M. CHARRON Jean-Philippe, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. MORIN Richard, M.Sc., membre

DÉDICACE

À ma mère Josée et mon père Yves

REMERCIEMENTS

Ce projet n'aurait pas été ce qu'il est sans l'aide de plusieurs personnes.

Tout d'abord je souhaite remercier Jean-Philippe Charron, mon directeur de projet, pour sa présence, ses connaissances et ses conseils qui ont été d'une aide inestimable pour la réalisation de mon projet.

Je souhaite aussi remercier les personnes du Groupe de Recherche en Génie des structures de Polytechnique (GRS), soit Cédric Androuet, David Ek, Patrice Bélanger et Xavier Willem pour leur soutien et leur minutie durant ma phase expérimentale, mais également pour leur enthousiasme pour les projets des étudiants. Je désire aussi remercier Anne-Marie Goulet et Julie Dallaire, secrétaires du GRS, pour leur assistance, leur gentillesse et leur écoute.

Je tiens à mentionner l'équipe de Béton Brunet de Valleyfield pour leur travail en ce qui concerne la fabrication des parapets. Plus particulièrement, je souhaite remercier Martin Montpetit pour son intérêt dans le domaine de la recherche et Christian Dumaresque pour son expertise en fabrication.

Durant mon projet, j'ai eu la chance de travailler avec d'autres étudiants qui ont aidé dans sa réalisation. Je veux remercier Amadou Thiaw pour son aide technique et ses questionnements réfléchis, Yvana Jurcova pour son aide inestimable concernant le logiciel d'éléments finis et Martin Pharand, étudiant du programme UPIR, qui m'a grandement aidé durant mes tests en laboratoire.

Le projet n'aurait jamais été aussi plaisant sans l'aide et la camaraderie partagée avec mes collègues, soient : Benoit Marleau, Guillaume Toutant, Karl Augé, Frédéric Lachance, Olivier Joliecoeur, Sébastien Verger Leboeuf et plusieurs autres.

Finalement, je souhaite remercier ma famille, principalement ma mère Josée et mon père Yves, pour leur soutien, leur aide et leurs encouragements apportés et particulièrement mon père pour avoir lu et relu mon mémoire. Pour terminer, je remercie de tout mon cœur ma conjointe Amélie de m'avoir soutenu, encouragé et aimé tout au long du projet.

RÉSUMÉ

Le Canada possède un vaste réseau d'infrastructures routières. Cependant, dû à leur âge grandissant, un sous-investissement dans les années 89 à 90 et des conditions climatiques agressives, ceux-ci vont nécessiter dans les prochaines années des investissements majeurs pour leur remplacement ou leur réhabilitation. Ainsi, il devient intéressant d'effectuer des réparations durables et performantes pour le reste de la vie utile des ouvrages. Cependant, les réparations minces sont sensibles au problème de retrait restreint, tel que dans les parapets de ponts, ce qui peut mener à une fissuration précoce de la réparation et affecter négativement leur durabilité et leur efficacité à long terme.

Il est pertinent de considérer les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) pour des réparations minces. Ces bétons possèdent des propriétés mécaniques très élevées (résistance à la compression et à la traction), un comportement qui peut être écrouissant en traction et une excellente durabilité en service. Ces facteurs font en sorte que les BFUP possèdent un grand potentiel pour des réparations en béton durable. Le présent projet a pour objectif d'étudier la performance d'un BFUP pour la réparation de parapets de ponts.

Le projet est séparé en 3 phases : un programme expérimental préliminaire, un programme expérimental principal et une étude paramétrique numérique.

Le programme expérimental préliminaire a été réalisé pour confirmer le comportement en retrait restreint d'un BFUP contenant 4% de fibre droite de 10 mm de long dans des conditions de restreinte similaire à celles anticipées sur le parapet. Cela a permis d'observer que le BFUP a la capacité d'éviter la formation de macrofissures et peut être utilisé pour effectuer des réparations durables comparativement à un béton à hautes performances (BHP).

La seconde phase, l'étude expérimentale principale, avait pour objectif d'évaluer le comportement mécanique et déformationnel de parapets réparés. Deux parapets avec trottoir tel qu'utilisé par la Ville de Montréal ont été fabriqués. Le premier a été réparé avec une couche de 30 mm de BHP et le second avec une couche de 30 mm de BFUP. Afin d'améliorer le comportement en service, les réparations ont été encastrées à la base dans le trottoir sur une profondeur de 50 mm. Une cure avec un écoulement d'eau permanent a été appliquée pendant 7 jours. La section de parapet utilisé est

identique à celle utilisée dans un projet précèdent. Cela a ainsi permis de réutiliser les résultats mécaniques de l'essai de chargement effectué sur le parapet sans réparation (parapet de référence).

Lors des essais de retrait restreint, les déformations dans les parapets réparés ont été mesurées pendant 2 mois à l'aide de capteurs de déformation et de température installés dans la réparation et dans le parapet. Il a été observé que les déformations au jeune âge sont principalement causées par le retrait endogène, les effets thermiques ainsi que l'application de la cure (absorption d'eau). À moyen terme, les déformations sont principalement causées par le retrait endogène et de séchage. Des déformations 11 % plus élevées dans le BFUP par rapport au BHP ont été mesurées à 30 jours. Aucune fissuration ne s'est toutefois développée à court terme dans les deux parapets, ce qui démontre l'efficacité de la cure employée.

Pour les essais mécaniques de chargement sur les parapets réparés, une charge a été appliquée horizontalement à 700 mm au-dessus du trottoir à l'aide d'un vérin hydraulique. Les déplacements ont été mesurés à l'aide de capteurs installés en surface et les déformations sur quelques barres d'armature coulées dans le parapet. Les essais sont réalisés sur les parapets réparés en BHP et en BFUP jusqu'avant la rupture des parapets. Les résultats d'un parapet non réparé effectué dans un projet précédent ont été utilisés comme référence. L'encoche formée par la réparation du parapet dans le trottoir a permis d'augmenter la force de fissuration, d'améliorer la rigidité en service, mais n'a pas eu d'effet sur la résistance à l'ultime. Le parapet réparé en BFUP a présenté une rigidité supérieure ainsi qu'une faible augmentation de la résistance à l'ultime. Le BHP, pour sa part, a présenté un comportement similaire au parapet de référence. Les deux parapets réparés ont présenté une résistance supérieure à la charge de conception pondérée telle que donnée par la norme CSA S6-14. La résistance à l'interface des deux bétons a été excellente grâce à une bonne préparation de surface (surface à granulats exposés et surface séchée sec), car aucune délamination n'a été observée.

Pour la dernière phase, le comportement déformationnel des parapets réparés a été reproduit numériquement par éléments finis avec le logiciel DIANA 3D. Les essais ont été réalisés pour un béton ordinaire (BO), un BHP, un béton renforcé de fibres (BRF) et un BFUP. Les résultats des essais de caractérisation sur les matériaux de projets précédents ont été utilisés pour le BO et le BRF. Des modèles simplifiés ont été utilisés pour calibrer l'hydratation des bétons, le retrait, le fluage et le comportement mécanique en traction. Toutes ces lois de comportement ont été par la

suite intégrées à un modèle complet d'un parapet réparé. Les résultats des essais de retrait restreint des parapets réparés avec du BHP et BFUP ont été utilisés pour calibrer le modèle. Cela a permis par la suite de réaliser des études numériques où l'influence des cycles de température journaliers et saisonniers a été évaluée. Les données météorologiques de la station de l'aéroport Pierre Elliott Trudeau de Montréal ont été utilisées pour la calibration des cycles de température.

Il a été mesuré que les cycles de température saisonniers ont augmenté d'un peu plus de 3 fois les déformations dans le parapet. Par contre, ces déformations sont uniformes partout dans le parapet, ce qui n'a pas beaucoup d'impact sur la fissuration. Pour leurs parts, les cycles de température journaliers ont affecté principalement le béton en surface, ce qui a favorisé la formation de fissures dans les parapets. La fissuration s'est initiée à environ 10 jours dans le cas du BO et du BRF, et à 30 jours dans le cas du BHP. Dû à sa résistance élevée en traction, le BFUP n'a jamais fissuré dans toutes les situations évaluées. Au niveau du patron de fissuration, une fissuration au jeune âge telle que dans le BO et le BRF a causé la formation de petites fissures rapprochées, tandis que dans le BHP, les fissures étaient à une distance moyenne de 200 mm et affichaient une ouverture plus grande. Cependant, dû à l'action des fibres dans le BRF, l'ouverture maximale des fissures est demeurée inférieure à 0.05 mm, un seuil où le transport d'eau et des agents agressifs est très limité au droit d'une fissure. Ainsi, le BRF possède une très bonne durabilité et le BFUP une excellente perspective de durabilité. Ces bétons offrent donc un très bon potentiel pour des réparations minces sur des parapets de pont.

Ainsi, les essais mécaniques et numériques ont permis de démontrer la performance exceptionnelle du BFUP pour des réparations minces sur des parapets de ponts. Celui-ci ne nécessite pas d'exigence de réalisation supplémentaire par rapport à un béton conventionnel pour sa mise en place et est autoplaçant. Malgré des déformations plus élevées par rapport aux autres bétons, son comportement viscoélastique et sa résistance très élevée en traction permettent d'éviter la formation de macrofissures. Le BFUP a permis d'augmenter la durabilité en service et a aussi amélioré le comportement mécanique à l'ultime du parapet réparé. En conclusion, le BFUP est un matériau de réparation très performant.

ABSTRACT

Canada has a vast network of road infrastructures. However, due to their increasing age, an underinvestment in the eighties and nineties and aggressive climate conditions, many structure are going to require major investments in the upcoming years for their replacement or their rehabilitation. As such, it is important to repair them sustainably and successfully for the reminder of their service life. However, thin repairs are sensitive to restrained shrinkage such as in bridges parapets, which can lead to premature cracking of the concrete repair and can negatively affect their durability and their long-term efficiency.

Thus, it is relevant to consider ultra-high performances fibre reinforced concretes (UHPFRC) for thin repairs. These concretes have very high mechanical properties (compression and tensile strength), a strain hardening behavior under tensile loads and an excellent durability in service state. These factors give UHPFRC a great potential for long-lasting concrete repairs. The present project had for objective to study the performance of UHPFRC for the repair of bridges parapets.

The project is separated in 3 phases: a preliminary experimental program, a main experimental program and a numerical parametric study.

The preliminary experimental program was realized to study the restrained shrinkage behavior for a UHPFRC containing 4 % of 10 mm straight fibers in similar restrained shrinkage conditions as those expected on the parapet. This allowed to observe that UHPFRC has the capacity to avoid the formation of localized cracks and can be used to make sustainable repairs compared to a high-performance concretes (HPC).

The second phase, the main experimental study, had for objective to estimate the mechanical behavior and deformations of repaired parapets. Two parapets with a sidewalk such as the ones used by the City of Montreal were fabricated. The first one was repaired with a thin layer of 30 mm of HPC and the second with a layer of 30 mm of UHPFRC. To improve the behavior in service state, the repairs were embedded at the base of the sidewalk to a depth of 50 mm. A curing procedure with a permanent water flow was applied for 7 days. The section of parapet used is identical to the one used in a previous project. It allowed to reuse the mechanical results for the load tests made on a parapet without repair (reference parapet).

During the restrained shrinkage test, the deformations in the repaired parapets were measured for 2 months by means of deformation and temperature sensors installed in the repaired section and in the parapet itself. It was observed that the deformations at early ages were mainly caused by the autogeneous shrinkage, the thermal effects as well as the application of the curing procedure (absorption of water). In medium term, the deformations were mainly caused by the autogeneous and drying shrinkages. The measured deformations at 30 days were 11 % higher in the UHPFRC compared to the HPC. However, no cracking developed in the short term in both parapets, which shows the efficiency of the curing process used.

For the mechanical tests on repaired parapets, a load was applied horizontally 700 mm over the sidewalk with a hydraulic actuator. The displacements were measured by sensors installed on the surface and on some steel bars located into the parapets. The load was applied on both the parapet repaired with HPC and UHPFRC up to the mechanical failure of the parapets. The results of a parapet with no repair tested in a previous project were used as a reference. The embedded repair in the sidewalk allowed to increase the cracking strength and improved the rigidity of the parapets in service state, but had no effect on the resistance in the ultimate state. The parapet repaired with UHPFRC parapet presented a superior rigidity, as well as a small increase of the resistance in ultimate state. The parapet repaired with HPC presented a behavior similar to the reference parapet. Both repaired parapets had resistance largely superior to the factored design load given by the standard CSA S6-14. The resistance at the interface of both concretes repairs was excellent thanks to a good surface preparation (surface with exposed aggregates and a saturated dry surface). No delamination of the interface was observed after testing.

For the last phase, the deformation behavior of repaired parapets was numerically reproduced by finite elements models with the software DIANA 3D. The models were realized for a normal concrete (NC), a HPC, a fiber reinforced concrete (FRC) and a UHPFRC. The mechanical properties measured in previous projects were used to provide information concerning the NC and the FRC. Simplified finite elements models were initially carried out to calibrate the hydration, shrinkage, creep and tensile deformation behaviors of the various concretes. These behaviors were afterwards joined into a complex and complete model of a repaired parapet. The experimental results for the restrained shrinkage tests done on the parapets repaired with HPC and UHPFRC were then used to calibrate the complete model. This allowed to realize a parametric study where the influence of the daily and seasonal temperature cycles on the parapet deformations are

estimated. The meteorological data of the Pierre Elliott Trudeau airport weather station were used to calibrate the temperature cycles.

It was demonstrated that the seasonal temperature cycles increased the deformations in the parapet by 3 times compared to a constant temperature. On the other hand, these deformations are uniform everywhere in the parapet and don't have major impact on the concrete cracking. Furthermore, the daily temperature cycles mainly affected the concrete surface layer, and caused an increase of the stress due the restrained shrinkage. Concrete cracking initiated at about 10 days for the NC and FRC and at 30 days for the HPC. Due to its high tensile strength, the UHPFRC had no cracking in all cases tested. Regarding the cracking patterns observed, when the cracking begins at a young age such as in the NC, the cracks were closer to each other and had a smaller opening (0.15 mm at 180 days). Whereas when the cracking initiated at medium to long term such as in the HPC, the cracks where spread further apart (at about 200 mm) and had larger openings (0.39 mm at 180 days). Due to the action of the steel fibers in the FRC, the maximal opening of cracks remained lower than 0.05 mm, a threshold where the transport of water and aggressive agents is critically reduced. As the FRC has a very good durability and the UHPFRC an excellent durability, these concretes will offer a very good potential for thin repairs of bridge parapets.

The mechanical and numerical tests allowed to demonstrate the exceptional performance of UHPFRC for thin repairs on bridges parapets. This concrete does not require additional steps or preparation on work sites for the casting with regard to a normal concrete, and UHPFRC is normally self-leveling. In spite of higher deformations compared to the other concretes, its tensile creep behavior and its very high tensile strength allows to avoid formation of macro-cracks. UHPFRC allows to increase the durability in service state and also improves the mechanical behavior in the ultimate state of the repaired parapets. In conclusion, UHPFRC is a very successful material for thin repair.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VIII

TABLE DES MATIÈRES XI

LISTE DES TABLEAUX XVI

LISTE DES FIGURES XVIII

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SYMBOLES XXVI

LISTE DES ANNEXES XXX

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 Contexte 1

1.2 Objectifs et portée 3

1.3 Méthodologie 4

1.3.1 Étude expérimentale 4

1.3.2 Étude numérique 5

1.4 Organisation du mémoire 6

CHAPITRE 2 REVUE DE LA DOCUMENTATION SUR LES BÉTONS FIBRÉS À ULTRA-HAUTES PERFORMANCES 7

2.1 Principes majeurs du BFUP 7

2.2 Constituants du BFUP 8

2.3 Propriétés générales du BFUP 10

2.3.1 Hydratation 10

2.3.2 Propriétés mécaniques 10
2.3.3 Comportement en traction 11
2.3.4 Retrait 14
2.3.5 Fluage 15
2.3.6 Faible porosité 15
2.3.7 Autocicatrisation du béton 16
2.3.8 Durabilité 17
2.4 Utilisation du BFUP 20
2.5 Conclusions 20
CHAPITRE 3 REVUE DE LA DOCUMENTATION DU COMPORTEMENT DÉFORMATIONNEL DES RÉPARATIONS 22
3.1 Comportement déformationnel du béton 22
3.1.1 Retrait 22
3.1.2 Fluage 27
3.2 Réparation en béton 34
3.2.1 Choix des matériaux de réparation 35
3.2.2 Préparation de la surface 38
3.2.3 Essais de caractérisation de l'interface 40
3.3 Cas type – Déformation d'une poutre avec réparation mince en BFUP 43
3.3.1 Fabrication 43
3.3.2 Paramètres d'essais 45
3.3.3 Résultats déformationnels au jeune âge 45
3.4 Conclusions 48
CHAPITRE 4 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE PRÉLIMINAIRE 50
4.1 Développement d'un essai de retrait restreint 50

4.1.1 Concept du degré d'entrave 50
4.1.2 Conception de l'essai de retrait restreint 53
4.2 Fabrication du montage de l'essai de retrait restreint 68
4.3 Programme expérimental 68
4.4 Coffrage 69
4.5 Coulée et cure du béton 71
4.6 Essais de caractérisation 72
4.7 Procédure d'analyse de la fissuration 77
4.8 Résultats et analyse 78
4.9 Conclusions 83
CHAPITRE 5 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL PRINCIPAL 85
5.1 Programme expérimental 85
5.2 Conception et fabrication des parapets 86
5.2.1 Conception 86
5.2.2 Fabrication 88
5.3 Évaluation des propriétés des bétons 104
5.3.1 Caractérisation des bétons du parapet 104
5.3.2 Caractérisation de la réparation des parapets 106
5.4 Évaluation du comportement déformationnel des parapets 108
5.4.1 Instrumentation des essais de retrait restreint sur parapets 108
5.4.2 Procédure expérimentale des essais de retrait restreint sur parapets 113
5.4.3 Résultats et analyse des essais de retrait restreint sur parapets 113
5.5 Évaluation du comportement mécanique des parapets 120
5.5.1 Montage expérimental pour les essais mécaniques sur parapets 120

5.5.2 Instrumentation pour les essais mécaniques sur parapets 123

5.5.3 Résultats et analyse des essais mécanique sur parapets 130

5.6 Conclusions 139

5.6.1 Essais de retrait restreint sur parapets 140

5.6.2 Essais mécaniques sur parapet 141

CHAPITRE 6 ÉTUDE NUMÉRIQUE 142

6.1 Modélisation du comportement déformationnel des bétons 143

6.1.1 Bétons étudiés 143

6.1.2 Chaleur d'hydratation.....144

6.1.3 Retrait 149

6.1.4 Fluage 153

6.1.5 Comportement en traction.....159

6.2 Modélisation et calibration du parapet réparé 165

6.2.1 Modélisation du parapet 165

6.2.2 Calibration des modèles de parapets réparés.....170

6.3 Étude paramétrique 174

6.3.1 Béton de réparation étudiés 175

6.3.2 Description des modèles numériques 175

6.3.3 Résultat de l'étude paramétrique.....176

6.4 Conclusions 192

6.4.1 Reproduction des essais en laboratoire 192

6.4.2 Limites des modélisations 193

6.4.3 Étude paramétrique sur l'impact des bétons de réparation et des conditions thermique 193

CHAPITRE 7 CONCLUSION 195

7.1 Rappel des objectifs 195

7.2 Rétrospective 196

7.2.1 Comportement déformationnel des parapets 196

7.2.2 Comportement mécanique des parapets 197

7.2.3 Essais numériques 198

7.3 Recommandations 199

7.3.1 Évaluation en laboratoire et modélisation associée 199

7.3.2 Réparation en béton 200

7.4 Conclusion générale 201

RÉFÉRENCES 202

ANNEXES 206

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Composition de différents types de béton et leurs propriétés (Charron et al. 2013) 9

Tableau 2.2 Taux d'autocicatrisation pour le BO et BFUP en fonction du temps (Charron et al. 2013) 17

Tableau 2.3 Indicateurs de durabilité en condition non fissurée (Charron et al. 2013) 18

Tableau 2.4 Indicateurs de durabilité pour différents niveaux de fissuration (Charron et al. 2013) 19

Tableau 3.1 Propriétés mécaniques générales du béton de substrat (Bastien-Masse 2010) 44

Tableau 3.2 Niveau de restreint induit par le retrait dans les réparations (Bastien-Masse 2010) ..47

Tableau 4.1 Position des barres d'armature longitudinale dans le parapet de référence 55

Tableau 4.2 Degré d'entrave de la poutre réparée simplifiée en fonction du temps avec et sans considération des armatures dans le parapet 60

Tableau 4.3 Hauteur requise de béton en fonction de la section d'acier évaluée 63

Tableau 4.4 Paramètres pour le calcul du degré d'entrave en fonction du temps pour un BFUP ..66

Tableau 4.5 Contrainte générée dans le BFUP en fonction de sa résistance en traction....67

Tableau 4.6 Composition des bétons étudiés et leurs propriétés à l'état frais 69

Tableau 4.7 Résultats des essais de caractérisation des bétons étudiés 75

Tableau 4.8 Longueur moyenne des fissures dans les BFUP 80

Tableau 5.1 Propriétés mécaniques des bétons pour chaque spécimen fabriqué 105

Tableau 5.2 Propriété mécanique des lots d'armature utilisés....106

Tableau 5.3 Propriétés mécaniques des bétons de réparation utilisés....107

Tableau 5.4 Capteurs utilisés pour les essais en retrait restreint....109

Tableau 5.5 Capteurs utilisés pour les essais mécaniques 125

Tableau 6.1 Propriétés mécaniques des bétons étudiés....143

Tableau 6.2 Composition des bétons étudiés 144

Tableau 6.3 Capacité et conductivité thermiques des bétons étudiés 148

Tableau 6.4 Facteurs convectifs en fonction du temps pour les différents matériaux de peau du modèle 169

Tableau A.1 Espacement minimal entre les goujons en béton en fonction de leur diamètre.....209

Tableau B.1 Essais de caractérisation réalisés à différents intervalles 211

Tableau B.2 Cure appliquée pour les essais préliminaires en fonction des bétons.....213

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Endommagement dans le béton 1

Figure 1.2 Parapet avec trottoir étudié 3

Figure 2.1 Évolution des propriétés de base en fonction du degré de réaction (De Schutter et al. 1996) 11

Figure 2.2 Comportement déformationnel d'un béton ordinaire en traction (Bernard 2000) 12

Figure 2.3 Comportement déformationnel en traction d'un béton de fibres standard et d'un BFUP (Naaman 2003) 13

Figure 2.4 Comparaison du comportement déformationnel de bétons en fonction de leur résistance en traction (Charron et al. 2013) 14

Figure 2.5 Retrait dans le BFUP (Loukili 1996) 15

Figure 3.1 Schématisation de la différence entre le retrait chimique et endogène (Charron 2003) 23

Figure 3.2 Comparaison entre le retrait chimique et endogène (Holt 2001) 24

Figure 3.3 Mécanisme de la dépression capillaire (Charron 2003) 25

Figure 3.4 Évolution du retrait en fonction du rapport E/C (Holt 2001) 27

Figure 3.5 Évolution du fluage en fonction du temps 28

Figure 3.6 Montage pour essais de fluage en compression (Habel 2004) 30

Figure 3.7 Montage pour essais de fluage en traction (Bissonnette et al. 2007) 31

Figure 3.8 Fluage spécifique en fonction de la teneur en ciment (Bissonnette et al. 2007) 33

Figure 3.9 Fluage spécifique en fonction de différents types de fibres et quantités (Bissonnette et al. 2007) 34

Figure 3.10 Facteurs de compatibilité entre la réparation et le substrat (Vaysburd 2006) 35

Figure 3.11 Rugosité en fonction de différentes méthodes de préparation de surface (Bissonnette et al. 2006) 38

Figure 3.12 Niveau de fissuration et résistance en traction en fonction de différentes méthodes de préparation de surface (Bissonnette et al. 2006) 39

Figure 3.13 Schématisation de différents essais de caractérisation de la résistance d'une réparation (Momayez et al. 2005) 42

Figure 3.14 Plan de la poutre étudiée sans réparation (Bastien-Masse 2010).....43

Figure 3.15 Séquence de démolition de la surface de réparation (Bastien-Masse 2010).....44

Figure 3.16 Plan d'instrumentation des poutres réparées et condition d'appuis (Bastien-Masse 2010).....45

Figure 3.17 Déformation et flèche dans les poutres réparées en BO et en BFUP (Bastien-Masse 2010).....46

Figure 3.18 Déformation à long terme dans les poutres réparées en BO et en BFUP (Bastien-Masse 2010).....47

Figure 3.19 Flèche à long terme dans la poutre de référence et les poutres réparées (Bastien-Masse 2010).....48

Figure 4.1 Analyse sectionnelle des contraintes longitudinales d'une poutre hybride (Bernard 2000) 50

Figure 4.2 Méthodologie de conception de l'essai préliminaire.....54

Figure 4.3 Parapet de référence pour le programme d'étude préliminaire.....54

Figure 4.4 Plan du parapet réparé simplifié 56

Figure 4.5 Diagramme des étapes de résolution pour choix de la section d'acier.....56

Figure 4.6 Déformation attendu en retrait restreint en fonction de la longueur de la poutre 62

Figure 4.7 Retraits dans le BFUP en fonction du temps (Bastien-Masse 2010).....65

Figure 4.8 Plan d'usinage de la poutre pour essais préliminaires.....68

Figure 4.9 Plan du coffrage de la poutre d'acier pour essais préliminaires.....70

Figure 4.10 Plateforme de bois devant section d'acier complètement coffrée lors de l'essai.....70

Figure 4.11 Montage pour évaluer en laboratoire le module de Young et de Poisson d'un béton.73

Figure 4.12 Montage de l’essai brésilien pour évaluer la résistance en traction au laboratoire.....73

Figure 4.13 Montage pour évaluer la résistance des BFUP en traction directe 74

Figure 4.14 Comportement déformationnel en traction directe des BFUP.....76

Figure 4.15 Crackscope de Germann Instruments 78

Figure 4.16 Patron des fissurations dans les trois bétons étudiés.....79

Figure 4.17 Ouverture des fissures dans le BHP en fonction du temps 81

Figure 4.18 Épaisseur du béton coulé sur les sections d'acier en fonction de la longueur.....82

Figure 5.1 Parapet avec trottoir type en milieu urbain (Ville de Montréal, 2012).....86

Figure 5.2 Parapet simplifié 87

Figure 5.3 Préparation des interfaces entre les différentes sections de bétons 89

Figure 5.4 Préparation de l'armature et des coffrages pour la coulée de la dalle 91

Figure 5.5 Barre pour la manutention des spécimens avant la coulée de la dalle 91

Figure 5.6 Positionnement des tubes pour barres d'ancrage 92

Figure 5.7 Cure humide après la coulée de la dalle 93

Figure 5.8 Tube d’acier d’acier dans le coffrage pour former l’encoche dans le trottoir 94

Figure 5.9 Surface nivelée suite à la coulée du trottoir.....95

Figure 5.10 Coffrage d'acier installé en vue de la coulée du parapet.....96

Figure 5.11 Installation des capteurs coulés en place dans la réparation au niveau de la surépaisseur 97

Figure 5.12 Coulée de la réparation en BHP.....99

Figure 5.13 Poutres en bois tenues en étaux afin de corriger le bombement dans coffrage avant du parapet 99

Figure 5.14 Surface de la réparation en BHP après le décoffrage 100

Figure 5.15 Épaisseur de la réparation en BHP au niveau de la surface avant du parapet 101

Figure 5.16 Coffrage renforcé pour la réparation en BFUP.....102

Figure 5.17 Coulée de la réparation en BFUP 103

Figure 5.18 Surface de la réparation en BFUP après le décoffrage 103

Figure 5.19 Courbes contraintes déformations pour les essais en traction sur prisme en forme d'os pour le BFUP 108

Figure 5.20 Schéma des parties du capteur de déformation optique de marque SOFO 109

Figure 5.21 Unité de lecture portative des capteurs SOFO 111

Figure 5.22 Position des capteurs coulés en place dans les spécimens 111

Figure 5.23 Sortie des fils des capteurs coulés en place sur le bord du parapet 112

Figure 5.24 Température mesurée dans le parapet réparé en BHP après l'application de la réparation 115

Figure 5.25 Température mesurée dans le parapet réparé en BFUP après l'application de la réparation 116

Figure 5.26 Évolution des déformations dans les capteurs SOFO dans le parapet réparé en BHP 117

Figure 5.27 Évolution des déformations dans les capteurs SOFO dans le parapet réparé en BFUP 118

Figure 5.28 Microfissures sur la face avant du parapet réparé en BFUP 119

Figure 5.29 Montage en laboratoire pour évaluation du comportement mécanique des parapets (Thiaw 2014) 121

Figure 5.30 Contrepoids relié aux câbles soutenant le vérin 122

Figure 5.31 Dispositif de transmission de charge sur la surface avant du parapet 123

Figure 5.32 Cadres d'instrumentation installés sur le parapet pour l'essai mécanique 124

Figure 5.33 Capteurs installés à l'avant du parapet visible par la droite 126

Figure 5.34 Capteurs installés devant le parapet visible par la gauche 127

Figure 5.35 Capteurs installés à l'arrière du parapet 127

Figure 5.36 Capteur installé devant le trottoir 128

Figure 5.37 Position des jauges installées sur les armatures 129

Figure 5.38 Force appliquée sur les parapets en fonction de la flèche horizontale 131

Figure 5.39 Force appliquée sur le parapet en fonction de la déformation moyenne mesurée dans les armatures 132

Figure 5.40 Force appliquée en fonction du soulèvement à la base du parapet 133

Figure 5.41 Force appliquée sur le parapet en fonction du décollement de la réparation 134

Figure 5.42 Force appliquée en fonction de l'ouverture des fissures sur la surface avant du parapet 135

Figure 5.43 Force appliquée en fonction de l'ouverture des fissures verticales à l'arrière du parapet 135

Figure 5.44 Patron de fissuration dans les parapets réparés pour une force appliquée de 250 kN 136

Figure 5.45 Patron de fissuration dans les parapets réparés à l’arrêt des essais mécaniques 137

Figure 5.46 Carottes de béton prélevées dans le bas des parapets 138

Figure 5.47 Fissurations dans le trou de forage de la carotte prélevé dans le parapet réparé en BHP 139

Figure 6.1 Calorimètre 145

Figure 6.2 Courbes adiabatiques des bétons étudiés 146

Figure 6.3 Modèle pour calibration de l’hydratation du béton 147

Figure 6.4 Validation de l’échauffement des bétons des modèles numériques 149

Figure 6.5 Position du capteur dans un cylindre de béton pour l’essai de retrait 150

Figure 6.6 Retrait expérimental dans les bétons étudiés pour différentes mises à zéro 151

Figure 6.7 Maillage du modèle des essais de calibration du retrait 152

Figure 6.8 Retrait considéré pour l’étude paramétrique 153

Figure 6.9 Montage pour essais de fluage en compression 154

Figure 6.10 Résultat des essais de fluage en compression 155

Figure 6.11 Comportement équivalent d'une chaîne de Kelvin 156

Figure 6.12 Maillage du modèle des essais de fluage en compression 157

Figure 6.13 Comparaison du fluage spécifique numérique et expérimental 158

Figure 6.14 Fluage spécifique considéré pour les bétons étudiés 159

Figure 6.15 Comportement en traction simplifié des bétons étudiés 161

Figure 6.16 Comparaison du comportement en traction des bétons étudiés entre les valeurs expérimentales et modélisées 164

Figure 6.17 Évolution dans le temps du comportement mécanique du BHP et du BRF 164

Figure 6.18 Maillage et matériaux associés dans le modèle du parapet 166

Figure 6.19 Déplacement et rotation bloqués dans le parapet modélisé 167

Figure 6.20 Surfaces convectives appliquées en surface des parapets. 168

Figure 6.21 Calibration des résultats de température du parapet réparé en BHP 171

Figure 6.22 Calibration des résultats thermiques du parapet réparé en BFUP 172

Figure 6.23 Calibration du comportement déformationnel du parapet réparé en BHP 173

Figure 6.24 Calibration du comportement déformationnel du parapet réparé en BFUP 174

Figure 6.25 Évolution de la température dans le temps pour les études paramétriques 176

Figure 6.26 Profils thermiques causés par l'hydratation du béton en condition de *Tvariable* 178

Figure 6.27 Profils thermiques causés par l'hydratation du béton en condition de *Tconstante* 179

Figure 6.28 Profil thermique dans le BFUP à 30 jours aux conditions thermiques maximales 180

Figure 6.29 Déformation dans la réparation pour les bétons étudiés 182

Figure 6.30 Contraintes au centre du parapet réparé en BO en fonction du temps 183

Figure 6.31 Contraintes au centre du parapet réparé en BHP en fonction du temps 184

Figure 6.32 Contraintes au centre du parapet réparé en BRF en fonction du temps 184

Figure 6.33 Contraintes au centre du parapet réparé en BFUP en fonction du temps 185

Figure 6.34 Contraintes horizontales dans le parapet réparé en BO à 30 jours 186

Figure 6.35 Contraintes horizontales dans le parapet réparé en BHP à 30 jours 186

Figure 6.36 Contraintes horizontales dans le parapet réparé en BRF à 30 jours 187

Figure 6.37 Contraintes horizontales dans le parapet réparé en BFUP à 30 jours 187

Figure 6.38 Contraintes horizontales dans la coupe transversale du parapet réparé en BHP à 180 jours 189

Figure 6.39 Contrainte horizontale dans la coupe transversale du parapet réparé en BFUP à 180 jours en condition froide. 189

Figure 6.40 Ouverture des fissures en fonctions du temps 190

Figure 6.41 Patron de fissuration à 180 jours à température ambiante constante 191

Figure A.1 Cas de chargement à valider pour la conception des goujons 206

Figure A.2 Hypothèse de calcul de la distribution des efforts dans les goujons 207

Figure C.1 Plan général – Vue en coupe 214

Figure C.2 Plan général - Vue en plan 215

Figure C.3 Plan d'armature dalle - Vue en plan 216

Figure C.4 Plan d'armature dalle et trottoir - Vue en coupe 217

Figure C.5 Plan d'armature parapet - Vue en coupe 218

Figure C.6 Plan d'armature parapet – Vue de face 219

Figure C.7 Plan de la réparation - Vue en coupe 220

Figure C.8 Plan des armatures types 1 221

Figure C.9 Plan d'armatures types 2 222

Figure D.1 Plan d'instrumentation pour ouverture des fissures 223

Figure D.2 Plan d'instrumentation pour glissement et soulèvement 224

Figure D.3 Plan d'instrumentation vue de face 225

Figure D.4 Plan d'instrumentation vue de dos 226

Figure D.5 Plan d'instrumentation des barres d'armature.....227

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SYMBOLES

ABRÉVIATIONS

ACI	*American Concrete Institute*
ARR	Adjuvant réducteur de retrait
ASTM	*American society for testing and materials*
BO	Béton ordinaire
BFHP	Béton fibré à hautes performances
BFUP	Béton fibré à ultra-hautes performances
BRF	Béton renforcé de fibres
CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
CSA	Association canadienne de normalisation (*Canadian Standards Association*)
CSH	Silicates de calcium hydratés
DIANA	*Displacement Analyser* (logiciel d'éléments finis)
E/C	Rapport eau sur ciment
GRS	Groupe de Recherche en génie des Structure de l'école Polytehcnique
LVDT	*Linear Variable Differential Transformer*
NC	*Normal and rapidly hardening cements*
RH	Degré d'humidité
RILEM	Réunion internationale des laboratoires et experts des matériaux
SL	*Slowly hardening cements*
SOFO	Surveillance d'ouvrage par fibres optiques

SYMBOLES

A	Aire
B	Largeur total de la section d'acier
cdg	Centre de gravité
C_1	Paramètres de calibration de la courbe d'Hordjick
C_2	Paramètres de calibration de la courbe d'Hordjick
C_V	Capacité thermique
D	Hauteur total de la section d'acier, Diamètre
E	Module élastique du béton (aussi appelé module de Young)
f_c	Résistance à la compression du béton
f_{sp}	Résistance en traction indirecte
f_t	Résistance à la traction du béton
F_u	Contrainte à l'ultime de l'acier
F_y	Contraint élastique maximal de l'acier
G_f	Énergie de fracturation du béton
h	Hauteur, Longueur caractéristique de fissuration
H_T	Chaleur total d'hydratation
I	Inertie sectionnelle
J	Fluage spécifique
L	Longueur du cylindre pour essai Brésilien
L_a	Longueur active de mesure dans le capteur SOFO
L_p	Longueur passive dans le capteur SOFO
M_c	Moment appliqué à l'élément en béton réparé
N_c	Force axial en compression appliqué à l'élément en béton réparé

N_t	Force axial en traction causé par le retrait du béton appliqué à la réparation
P	Charge de rupture pour essai Brésilien
p	Ratio d'armature
T	Température
t	Temps
t_f	Épaisseur de l'aile (section d'acier)
t_w	Épaisseur de l'âme (section d'acier)
v	Coefficient de Poisson
x	Centre de gravité de la section d'acier
α	Degré de réaction du béton
ε	Déformation
η	Coefficient de viscosité
φ	Facteur de réduction des contraintes dû au fluage
λ_C	Coefficient de perte du calorimètre
μ	Degré d'entrave
σ	Contrainte
τ	Temps où la charge est appliquée

INDICES

−c, −s	Béton, Acier
−adia	Adiabatique
−eq	Équivalent
−Libre, −entrave	Comportement libre, Comportement entravé
−iso, −hyp	Isostatique, Hyperstatique
−new, −old	Nouveau béton (réparation), Ancien béton (substrat)
$-nn^{cr}$, $-nn.ult^{cr}$	Comportement post-fissuration, Comportement post-fissuration ultime
−N, −M	Effort axial, Moment
−test, −ref	Résultat d’un test, Résultat de référence

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A DIMENSIONNEMENT DES GOUJONS EN BÉTON POUR ESSAI PRÉLIMINAIRE 206

ANNEXE B PRÉPARATION DES ESSAIS DE CARACTÉRISATION DES BÉTONS POUR ESSAIS PRÉLIMINAIRES 211

ANNEXE C PLANS DE PARAPETS 214

ANNEXE D PLAN D'INSTRUMENTATION 223

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

Avec une des plus grandes superficies au monde, le Canada possède un vaste réseau d'infrastructures routières comptant plus de 3400 ponts/viaducs au Québec seulement (Transport Québec 2017) dont environ 320 ponts/viaducs à Montréal seulement (Ville de Montréal 2017). Malheureusement, plusieurs d'entre elles présentent des signes de détérioration avancée nécessitant des réparations majeures ou encore un remplacement total de l'ouvrage dans les prochaines années.

Plusieurs facteurs permettent d'expliquer l'état actuel des ouvrages. Premièrement, la majeure partie des infrastructures routières a été construite entre les années 1955 et 1980 et fait ainsi partie d'un parc vieillissant qui arrive maintenant en fin de vie. Deuxièmement, le sous-investissement dans les années 80 et 90, en ce qui a trait à la maintenance des actifs, a mené à une détérioration accélérée (Conseil du trésor Québec 2015). Finalement, le Québec possède des conditions environnementales très sévères, ce qui force l'épandage d'une grande quantité de sels de déverglaçage. Les éléments très exposés, tels les parapets de pont, sont donc soumis à de multiples cycles de gel et dégel ainsi qu'à une forte exposition au chlorure, entrainant à terme de graves problèmes de corrosion d'armature, d'éclatement des surfaces et de délaminage des barres d'armature. La Figure 1.1.a illustre ce type de détérioration pour les parapets d'un pont.

a) Éclatement du béton b) Fissure transversale

Figure 1.1 Endommagement dans le béton

Tous ces facteurs font en sorte que plusieurs ouvrages en béton armé sont endommagés et nécessitent une réhabilitation ou un remplacement complet. Malgré l'augmentation des interventions, Transport Québec (2017) estime qu'encore 29.7 % des ponts au Québec nécessitent des réparations et 9.4 % doivent être entièrement remplacés. Cela représente des investissements annuels majeurs se chiffrant dans les milliards de dollars pour le maître d'ouvrage (Conseil du trésor Québec 2015).

Dans ce contexte, il devient donc important d'effectuer une maintenance adéquate et des réparations efficaces pour rétablir l'état et la fonctionnalité en service des ouvrages. Par contre, certaines réparations conventionnelles posent certains problèmes à court ou moyen termes. Une réparation mince en béton appliquée sur un élément de structure rigide tel qu'un parapet de pont sera soumise à un retrait restreint suite au durcissement du béton de réparation. Ceci cause fréquemment une fissuration verticale dans la réparation (Figure 1.1.b), et ce, dans un délai très court (Bissonnette et al. 1995). À son tour, cette fissuration accélère la pénétration des agents agressifs et affecte négativement la durabilité et la durée de vie de l'ouvrage (Thiaw 2014). Il en résulte une augmentation de la fréquence de maintenance entrainant ainsi des coûts supplémentaires. Certains gestionnaires d'ouvrages au Québec confirment que 30% des coûts associés à la maintenance peuvent être attribués à la gestion du trafic. Par conséquent, l'obtention d'une réparation durable, efficiente et qui limite le nombre d'interventions sur l'ouvrage est primordiale.

Il devient donc intéressant de considérer des bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) comme matériaux de réparation. En effet, ceux-ci possèdent une résistance en traction très élevée ainsi que potentiellement un comportement écrouissant permettant de réduire voire même d'éliminer la fissuration précoce. Le BFUP en condition de service possède des propriétés de transport exceptionnellement faibles (perméabilité, absorption, diffusion) qui permettent de réduire la cinétique de pénétration des agents agressifs. De plus, les BFUP sont normalement autoplaçants, ce qui facilite leur application en couche mince. Tous ces facteurs permettent en théorie d'obtenir une réparation qui améliore le comportement mécanique et allonge la durée de vie des ouvrages. Cependant, les BFUP sont des matériaux beaucoup plus dispendieux qu'un béton standard. Malgré leur coût initial élevé, leur durabilité et leurs propriétés mécaniques très exceptionnelles en font un choix économique pour les éléments soumis à de grandes charges et/ou un environnement sévère, tels que les parapets de ponts (Charron et al. 2013).

1.2 Objectifs et portée

Le présent projet a pour but d'étudier la performance des bétons fibrés à ultra-hautes performances pour la réparation de parapets de ponts. De manière plus précise, le projet se caractérise par la réalisation des objectifs suivants :

1. Tester et analyser en laboratoire le comportement en déformation et le comportement mécanique de parapets réparés avec du BFUP;
2. Modéliser numériquement le comportement en déformation de parapets réparés en laboratoire;
3. Proposer des recommandations pour la réparation de parapets avec du BFUP.

Ce projet fait partie d'un programme de recherche industriel débuté en 2007 ayant pour objectif l'utilisation de bétons fibrés dans des éléments préfabriqués de pont. Ce programme a été initié par les professeurs Jean-Philippe Charron et Bruno Massicotte en collaboration avec le CRSNG, le groupe Béton Brunet et la Ville de Montréal. Suite à la première phase d'une durée de 5 ans, le programme a été prolongé en 2012 de 5 années supplémentaires avec la collaboration de la société des Ponts Jacques-Cartier et Champlain et de la compagnie Euclid. Le présent projet s'inscrit dans cette seconde phase.

Le parapet à l'étude dans ce projet est un parapet droit habituellement retrouvé à Montréal (Figure 1.2). Celui-ci repose sur un trottoir installé en bordure de la dalle de pont.

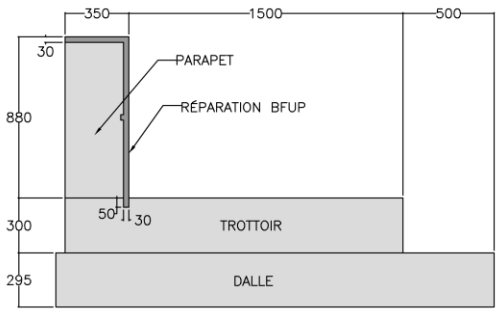


Figure 1.2 Parapet avec trottoir étudié

Pour répondre aux objectifs du présent projet, trois parapets sont étudiés: un parapet réparé en BFUP, un autre réparé en béton à hautes performances (BHP), et finalement un parapet témoin (sans réparation) afin de comparer l'efficacité de la réparation. Dans le but de réduire le programme expérimental, le parapet choisi est identique à celui adopté dans un précédent projet réalisé par Amadou Thiaw (2014). Ceci permet de réduire la quantité d'éléments à fabriquer en réutilisant les résultats d'essais mécaniques du parapet testé par Amadou Thiaw (2014) comme ceux du spécimen de référence pour cette étude.

1.3 Méthodologie

1.3.1 Étude expérimentale

L'étude expérimentale est divisée en deux phases distinctes, soit le programme préliminaire et le programme principal.

Programme préliminaire

Le programme d'essais préliminaire a pour objectifs d'évaluer les points suivants :

- Le contrôle des ouvertures de fissures dans le BHP et le BFUP en condition de retrait restreint similaire à celui du parapet étudié;
- La mesure de l'efficacité d'un adjuvant réducteur de retrait dans le BFUP pour réduire le retrait et éventuellement la fissuration mesuré au jeune âge.

Les essais préliminaires consistent en l'application d'une mince couche de béton sur l'âme d'une section d'acier de type W couchée sur le côté. À l'aide de trous perforés dans l'âme, le retrait du béton sera gêné par la section d'acier. Une analyse sectionnelle est réalisée pour trouver la section d'acier optimale qui permet de conserver une épaisseur identique (30 mm) et un niveau de restreinte similaire à celui attendue sur le parapet étudié.

Les essais de retrait restreint ont été réalisés sur un BHP et deux BFUP, avec et sans adjuvant réducteur de retrait. Un suivi visuel est effectué à l'aide d'une lentille grossissante pendant la période d'essais.

Programme principal

Les essais du programme principale ont pour objectif de :

- Tester le comportement en déformation et l'évolution des contraintes de parapets de pont dans des réparations minces;
- Tester le comportement mécanique de parapets de pont réparés.

Deux spécimens identiques ont été fabriqués chez Béton Brunet, un des partenaires industriels du programme de recherche. Ceux-ci ont été fabriqués sans réparation, mais un traitement de surface a été effectué pour simuler une l'hydrodémolition du béton endommagé. Par la suite, les parapets ont été transportés au laboratoire de structure de Polytechnique Montréal, où des réparations minces en BHP et en BFUP ont été appliquées. Le suivi des déformations a débuté immédiatement après l'application de la réparation et s'est poursuivi pendant deux mois, à l'aide de capteurs de température et de déplacement coulés dans la réparation et dans le parapet. Par la suite, chaque parapet a été testé à l'aide d'un vérin pour évaluer l'impact de la réparation sur le comportement mécanique de l'élément. Le parapet témoin utilise les données d'un essai effectué par Amadou Thiaw (2014) utilisé dans des conditions expérimentales identiques.

1.3.2 Étude numérique

Des analyses numériques sont réalisées avec la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel TNO Diana 3D. Les objectifs des modélisations sont de :

- Valider le modèle avec les essais déformationnels réalisés en laboratoire;
- Évaluer l'utilisation de différents types de béton en condition de retrait restreint;
- Évaluer l'impact de changements de température saisonniers et journaliers sur la fissuration de parapets réparés.

Tout d'abord, l'échauffement du béton, le retrait, le fluage et le comportement mécanique en traction sont modélisés et calibrés à l'aide de modèles simplifiés. Par la suite, tous ces comportements sont intégrés dans un modèle général du parapet étudié. La calibration finale du modèle est basée sur les données du comportement déformationnel au jeune âge des parapets testés en laboratoire. Par la suite, ce modèle est modifié pour simuler différentes catégories de béton et ainsi évaluer leur comportement en fissuration ainsi que l'impact de changements de température journaliers et saisonniers.

1.4 Organisation du mémoire

Le mémoire est divisé en sept chapitres. Le premier chapitre introduit le projet de recherche. Le second et le troisième font l'état de connaissances à propos des bétons fibrés à ultra-hautes performances ainsi que le comportement déformationnel des réparations. Le quatrième et cinquième chapitre traitent des études expérimentales et plus précisément des programmes d'essais préliminaire et principal respectivement. La méthodologie ainsi que les résultats y sont présentés dans chacun de ces chapitres. Le sixième chapitre présente l'étude numérique sur le comportement au jeune âge du béton et une étude paramétrique. Finalement, le septième chapitre effectue un retour sur le projet et propose des recommandations ainsi que des sujets de recherche complémentaires.

CHAPITRE 2 REVUE DE LA DOCUMENTATION SUR LES BÉTONS FIBRÉS À ULTRA-HAUTES PERFORMANCES

Le béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) est un béton qui se caractérise principalement par sa matrice cimentaire dense, sa faible perméabilité, sa ductilité élevée ainsi que son comportement écrouissant en traction (Habel 2004, Charron et al. 2013, Makita et al. 2015). Par conséquent, il offre un grand potentiel d'application en ce qui concerne les réparations d'éléments structuraux en béton (Tayeh et al. 2013).

Les origines du BFUP remontent à la conception de béton à hautes performances (BHP) au milieu des années 1970 avec le développement de bétons ayant un faible rapport eau sur ciment (E/C) et une granulométrie homogénéisée. Cela a permis d'obtenir une pâte cimentaire durcie avec une faible porosité, une résistance à la compression élevée ainsi que de faibles changements dimensionnels (Habel 2004).

La base des BFUP moderne a été développée dans les années 1980 en améliorant davantage la densité de la matrice cimentaire par l'utilisation de superplastifiant et de fumée de silice (Habel 2004). L'atteinte d'une résistance à la compression de 800 MPa fut observée en laboratoire en laboratoire (Richard et al. 1995). Par contre, l'augmentation de la compaction de la matrice cimentaire a pour effet de diminuer considérablement la ductilité du béton. Des fibres, normalement en acier, doivent être ajoutées au mélange afin d'obtenir un comportement non fragile (Habel 2004, Charron et al. 2013).

La première application pratique du BFUP fut effectuée en 1997 sur une passerelle piétonnière dans la Ville de Sherbrooke, QC (Kamal et al. 2014). Depuis ce temps, il a aussi été utilisé dans de nombreux ouvrages tel que la construction de dalles de ponts, réparations de barrages, enceintes nucléaires et autres. Par contre, le BFUP est un matériau encore jeune. Cela fait en sorte que les connaissances le concernant et son application demeurent encore réduites (Habel 2004).

2.1 Principes majeurs du BFUP

Le BFUP se différencie des autres types de béton par les trois points suivants (Habel 2004, Yang et al. 2009, Tayeh et al. 2013) :

- L'amélioration de l'homogénéité des particules par le retrait des granulats grossiers et par l'utilisation de sable fin;
- L'amélioration de la compaction de la matrice cimentaire en utilisant des matériaux fins, tels que du sable (150 à 600 μm), du ciment (environ 15 μm) et généralement de la fumée de silice (0.1 à 0.2 μm). Ceci permet ainsi d'améliorer la granulométrie et d'obtenir une pâte dense;
- L'utilisation de fibres pour augmenter la ductilité du mélange. Des fibres en acier, en carbone ou en verre peuvent être utilisées. Celles-ci doivent être en quantité suffisante pour obtenir un comportement écrouissant en traction.

2.2 Constituants du BFUP

La composition de base du BFUP est similaire à celui d'un béton ordinaire, mais elle se distingue par une forte teneur en ciment, un faible rapport E/C (entre 0.15 et 0.25), la présence de fibres et une quantité importante de fumée de silice et de superplastifiant (Habel et al. 2006).

- Ciment : Utilisation d'une quantité de ciment qui est 2 fois plus élevée qu'un béton conventionnel. De plus, celui-ci est généralement ultrafin, ce qui permet d'améliorer la finesse du mélange (environ 15 μm). Il doit aussi avoir une faible teneur en alcalin et en C_3A pour éviter des réactions inadéquates, soit une réaction alcalis granulat ou la formation d'ettringite respectivement (Habel 2004);
- Quantité d'eau : Utilisation d'une quantité d'eau pour obtenir un rapport E/C moyen entre 0.15 et 0.25. À cause de ce rapport faible, le degré d'hydratation du ciment est d'environ 31 % (Habel 2004, Charron et al. 2013);
- Fumée de silice : Remplissage des interstices entre les grains de ciment. Cela améliore la compaction générale du mélange et augmente les propriétés rhéologiques de la pâte à l'état frais. De plus, la réaction pouzolanique permet de transformer la portlandite en *CSH* ce qui augmente davantage la résistance du matériau (Habel 2004);
- Ajout minéral autre: Possibilité d'utiliser d'autres ajouts tels que des cendres volantes, laitier de haut fourneau et filler calcaire. Ceci permet de garder une

résistance élevée tout en diminuant la quantité de ciment requise (Charron et al. 2013, Yu et al. 2014);

- Sable fin : Utilisation d'un sable fin (entre 150 à 600 μm) comme seul type de granulat dans le béton. Ceux-ci sont généralement composés de quartz ou calcaire à cause de leur résistance élevée et leur bonne adhérence avec les grains de ciment et les fibres d'acier (Habel 2004, Yu et al. 2014);
- Superplastifiant : Augmentation de la maniabilité du mélange à cause de sa faible teneur en eau. Possibilité d'obtenir un béton autoplaçant, ce qui facilite sa mise en place (Habel 2004, Charron et al. 2013);
- Fibres : Les fibres doivent être minces et courtes pour favoriser leur interaction avec la pâte cimentaire. Celles-ci permettent : d'augmenter la ductilité, d'augmenter la résistance à la traction, de réduire l'ouverture des fissures et d'obtenir un comportement écrouissant en traction (pour 2 % de fibre ou plus). Les fibres sont généralement faites en acier, mais il peut aussi s'agir de fibres de carbone ou de verre (Habel 2004, Charron et al. 2013).

Le Tableau 2.1 compare les différentes teneurs en matériaux du BFUP, et ce par rapport à un béton ordinaire (BO), un béton à hautes performances (BHP) et un béton fibré à hautes performances (BFHP). Les propriétés mécaniques générales y sont aussi présentées à titre indicatif.

Tableau 2.1 Composition de différents types de béton et leurs propriétés (Charron et al. 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/m3	350 à 450 kg/m3	350 à 550 kg/m3	800 à 1000 kg/m3
Ajouts minéraux	Parfois	Oui	Oui	Oui
Sable	Oui	Oui	Oui	Oui
Pierre	Oui	Oui	Oui	Non
Fibres	Non	Non	40 à 120 kg/m3 (0.5 à 1.5 %-vol.)	160 à 480 kg/m3 (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 2.5MPa	3.0 à 4.5MPa	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

L'utilisation d'une quantité élevée de ciment et un faible rapport E/C dans le BFUP engendre une résistance à la compression (f'_c) de 3 à 9 fois plus élevée qu'un béton de classe ordinaire. De plus, l'obtention d'une matrice dense ainsi que l'utilisation d'une quantité importante de fibres permettent d'augmenter de 3 à 10 fois la résistance à la traction (f'_t) par rapport à un béton ordinaire, ce qui présente un avantage intéressant dans le cas d'une réparation. Finalement, le BFUP affiche un module élastique (E_c) de 1.2 à 2.25 fois plus élevé que celui du béton ordinaire.

2.3 Propriétés générales du BFUP

2.3.1 Hydratation

Le BFUP affiche une période dormante plus longue en raison d'une forte teneur en superplastifiant (Habel et al. 2006). La réaction d'hydratation engendre un dégagement de chaleur 3 fois plus important pour le BFUP par rapport à un béton ordinaire causé par l'utilisation d'une grande quantité de ciment et de fumée de silice. De plus, à cause de sa forte teneur en ciment, le BFUP possède un degré de réaction faible de l'ordre de 30 %.

2.3.2 Propriétés mécaniques

Selon le Tableau 2.1 , le BFUP démontre généralement une résistance à la compression de 120 à 150 MPa à 28 jours ainsi qu'une résistance maximale de 7 à 15 MPa en traction. Au niveau déformationnel, le BFUP possède généralement un module de Young de l'ordre de 45 à 64 MPa ainsi qu'un coefficient de Poisson entre 0.22 et 0.24 (Habel 2004). L'évolution de ces propriétés en fonction du degré de réaction est présentée à la Figure 2.1. On remarque que l'évolution du module élastique (E_c) est plus rapide que le développement de la résistance en traction (f_{ct}) qui à son tour est plus rapide que le développement de la résistance en compression (f_{cc}). Ceci correspond à une accélération constante de l'évolution des propriétés au jeune âge, entre 31 et 72 heures, et une évolution à un rythme moins rapide par la suite (Habel 2004).

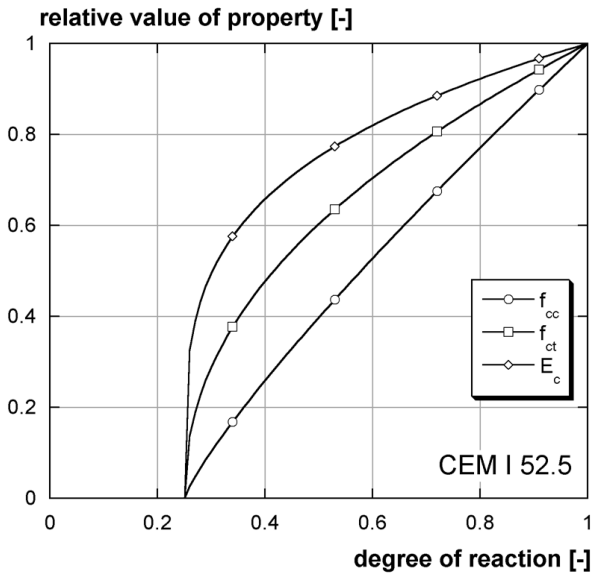


Figure 2.1 Évolution des propriétés de base en fonction du degré de réaction (De Schutter et al. 1996)

L'évolution du degré de réaction peut être directement déterminée par rapport à la courbe adiabatique avec l'équation (2.1).

$$\alpha(t) = \frac{T_{adia}(t)}{T_{adia}(\infty)} \tag{2.1}$$

Soit α(t) le degré de réaction en fonction du temps et $T_{adia}(t)$, la température adiabatique en fonction du temps (Habel et al. 2006).

Dans l'objectif d'augmenter davantage les propriétés mécaniques, il est possible d'effectuer une cure humide à un minimum de 90 °C. Cela a pour effet d'augmenter la résistance au jeune âge du BFUP et par conséquent d'augmenter de 20 % le f'_c, de 10 % la résistance en flexion et de 15 % l'énergie de fracturation. Cependant, cette méthode est seulement applicable dans le cas d'élément préfabriqué, à cause de l'équipement requis pour la cure humide (Yang et al. 2009).

2.3.3 Comportement en traction

Pour mieux comprendre l'impact de l'ajout de fibres dans la pâte de ciment, le comportement en traction d'un béton non fibré est présenté à la Figure 2.2. Au point O, avant tout chargement, il y a

une présence de microfissures préexistantes à l'interface des granulats et de la pâte cimentaire à cause des contraintes induites par le retrait et les effets thermiques. Ces fissures sont très localisées et elles n'interagissent pas entre elles. Le point A se situe dans la phase élastique du chargement et se distingue par l'apparition de nouvelles microfissures et la propagation de d'autres le long de l'interface des granulats. Le point B amorce la fin du comportement élastique et le début du comportement non linéaire en traction et se distingue par la propagation des microfissures à la pâte cimentaire. Au point C, les microfissures se densifient et commencent à s'interconnecter pour former une macrofissure. La résistance maximale en traction est atteinte à ce point. Au point D, le développement d'un réseau de macrofissures regroupées mène au point E, c'est-à-dire, la rupture complète en traction du spécimen. Ce mécanisme est important pour comprendre l'impact des fibres sur le comportement en traction du béton et par le fait même, le comportement du BFUP.

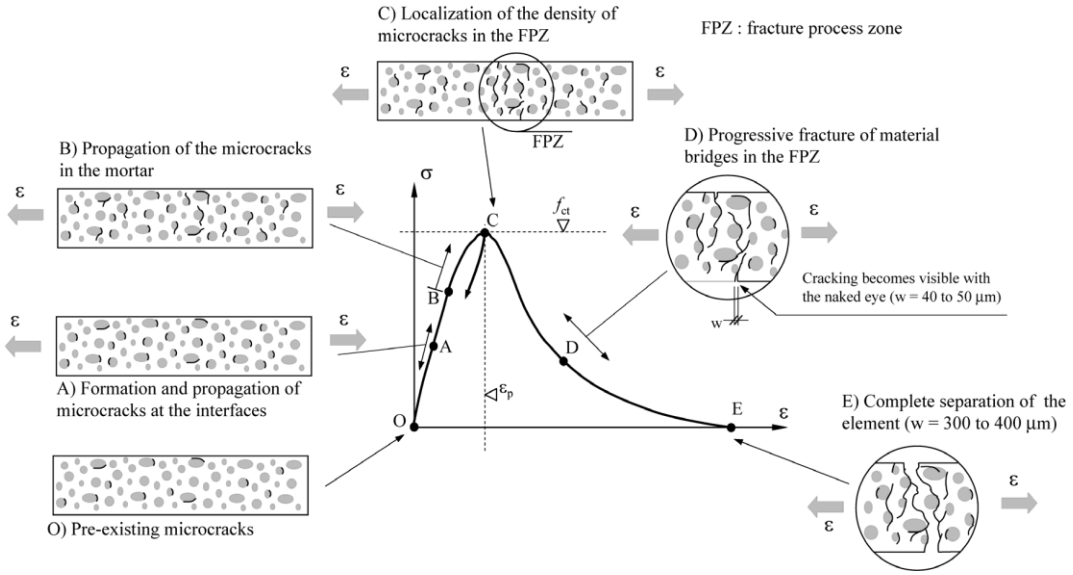


Figure 2.2 Comportement déformationnel d'un béton ordinaire en traction (Bernard 2000)

La Figure 2.3 présente le comportement déformationnel d'un béton fibré conventionnel et d'un BFUP. Tout d'abord, la présence de fibres permet de ponter les fissures et ainsi réduire leur ouverture. Ceci permet donc d'obtenir un comportement adoucissant plutôt que fragile après l'atteinte de la résistance ultime en traction (Charron et al. 2013). Par contre, dans le cas d'un béton fibré conventionnel, les fibres agissent seulement au niveau des macrofissures et ne permettent

donc pas d'améliorer la résistance maximale en traction. Pour ce qui est du BFUP, les fibres sont en quantité importante et sont petites. Cela permet ainsi de reprendre les efforts au niveau des microfissures et d'améliorer son comportement pré-pic. Lorsque la quantité de fibres est élevée, il est possible d'obtenir un plateau écrouissant tel que présenté entre le point A et B de la Figure 2.3. Finalement, puisque les fibres dans le BFUP agissent sur les microfissures plutôt que les macrofissures, celui-ci présentera une grande quantité de fissures, mais de petite ouverture, contrairement à un béton fibré conventionnel qui présente une seule fissure à grande ouverture (Habel 2004, Kamal et al. 2008, Iskhakov et al. 2013). Ces fissures sont tellement petites dans le BFUP que l'eau ne peut y circuler librement. Cet aspect sera discuté en plus grand détail à la section 2.3.8.

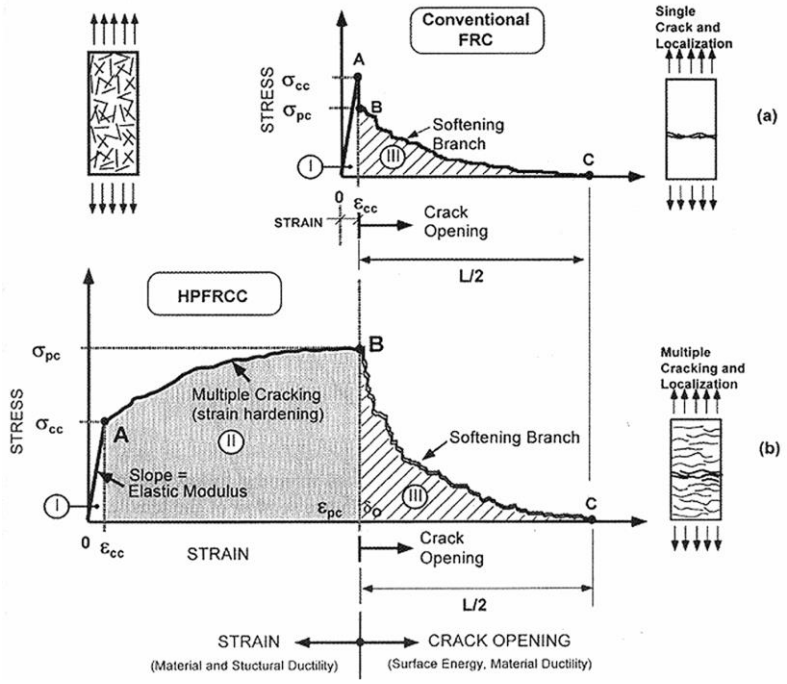


Figure 2.3 Comportement déformationnel en traction d'un béton de fibres standard et d'un BFUP (Naaman 2003)

La Figure 2.4 présente une comparaison des comportements déformationnels, avant l'atteinte de la force de traction maximale, du BFUP par rapport aux autres types de béton et d'une barre d'armature 400W standard. Hormis la résistance en traction beaucoup plus élevée que les autres

types de béton, le BFUP possède un plateau écrouissant et offre ainsi une réserve intéressante de résistance lorsque soumis à de grandes déformations. Cette réserve peut même être considérée dans la conception d'élément en BFUP. Par ailleurs, le BFUP possède un comportement déformationnel équivalent à celui d'une barre d'armature standard (400W) avant la plastification. Il est donc possible d'envisager une réduction appréciable d'armatures sans nécessairement compromettre la ductilité de l'élément (Charron et al. 2013).

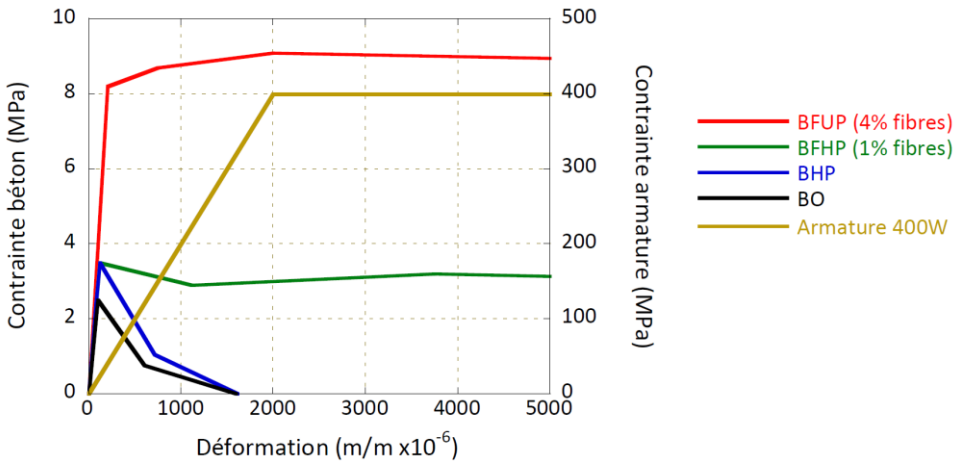


Figure 2.4 Comparaison du comportement déformationnel de bétons en fonction de leur résistance en traction (Charron et al. 2013)

2.3.4 Retrait

Le retrait dans le BFUP se caractérise par un retrait endogène élevé de l'ordre de 420 à 450 με et d'un retrait de séchage faible de l'ordre de 140 à 180 με après 7 jours (Habel 2004, Habel et al. 2006). La Figure 2.5 présente l'évolution des retraits en fonction du temps. Le retrait endogène est très important entre 5 à 10 heures après la prise initiale et devient constant par la suite. Ainsi, l'application d'une bonne cure humide est primordiale pour mitiger l'impact du retrait et ainsi réduire les chances de fissuration précoce ou de décollement à l'interface en condition de retrait restreint (Habel et al. 2006). Aussi, le retrait de séchage devient négligeable avec l'application d'une cure humide pendant 7 jours (Tayeh et al. 2013). La diminution du rapport E/C permet aussi

de réduire l'impact du retrait. De plus, l'ajout de fibre permet une réduction supplémentaire de 10 à 20 % de l'amplitude du retrait. Dans le cas présent, le retrait est principalement causé par une réponse visqueuse du béton soumis aux dépressions capillaires ainsi qu'aux pressions disjonctives (Habel 2004). Ces phénomènes seront expliqués en plus amples détails au chapitre suivant à la section 3.1.1.

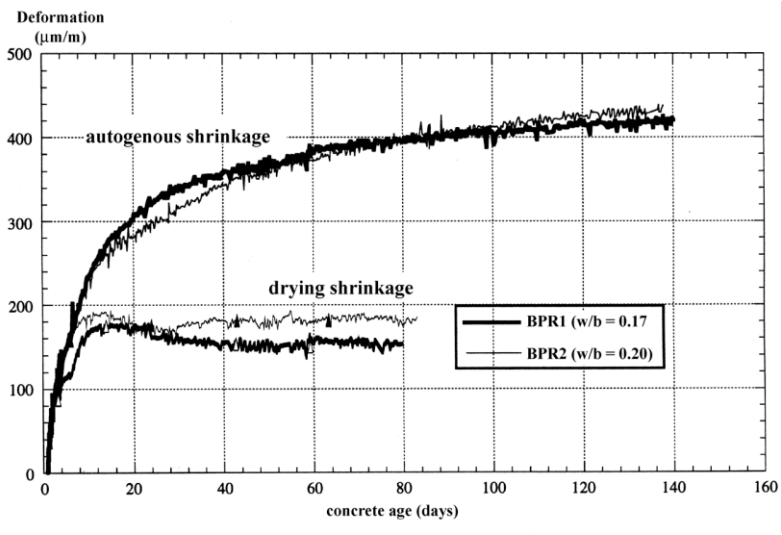


Figure 2.5 Retrait dans le BFUP (Loukili 1996)

2.3.5 Fluage

Le fluage dans le BFUP est très important durant les premières 24 heures et représente une diminution d'environ 35 % des déformations totales. Il est attendu que le fluage soit capable de reprendre environ 65 % des contraintes induites par le retrait (Habel et al. 2006). Le fluage dans le BFUP est principalement attribuable au comportement viscoélastique des feuillets de CSH entre eux (Habel 2004).

2.3.6 Faible porosité

La faible porosité du BFUP est due à l'utilisation d'une grande quantité de ciment et de l'utilisation de matériaux fins tels que la fumée de silice. À son tour, cette faible porosité et l'utilisation de fibres est directement responsable de la faible perméabilité dans le BFUP (Habel et al. 2006). Cela

permet ainsi d'obtenir une bonne protection contre la pénétration des agents agressifs, tel que les ions chlorure et les ions sulfate, soit la cause principale de la corrosion et des attaques aux sulfates respectivement (Charron et al. 2013). La pénétration des ions chlorure et l'initiation de la corrosion se produisent avec l'apparition d'une ouverture de fissure minimale de 0.05 mm. Ce type de fissure est généralement absent dans le BFUP en condition de service. De plus, la faible porosité ainsi qu'un réseau adéquat de bulles d'air entrainées permettent d'augmenter la résistance aux cycles de gel-dégel et ainsi de prévenir l'écaillage en surface (Habel 2004, Charron et al. 2013).

2.3.7 Autocicatrisation du béton

Le BFUP possède un fort potentiel d'autocicatrisation et ceci réduit encore davantage la cinétique de pénétration d'agents agressifs en condition fissurée. De plus, ce phénomène a été observé sur des éléments soumis à un chargement statique ou un chargement cyclique (Charron et al. 2013). Trois phénomènes peuvent expliquer la cicatrisation dans le béton (Charron et al. 2008) :

- L'hydratation des grains de ciment non hydraté. Dans le cas du BFUP, ceci est notable puisqu'environ 70 % des grains de ciment sont non hydratés. Ainsi, lorsqu'il y a apparition d'une fissure en présence de suffisamment d'humidité, la formation de nouveaux hydrates peut parvenir à ponter la fissure;
- La formation de cristaux de calcium au niveau des fissures, durant les 28 premiers jours. Ceux-ci ont l'effet d'un bouchon et retardent la pénétration des agents agressifs;
- Le colmatage des fissures fines par le transport d'impuretés dans l'eau.

Plusieurs facteurs vont affecter l'efficacité de l'autocicatrisation dans le béton. Plus une fissure est étroite, plus la cicatrisation sera rapide et efficace. Aussi, une température et un taux d'humidité élevés favorisent la cicatrisation. Le Tableau 2.2 présente le taux de cicatrisation dans un BFUP et un BO en fonction du temps. La rapidité de cicatrisation dans le BFUP par rapport au BO s'explique par une plus grande quantité de ciment non hydraté ainsi qu'une matrice cimentaire plus dense. L'autocicatrisation offre une protection intéressante. Cependant, en raison de sa nature imprévisible, il se peut que l'effet de bouchonnage des fissures ne se produise pas. Ainsi, il est impossible de tenir compte de ce facteur dans le design d'un élément en BFUP (Charron et al. 2013).

Tableau 2.2 Taux d'autocicatrisation pour le BO et BFUP en fonction du temps (Charron et al. 2013)

Temps (h)	Pourcentage de cicatrisation	
	BO *	BFHP #
0	0 %	0 %
25	36 %	58 %
50	44 %	64 %
100	53 %	69 %
140	55 %	73 %

* BO : F_{moy} = 34.9 kN, K_{wi} = 3.4 × 10^{-6} m/s, w_{max} =0.27 mm

\# BFHP :F_{moy} = 41.7 kN, K_{wi} = 1.4 × 10^{-6} m/s, w_{max} = 0.12 mm

2.3.8 Durabilité

La durabilité du béton se définit principalement par une résistance adéquate aux contraintes appliquées ainsi que sa résistance à la pénétration des agents agressifs. Ainsi, les facteurs suivants sont d'une importance capitale dans l'analyse de la durabilité d'un béton (Charron et al. 2013) :

- Propriétés mécaniques élevées ou adéquates : Capacité du béton à reprendre les efforts engendrés par les conditions d'utilisation ainsi que ceux causés par les conditions environnementales telles que les effets thermiques et hydriques;
- Faible perméabilité : Résistance à la pénétration des agents agressifs tels que les ions chlorures et les sulfates, responsables d'importantes détériorations du béton. Le transport d'agents agressifs peut se faire en milieu aqueux (transport rapide) ou gazeux (transport lent) (Charron et al. 2013);
- Faible porosité : Celle-ci est intrinsèquement liée à la pénétration des agents agressifs, mais une porosité élevée peut être néfaste notamment au niveau des cycles de gel et dégel. Ainsi une faible porosité est souhaitable (Charron et al. 2013).

De plus, l'état de fissuration a un impact majeur sur la durabilité du béton. Lorsque le béton est non fissuré, le transport des agents agressifs se fait principalement par diffusion et agit lentement. Par contre, lorsque le béton est fissuré, le transport de ces agents est hautement augmenté au droit

des fissures et s'effectue principalement par perméabilité et absorption. L'ouverture minimale augmentant significativement le transport d'eau par perméabilité est de l'ordre de 0.05 mm à 0.1 mm selon les sources (Charron et al. 2013).

Cette différence de durabilité selon l'état de fissuration a été étudiée par Charron et al. (2013). Ainsi, le Tableau 2.3 présente des indicateurs de durabilité pour les BO, BHP, BFHP et BFUP non fissurés. Les indicateurs de durabilité présentés comprennent : la perméabilité à l'air et à l'eau, la diffusion effective, la sorptivité, la vitesse de corrosion et finalement la porosité à l'eau. Ces coefficients sont liés directement à la pénétration d'agents agressifs responsables de l'endommagement du béton, et par conséquent à sa durabilité. La seconde partie du Tableau 2.3 expose les indicateurs relatifs, soit les valeurs par rapport à ceux du BO, ainsi que l'indicateur relatif critique donné par l'indicateur relatif maximal par type de béton. Ainsi, le BFUP affiche une durabilité 65 fois plus élevée par rapport à celui du BO et 20 fois plus élevée que celle du BHP et BFHP. Ces valeurs sont valables en condition non fissurée. Pour sa part, le BHP/BFHP est 3 fois plus durable que le béton ordinaire. Il est à noter qu'au niveau de la mesure de certains indicateurs de durabilité du BFUP, la limite minimale de l'appareil de mesure fut atteinte.

Tableau 2.3 Indicateurs de durabilité en condition non fissurée (Charron et al. 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}	< 5×10^{-14}
Diffusion effective, D_{eff} (m^2/s) [22, 45, 46]	2×10^{-11} - 2×10^{-12}	2×10^{-12} - 2×10^{-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 (µm/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.

Puisque le transport par les fissures se fait beaucoup plus rapidement en milieu aqueux que les autres modes étudiés au Tableau 2.3, seule la condition de perméabilité à l'eau est étudiée ici. Le Tableau 2.4 présente la perméabilité à l'eau en fonction de différentes ouvertures de fissures. Ces fissures sont générées au moyen d'une contrainte appliquée à une barre d'armature traversant le spécimen de béton étudié. Le niveau de contrainte utilisé est aussi présenté dans le Tableau 2.4. Tout d'abord, seul le BFUP possède une ouverture de fissure inférieure au seuil critique pour le transport de l'eau au droit des fissures, soit une ouverture minimale de 0.05mm. Cette ouverture est 6 fois plus petite que celle mesurée dans le BO. Ainsi il est possible de s'attendre à une durabilité plus élevée dans le BFUP par rapport au BO. En effet, en observant l'indicateur de perméabilité relatif critique, le BFUP est minimalement 1000 fois plus durable que le béton ordinaire en condition fissurée. De plus, en comparant les valeurs de perméabilité à l'eau du Tableau 2.3 et du Tableau 2.4, on remarque que le BFUP est 90 000 fois plus perméable en condition fissurée que non fissurée, tandis que le facteur est de 540 000 dans le cas du BO. Cela démontre l'impact majeur de la fissuration sur la cinétique de transport des agents agressifs. Cette durabilité élevée du BFUP est attribuable à sa faible porosité et plus précisément, à sa faible porosité capillaire. La tendance du BFUP à former plusieurs petites fissures fines au lieu d'une seule grosse, tel que discuté précédemment à la section 2.3.3, a pour effet de réduire considérablement la cinétique de pénétration des agents agressifs.

Tableau 2.4 Indicateurs de durabilité pour différents niveaux de fissuration (Charron et al. 2013)

Contrainte armatures	**Ouverture de fissures (w en mm)**			**Perméabilité à l'eau (K_{eau} en m/s)**		
(σ_s en MPa)	**BO - BHP***	**BFHP**	**BFUP**	**BO - BHP***	**BFHP**	**BFUP**
200	0.22	0.08	0	2.0×10^{-6}	4.4×10^{-7}	1.3×10^{-9}
250	0.27	0.12	< 0.05	3.9×10^{-6}	1.2×10^{-6}	2.4×10^{-9}
300	0.29	0.16	< 0.05	5.4×10^{-6}	1.7×10^{-6}	4.6×10^{-9}
Contrainte armatures	**Fissure relative au BO (w/w_{BO})**			**Perméabilité relative au BO (K/K_{BO})**		
(σ_s en MPa)	**BO - BHP***	**BFHP**	**BFUP**	**BO - BHP***	**BFHP**	**BFUP**
200	1	0.364	0	1	0.220	0.001
250	1	0.444	< 0.185	1	0.307	0.001
300	1	0.552	< 0.172	1	0.314	0.001
Indicateur de perméabilité relatif critique				**1**	**≤ 0.314**	**≤ 0.001**

& : Les contraintes dans les armatures retrouvées en service varient entre 200 et 300 MPa.

* : À l'état fissuré le BHP aune perméabilité similaire au BO au droit de la fissure.

2.4 Utilisation du BFUP

Initialement, le BFUP avait été développé pour les éléments préfabriqués, à cause de son temps de prise rapide, ainsi que la nécessité d'une cure thermique. Par après, la familiarisation avec ce matériau a permis l'élargissement de son application jusqu'aux chantiers de construction.

Bien que le BFUP possède des propriétés mécaniques très élevées et une excellente durabilité, son prix est jusqu'à 15 fois plus élevé par rapport à un béton ordinaire. Par contre, à cause de sa grande durabilité, le BFUP possède une durée de vie 3 fois supérieure à celle d'un béton ordinaire et requiert moins d'entretien durant sa vie utile. Par conséquent, le BFUP devient un choix compétitif et économique pour les éléments sujets à de grandes contraintes et à des conditions environnementales sévères (Charron et al. 2013). Ainsi son application est avantageuse à l'échelle mondiale dans des ouvrages tels que des dalles de ponts, enceintes nucléaires, plateformes de forage, poutres de couplage (*coupling-beam*) et autres (Yang et al. 2009).

De plus, l'utilisation du BFUP en couche mince dans le cas d'ouvrage hybride ou d'une réparation permet de réduire le volume de béton requis, de conserver un bon comportement mécanique et d'assurer une meilleure durabilité. Cela offre donc une bonne alternative économique (Charron et al. 2013, Habert et al. 2013).

Habert et al. (2013) ont noté que l'utilisation de BFUP peut accélérer les travaux. Par exemple, sa faible perméabilité permet d'éliminer la membrane d'étanchéité d'un tablier de pont. Ceci représente une réduction du temps de travail de l'ordre de 1 à 3 mois et se traduit par une économie substantielle en main d'œuvre.

Par ailleurs, Makita et al. (2015) ont observé que les réparations en BFUP appliquées sur des zones potentiellement soumises à des charges en traction permettent d'augmenter la résistance maximale d'un ouvrage, son comportement en service et en fatigue, et ce, indépendamment du niveau d'endommagement existant et des contraintes initiales.

2.5 Conclusions

Le BFUP se distingue des autres bétons par l'amélioration de l'homogénéité des particules, l'amélioration de la compaction de la matrice cimentaire et finalement par l'utilisation de fibres

pour augmenter la ductilité du matériau. Cela permet ainsi d'obtenir un béton avec des résistances élevées en compression (120 à 150 MPa) et en traction (7 à 15 MPa), un comportement déformationnel écrouissant en traction ainsi qu'une excellente durabilité en condition non fissurée et fissurée. Ces facteurs font de sorte que le BFUP est bien adapter à la réparation dans des endroits soumis à de fortes expositions aux agents agressifs tels que des parapets de ponts.

Par contre, le BFUP possède un retrait et une chaleur d'hydratation élevée au jeune âge. Ces facteurs auront pour effet d'accroitre le retrait restreint dans le béton. L'application d'une cure humide adéquate sera donc importante lors de la réalisation des essais en laboratoire. Aussi l'utilisation d'un adjuvant réducteur de retrait pourrait être considérée afin de diminuer davantage le retrait.

CHAPITRE 3 REVUE DE LA DOCUMENTATION DU COMPORTEMENT DÉFORMATIONNEL DES RÉPARATIONS

Le présent chapitre est divisé en trois sections principales. La première partie discute du comportement déformationnel du béton, plus précisément, le retrait et le fluage. Ensuite, dans le cadre des réparations en béton, les aspects de compatibilité, de mise en place et du choix des matériaux seront abordés. Finalement, une étude de cas a été effectuée sur le comportement déformationnel de poutres réparées en BO et en BFUP.

3.1 Comportement déformationnel du béton

3.1.1 Retrait

Le retrait dans le béton est causé par un changement de volume lié à la réaction d'hydratation du ciment avec l'eau (retrait endogène) et/ou par le changement du niveau d'humidité de la pâte cimentaire avec l'environnement (retrait de séchage). Il est important de connaitre les mécanismes et les facteurs d'influence, car le retrait est responsable de plusieurs problèmes de durabilité du béton et plus précisément de la fissuration précoce en condition restreinte (Bissonnette et al. 2000, Acker et al. 2001, Habel et al. 2006).

3.1.1.1 Retrait endogène

Initialement, la pâte cimentaire est composée de grains de ciment en suspension dans l'eau de gâchage. Suite à la réaction d'hydratation entre ces composants, des hydrates sont produits. Le volume des hydrates formés par la réaction par rapport au volume de ce qui a été consommé possède un bilan volumétrique négatif. Cette réaction représente une contraction du volume de l'ordre de 8 à 10 % en fonction de la proportion des différents hydrates qui peuvent être créés (Acker et al. 2001, Charron 2003). Cette contraction porte le nom de retrait chimique et représente un changement de volume absolu de la pâte de ciment qui est inévitable puisqu'elle est un résultat direct de la réaction d'hydratation du ciment (Holt 2001, Charron 2003).

Cependant, le retrait chimique est une idéalisation du mécanisme de formation des hydrates et s'applique seulement aux phases liquides et solides telles que présentées à la Figure 3.1. Celui-ci ne représente pas le changement de volume apparent qui considère la phase gazeuse qui se crée

dans la porosité du béton. Ce changement de volume apparent se nomme le retrait endogène (Holt 2001, Charron 2003).

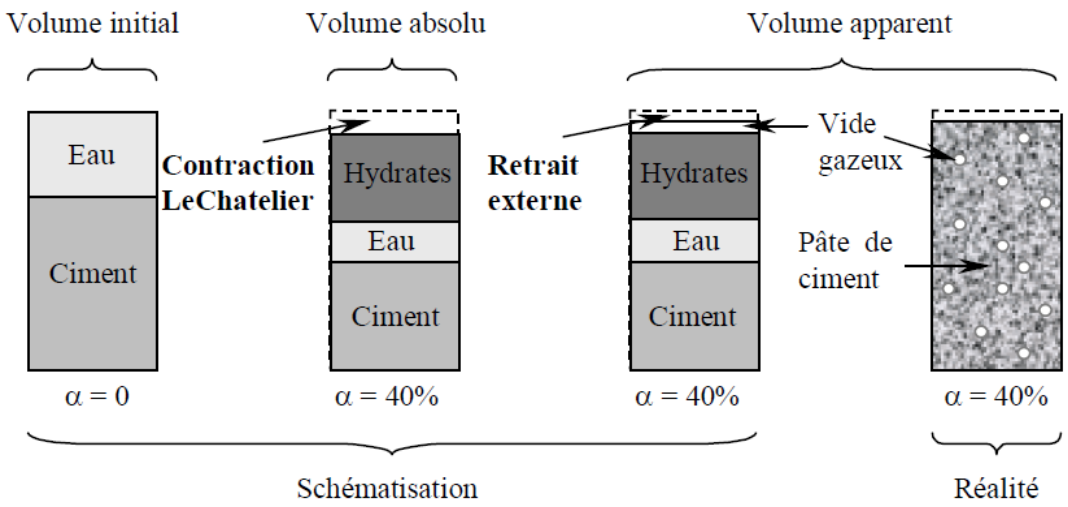


Figure 3.1 Schématisation de la différence entre le retrait chimique et endogène (Charron 2003)

En effet, lors du début de la réaction d'hydratation, une enveloppe d'hydrate se forme sur le pourtour des grains de ciment, mais ceux-ci restent en suspension dans l'eau de gâchage et n'interagissent pas entre eux. Durant cette période, le retrait endogène est presque similaire au retrait chimique (Figure 3.2). Éventuellement, un squelette d'hydrate se forme entre les grains et vient gêner le retrait chimique. Ceci va mener à la création d'une phase gazeuse dans les pores du béton. Durant cette phase, la cinétique du retrait endogène diverge et devient nettement inférieure à celle du retrait chimique. La contraction du squelette et la création de gaz dans les pores du béton se poursuivent. Après la prise initiale du béton, l'autodessication débute et devient la cause principale de la contraction du béton (Holt 2001, Charron 2003).

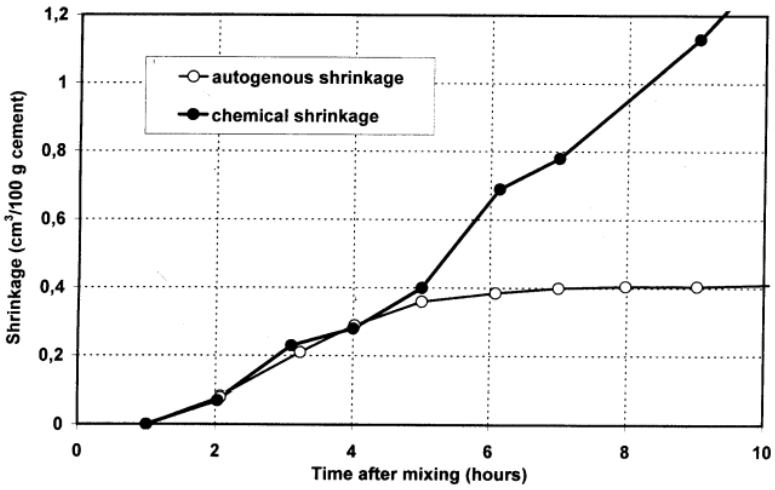


Figure 3.2 Comparaison entre le retrait chimique et endogène (Holt 2001)

L'autodessication du béton est une contraction similaire à celle du retrait de séchage, mais se caractérise par l'utilisation de l'eau des pores pour l'hydratation des grains de ciment (Holt 2001, Charron 2003). Deux mécanismes permettent l'explication du changement volumique causé par l'autodessication, soit principalement le mécanisme de dépression capillaire et le mécanisme de la pression disjonctive. Ces phénomènes seront décrits à la section suivante.

3.1.1.2 Retrait de séchage

Le retrait de séchage (ou retrait de dessiccation) se distingue par un échange d'humidité relative entre le béton et l'environnement. Trois mécanismes permettent d'expliquer le retrait de séchage: la dépression capillaire, la pression disjonctive et la tension de surface. Ces mécanismes surviennent successivement pour une plage d'humidité relative distincte.

<u>Dépression capillaire</u>

Le mécanisme de la dépression capillaire s'explique par un changement d'humidité au cœur des pores capillaires. Lorsque l'humidité diminue, il y a aussi réduction du rayon de courbure des ménisques formés par l'eau capillaire et la phase gazeuse dans les pores (Figure 3.3). Cela entraine une augmentation de la pression exercée par l'eau capillaire sur le squelette d'hydrate qui à son tour se contracte dû aux forces supplémentaires induites. Ce mécanisme permet d'expliquer les changements de volume pour une humidité relative supérieure à 80%. Puisque la réaction

d'hydratation survient en condition d'humidité relative supérieure à 75 %, ce phénomène est la principale cause de l'autodessication (Holt 2001, Charron 2003).

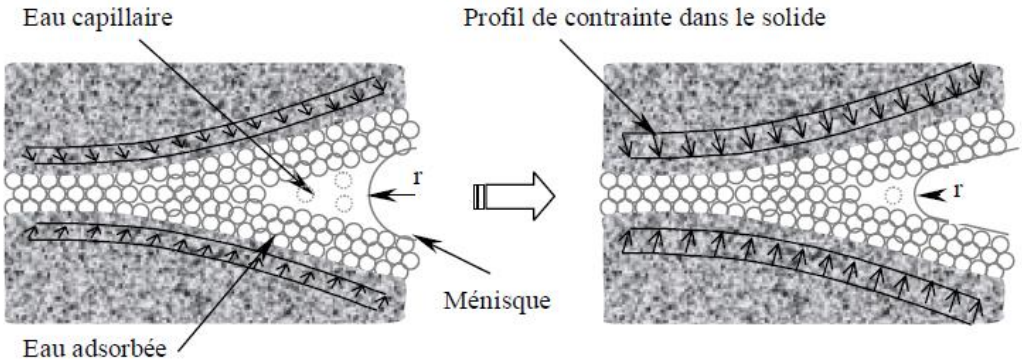


Figure 3.3 Mécanisme de la dépression capillaire (Charron 2003)

Pression disjonctive

Le mécanisme de pression disjonctive s'explique par une diminution de la quantité d'eau adsorbée à la surface des hydrates. L'eau adsorbée crée une pression disjonctive qui sépare les hydrates les uns des autres. Lorsque l'humidité relative diminue, la pression disjonctive diminue aussi, ce qui permet aux feuillets d'hydrate de se contracter. Ce mécanisme permet d'expliquer les changements de volume pour une humidité relative entre 40 et 80 % (Charron 2003).

Tension de surface

Le phénomène de tension de surface se produit en présence de molécules d'eau à la surface des hydrates. Lorsque l'humidité relative est élevée, la résultante des forces d'attraction qui agit sur les molécules d'eau proche des hydrates est moindre, car les couches de molécules sont nombreuses. Par contre, lorsque la quantité de couches d'eau diminue, la force d'attraction sur les molécules d'eau restantes augmente et comprime davantage le squelette rigide d'hydrate. Cela permet d'expliquer les contractions en humidité relative inférieure à 40 % (Charron 2003).

3.1.1.3 Essais de caractérisation

Plusieurs méthodes existent dans le but de quantifier l'évolution du retrait dans le temps pour différents spécimens de mortier ou de béton. Les méthodes les plus couramment employées

utilisent une mesure unidirectionnelle, c'est-à-dire une évaluation de la déformation dans une seule direction. Ces méthodes vont généralement employer des instruments de mesure installés à la surface des spécimens après le décoffrage à l'aide de plots, collés directement à la surface ou noyés dans le cœur du spécimen (Charron 2003).

La norme ASTM C157 recommande le décoffrage et l'installation de l'instrumentation dans un délai de 24h. Par la suite, les spécimens doivent être gardés dans un bassin de chaux à température contrôlée entre chaque mesures ou sinon, à l'air libre dans un environnement contrôlé à 23±2 °C et à un taux d'humidité de 50±4 % (ASTM International 2014).

Dans le cas d'un spécimen laissé à l'air libre, celui-ci subira un retrait total, soit la somme du retrait de séchage et endogène. Pour évaluer les déformations induites par le retrait endogène, il suffit de sceller les surfaces à l'aide d'une membrane étanche qui empêche l'échange d'humidité entre le béton et l'air ambiant. Le retrait de séchage, quant à lui, est obtenu en soustrayant au retrait total le retrait endogène (Habel 2004).

Le type d'essai tel que décrit précédemment ne permet pas l'analyse du retrait au jeune âge (moins de 24 heures) et très peu de normes proposent une procédure pour y arriver. À cette fin, des essais ont été proposés pour permettre l'évaluation du retrait au jeune âge. Ces appareils comprennent généralement un coffrage avec un très faible coefficient de friction permettant d'éliminer le processus normal de décoffrage et permettant l'évaluation de la déformation du spécimen à même le coffrage.

3.1.1.4 Paramètres d'influences

Plusieurs paramètres affectent l'amplitude et le type de retrait subit par le béton. Le rapport E/C a un impact important sur l'amplitude du retrait. Il a été démontré que l'autodessication survient pour un rapport E/C de 0.42 et moins, car pour un rapport plus grand il y a assez d'eau libre pour l'hydratation complète du béton. En dessous de cette valeur, le ciment doit utiliser l'eau contenue dans les pores capillaires (Holt 2001, Habel et al. 2006). La Figure 3.4 présente le retrait endogène en fonction du rapport E/C. Le retrait endogène est inversement proportionnel au rapport E/C, ce qui est attribuable au raffinement de la porosité de la pâte de ciment. De plus, l'ajout minéral tel que la fumée de silice vient davantage raffiner la microstructure de la pâte de ciment et augmente ainsi le retrait (Holt 2001). Le retrait de séchage quant à lui diminue avec la réduction du rapport E/C et la présence de la fumée de silice.

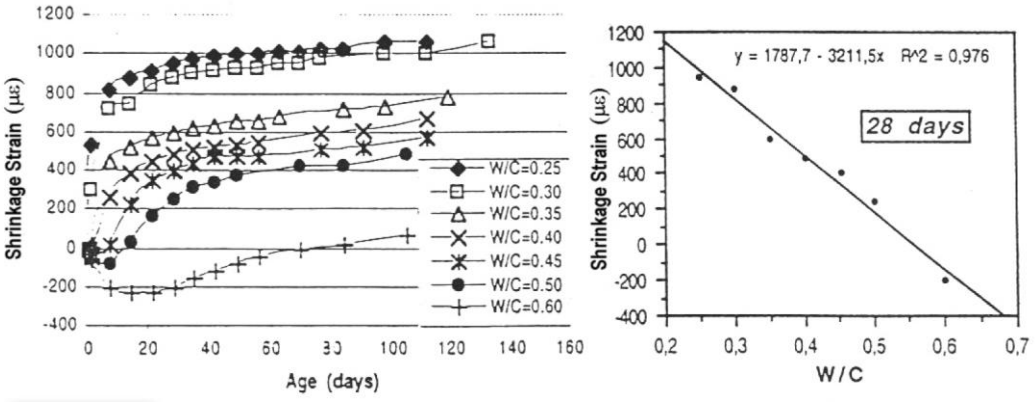


Figure 3.4 Évolution du retrait en fonction du rapport E/C (Holt 2001)

Il a aussi été démontré que l'utilisation de granulats permet de réduire les retrait endogène et de séchage, car leur taille et leur rigidité s'opposent à la contraction causée par le retrait (Holt 2001, Habel et al. 2006) .

La cure humide du béton est un aspect très important qui influence l'amplitude du retrait. Une cure humide permet d'alimenter la réaction d'hydratation et ainsi réduire voir éliminer le phénomène d'autodessication. Elle permet aussi de retarder le retrait de séchage, ce qui laisse le temps au béton de développer une matrice rigide qui résistera mieux à la contraction subséquente. La cure permet aussi de réduire l'apparition de fissure causée par le retrait de séchage.

3.1.2 Fluage

Le fluage représente la capacité d'un matériau à se déformer de manière décroissante sous un chargement constant. Le fluage propre caractérise les déformations subies sans échange d'humidité avec le milieu ambiant tandis que le fluage de séchage représente les déformations causées par un échange d'humidité entre le béton et le milieu ambiant. Le fluage est une déformation importante à considérer pour les structures en béton. Le fluage en compression augmente beaucoup la flèche en service des dalles et poutres, et augmente les pertes de précontrainte. Par contre, le fluage en traction dans le cas d'élément soumis à un retrait restreint permet la réduction des contraintes et réduisant ainsi la fissuration qui en résulte (Habel 2004).

3.1.2.1 Phénomène

La déformation totale d'un béton soumis à une charge constante se divise en deux composantes principales, soit la déformation élastique et la déformation de fluage. La déformation élastique est considérée comme instantanée et est proportionnelle à la charge appliquée (Figure 3.5). De plus, elle est complètement réversible si la charge est retirée. La déformation de fluage est une déformation non instantanée qui augmente initialement rapidement et se stabilise progressivement avec le temps. Lorsque la charge est retirée, seulement une partie du fluage est récupérable et le processus de récupération se fait lentement (Habel 2004). Ces déformations sont présentées sur la Figure 3.5.

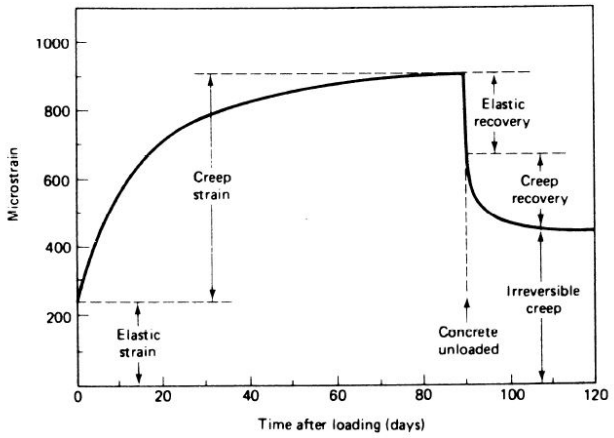


Figure 3.5 Évolution du fluage en fonction du temps

3.1.2.2 Mécanisme du fluage

Deux types de mécanismes permettent d'expliquer le comportement du fluage, soit les mécanismes directs qui font référence à la pâte de ciment et les mécanismes indirects qui font référence à l'aspect hétérogène du béton.

<u>Mécanismes directs</u>

La théorie de la migration de l'eau se base sur le concept que la pâte de ciment agit comme un gel. Lorsqu'une charge est appliquée, l'eau sous pression élevée contenue entre les feuillets d'hydrate

est expulsée vers les pores capillaires avoisinants soumis à de plus faibles pressions causant ainsi le squelette d'hydrate de se comprimer sur lui-même. Cette théorie permet d'expliquer l'aspect décroissant du fluage, car la pression reprise par l'eau entre les feuillets diminue avec son expulsion progressive. Lorsque la charge est retirée, l'équilibre hydrique est à nouveau déstabilisé et l'eau reprend sa migration vers les pores de gel. De plus, la formation de nouveaux liens entre les feuillets d'hydrate explique la déformation non recouvrable lors du déchargement. La théorie de la migration de l'eau explique en grande partie les déformations à court terme. Mais comme son nom l'indique, elle ne peut expliquer le fluage qui survient en présence d'humidité relative très faible (Acker et al. 2001, Charron 2003, Hilaire et al. 2014).

La théorie de l'écoulement visqueux stipule que la pâte de ciment agit comme un liquide avec une très grande viscosité. Lorsque le béton est soumis à un chargement, il y a un glissement entre les feuillets d'hydrate et formation de nouveaux liens entre eux, ce qui se traduit par une déformation de la pâte de ciment. De plus, la viscosité augmente avec le degré d'hydratation du béton, et par conséquent la capacité de fluage diminue plus la charge est appliqué tardivement. Cette théorie permet d'expliquer aussi la déformation permanente dans le béton, mais n'explique en rien les déformations recouvrables. Les déformations permanentes dans le fluage sont principalement attribuées à cette théorie et causent les déformations de fluage à long terme (Acker et al. 2001, Charron 2003, Hilaire et al. 2014).

Mécanismes indirects

La microfissuration dans la pâte agit comme élément facilitateur de l'écoulement visqueux, favorisant un déplacement au sein des feuillets. De plus, la microfissuration crée un vide à humidité nulle dans le béton. Ceci induit un transfert d'eau du béton environnant vers la fissuration pour rétablir l'équilibre, causant ainsi une déformation. Puisque le transfert ralentit avec le temps, il en résulte l'aspect décroissant du fluage (Charron 2003, Rossi et al. 2013). Il semble que la microfissuration joue un rôle significatif dans le fluage en traction et serait la cause principale des déformations induites (Bissonnette et al. 2000, Hilaire et al. 2014).

La présence de granulats rigides et élastiques dans le béton permet d'emmagasiner de l'énergie sous forme de déformation lorsque la pâte de ciment est soumise au chargement constant par les mécanismes d'écoulement visqueux et de migration de l'eau définis précédemment. Lorsque la

charge est retirée, cette énergie est libérée et permet d'expliquer la portion recouvrable du fluage (Charron 2003).

3.1.2.3 Essais de caractérisation

Le fluage en compression est un phénomène relativement bien connu et des essais normalisés existent pour le mesurer. D'après la norme ASTM C512, l'appareil de chargement tel que présenté à la Figure 3.6 peut simultanément mettre en charge plusieurs spécimens montés les uns sur les autres. La charge constante peut être appliquée hydrauliquement ou encore avec un ressort. La charge doit être égale ou inférieure à 40% de la résistance en compression du béton lors du chargement. Pour une charge supérieure à 40 %, la linéarité des déformations n'est plus assurée.

Figure 3.6 Montage pour essais de fluage en compression (Habel 2004)

Pour la mesure des déformations, il est permis d'utiliser un instrument de mesure coulé dans le béton, attaché en surface ou portatif (nécessite l'application de points d'ancrage). En ce qui a trait à la fabrication des spécimens, ceux-ci doivent être démoulés entre 20 et 48 heures après le contact eau-ciment et doivent être gardés dans un milieu humide pendant 7 jours. Par la suite, les spécimens subissant le chargement constant doivent être gardés dans un environnement contrôlé à 23±1 °C et à 50±4 % d'humidité relative (ASTM International 2015).

Dans le cas d'un spécimen laissé à l'air libre, celui-ci subira un fluage total, soit la somme du fluage propre et du fluage de séchage. Pour évaluer les déformations induites par le fluage propre, il suffit de sceller les surfaces d'un spécimen à l'aide d'une membrane étanche pour empêcher l'échange d'humidité entre le béton et l'air ambiant. Le fluage de séchage quant à lui est obtenu en soustrayant au fluage total le fluage propre (Habel 2004).

Puisque le béton est généralement utilisé pour son comportement en compression dans les structures, l'évaluation du fluage en compression est beaucoup plus fréquente par rapport à l'évaluation du fluage en traction. En conséquence, il n'existe pas de norme pour la mesure du fluage en traction. Cependant, plusieurs méthodes ont été proposées dans la documentation.

Le montage présenté à la Figure 3.7 a été proposé par Bissonnette et al. (2007). Trois spécimens sont chargés par un bras de levier activé par un vérin, ce qui permet un bon contrôle de la charge appliquée. Une cellule de charge installée au-dessus du levier mesure la force appliquée. L'appareil est installé dans une chambre avec environnement contrôlé à 23±1 °C et à une humidité relative de 50±2 %. Les spécimens de béton sont instrumentés avec des extensomètres installés de chaque côté.

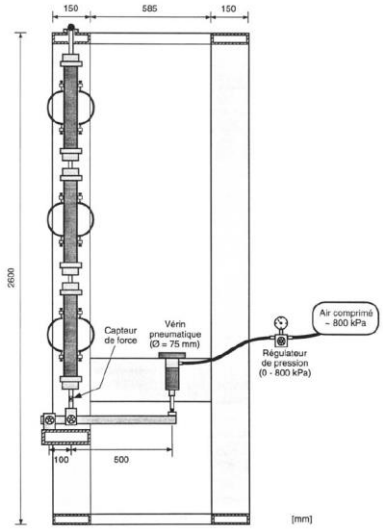


Figure 3.7 Montage pour essais de fluage en traction (Bissonnette et al. 2007)

3.1.2.4 Paramètres d'influence

Plusieurs paramètres viennent affecter l'amplitude ou la cinétique du fluage. De plus, ces paramètres vont avoir un impact différent sur le fluage en compression et en traction. Selon certains chercheurs, le fluage en traction est égal ou supérieur à celui en compression (Bissonnette et al. 2000). D'autres indiquent que le fluage en traction est inférieur (Rossi et al. 2013, Hilaire et al. 2014). Il en ressort que le fluage en traction est un phénomène peu connu et que la composition du béton peut avoir un effet contraire sur le fluage selon le mode d'effort.

Âge de chargement

L'amplitude du fluage diminue lorsque la charge est appliquée tardivement. Ceci est dû au développement des propriétés mécaniques et au durcissement de la pâte lors de l'hydratation du béton. Il y a une diminution importante du fluage entre une application du chargement le premier et le septième jour après le contact E/C. Il a été aussi noté que l'ajout de fibres dans le matériau peut réduire l'amplitude du fluage mesuré. Cela est attribuable à l'amélioration de la microstructure au niveau de l'interface pâte-fibres (Bissonnette et al. 2007).

Quantité de la pâte de ciment

Dans le cas du fluage en compression, une diminution de la quantité de pâte de ciment entraine une diminution respective du fluage. Cela s'explique par le fait qu'une diminution de la quantité de pâte implique une augmentation de la proportion de granulats dans le béton. Les granulats étant des éléments rigides, ceux-ci vont s'opposer à la déformation (Bissonnette et al. 2000).

Par contre, dans le cas du fluage en traction, un comportement inverse est observé par Bissonnette et al. (2007) et est présenté à la Figure 3.8. En effet, lorsque la quantité de pâte de ciment diminue, il y a une augmentation du fluage en traction. Ce phénomène peut s'expliquer par l'augmentation de la quantité d'interfaces pâte-granulat. Ces interfaces étant sensibles à la microfissuration, une augmentation de la déformation en résulte.

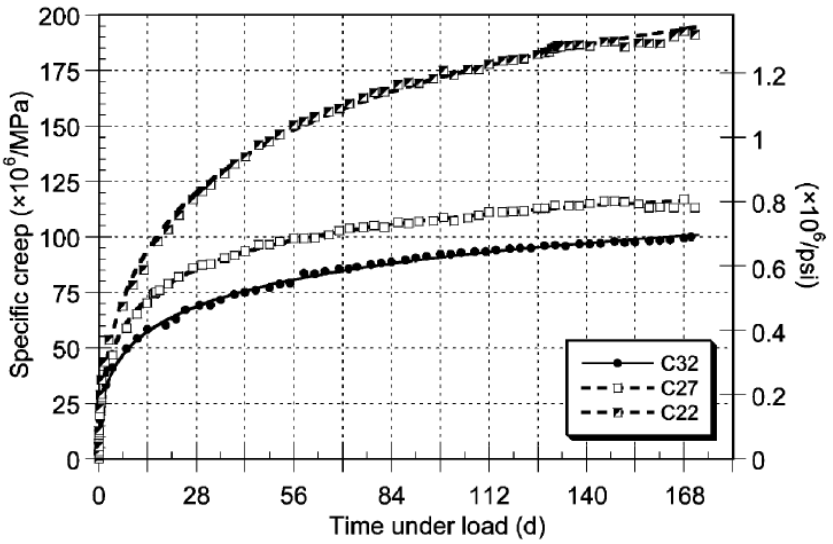


Figure 3.8 Fluage spécifique en fonction de la teneur en ciment (Bissonnette et al. 2007)

De plus, il a été noté que l'utilisation de fumée de silice dans un béton avec un rapport E/C entre 0.35 et 0.55 augmente légèrement le fluage en traction, contrairement à ce qui est observé en compression (Bissonnette et al. 2000).

Rapport E/C

L'augmentation du rapport E/C augmente le fluage, qu'il soit en compression ou en traction. Ceci est attribuable à la diminution de la rigidité de la pâte cimentaire avec une hausse du rapport E/C (Bissonnette et al. 2000).

Quantité de fibres

En compression, le fluage est réduit par l'ajout de fibres d'acier dans la pâte. Ces fibres possèdent un module élastique nettement supérieur à celui du béton et agissent comme de petits granulats dans la pâte de ciment. Inversement, l'ajout de fibres affichant un module élastique plus faible que le béton, tel que les fibres synthétiques, augmente le fluage (Zhao et al. 2016).

Pour ce qui est du fluage en traction, les fibres peuvent avoir un effet positif ou négatif. Bissonnette et al. (2007) ont testé l'impact de fibres ondulées et avec crochets. Les résultats sont présentés à la Figure 3.9. Les fibres ondulées conduisent à un fluage spécifique inférieur au béton de référence, alors que les fibres avec crochet engendrent un fluage plus élevé. Il a été supposé que la surface spécifique de la fibre a un impact important sur l'interaction entre les fibres et la pâte de ciment.

Une surface spécifique élevée serait meilleure pour réduire le fluage. L'impact de la quantité de fibres dans le béton a aussi été mesuré pour les fibres ondulées. Une augmentation du fluage en traction a été observée et serait probablement attribuable à l'augmentation de la quantité d'interfaces dans la pâte de ciment.

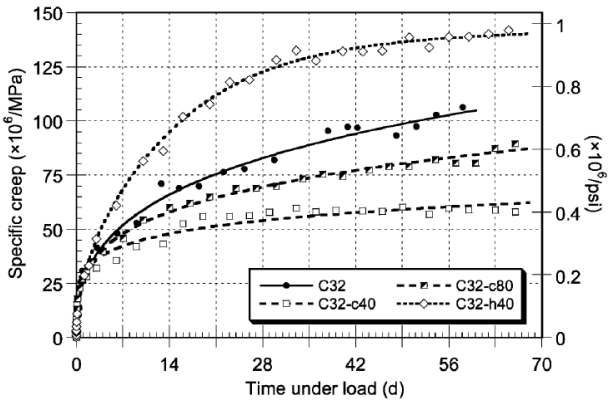


Figure 3.9 Fluage spécifique en fonction de différents types de fibres et quantités (Bissonnette et al. 2007)

3.2 Réparation en béton

Les réparations en béton représentent un problème d'ingénierie complexe. Dans le but d'effectuer une réparation adéquate, l'ingénieur doit répondre aux questions suivantes : quel est le degré de détérioration actuelle de la structure, quelles sont les causes de la détérioration, quel est l'état de l'environnement intérieur et extérieur de la structure, quels sont les objectifs de conception, quel type de matériaux choisir et finalement, quelle méthode de réparation doit être utilisée. De plus, l'ingénieur doit aussi tenir compte des différents agents qui seront impliqués dans le processus de réparation, tels que les fabricants de matériaux, le maître d'ouvrage et la main d'œuvre (Vaysburd 2006).

À cet effet, il devient important d'utiliser une approche de type holistique. Celle-ci requière l'analyse des différents aspects du problème, tels qu'énumérés plus haut, mais doit aussi considérer l'impact qu'une solution aura sur les nombreux aspects du problème. Cela permet ainsi d'obtenir

une réparation durable et qui répond adéquatement aux objectifs de restauration (Emmons et al. 1996).

3.2.1 Choix des matériaux de réparation

Il existe trois catégories principales de matériaux couramment utilisés dans le domaine des réparations de béton : les matériaux à base de polymère, tel que les époxys, les ciments avec polymère modifié et finalement les matériaux à base de ciment Portland. Même si chaque catégorie comporte ses avantages et désavantages, aucun matériau unique n'est applicable à toutes les réparations. Chaque type de catégorie a sa propre niche d'applications qui est fonction des besoins et des conditions en chantier (Morgan 1996). Cependant, le présent chapitre s'intéresse principalement aux réparations à base de ciment Portland.

Pendant longtemps, il était recommandé d'effectuer des réparations avec un béton ayant des caractéristiques similaires au béton d'origine. Ce type de raisonnement n'est pas tout à fait adéquat. En effet, si le béton original est défectueux, effectuer une réparation avec un matériau semblable produira des résultats similaires avec le temps et requerra une nouvelle réparation (Morgan 1996, Vaysburd 2006).

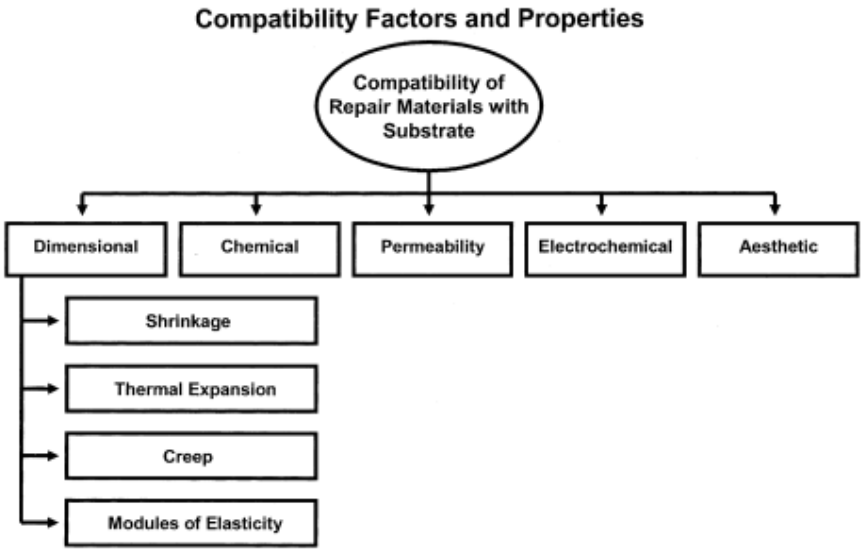


Figure 3.10 Facteurs de compatibilité entre la réparation et le substrat (Vaysburd 2006)

Dans cet optique, Vaysburd (2006) préconise une approche par compatibilité du matériau de réparation par rapport au substrat (Figure 3.10). Les différents aspects de compatibilité de cette approche sont expliqués en plus amples détails dans les sections qui suivent.

3.2.1.1 Compatibilité dimensionnelle

La compatibilité dimensionnelle est un des aspects les plus importants au niveau d'une réparation et est la cause principale de la défaillance des réparations (Vaysburd 2006). Cela est dû au fait qu'un béton de réparation va subir des changements de volume importants durant le durcissement de la pâte de ciment (retrait et effet thermique). Ces changements de volume de la réparation sont restreints par la matrice rigide du substrat, ce qui induit des efforts de traction dans la réparation. Ce phénomène est appelé retrait restreint. Si cette force en traction devient supérieure à la résistance, une fissuration précoce de la réparation apparaitra et compromettra drastiquement sa durabilité et son efficacité (Bissonnette et al. 1995).

Les changements de volume au jeune âge ont pour origine le retrait du béton et les déformations thermiques. Celles-ci sont principalement reliées à la réaction exothermique d'hydratation du béton. En se réchauffant, le béton se dilate, pour ensuite se contracter en se refroidissant. Les déformations thermiques peuvent aussi être d'origine saisonnière ou journalière (Morgan 1996).

La contrainte générée par le retrait restreint de la réparation est aussi fonction de son module de Young. Un module trop élevé ou une évolution trop rapide du module dans le temps peut mener à une augmentation trop rapide de la contrainte et causer une fissuration précoce dans la réparation. Ainsi, un module de Young le plus faible possible est tout indiqué pour le béton de réparation. Par ailleurs, le fluage en traction a un impact important sur la contrainte générée par le retrait restreint, pouvant diminuer de 30 à 40 % la contrainte en traction subite par la réparation (Charron 2003). Il est donc recommandable d'utiliser un béton associé à un fluage le plus élevé possible (Vaysburd et al. 2000).

Le niveau de restreinte imposée à une réparation en béton est fonction de trois paramètres généraux, soit la géométrie générale de la réparation et du substrat (épaisseurs, inertie des sections, présence de barres d'armatures), les propriétés mécaniques des bétons de réparation et du substrat (module de Young) et finalement la restreinte appliquée au substrat par ses appuis (Bernard 2000). À propos de la géométrie générale, il a été noté par Habel (2004) qu'une réparation épaisse subira moins de restreinte de ses déformations qu'une réparation mince. Par contre, une réparation épaisse sera plus

sujette au problème de déformation thermique puisque l'élément s'échauffera davantage (Habel et al. 2006). La présence de barres d'armature dans la réparation vient réduire la contrainte imposée à la réparation tout en limitant l'ouverture des fissures (Habel 2004).

3.2.1.2 Compatibilité de perméabilité

La perméabilité de la couche de réparation constitue un bon indicateur de la durabilité du béton, d'où son importance. Dans le but de freiner la progression d'agents agressifs, comme les ions chlorure responsables de la corrosion, un béton de réparation avec une perméabilité la plus faible possible est préférable. Aussi, il est important de tenir compte de l'état de fissuration du béton en condition de service, car les fissures augmentent drastiquement la perméabilité et la cinétique de transport dans le béton (Vaysburd et al. 2000). Par contre, il a été noté que dans certain cas, une faible perméabilité doit être utilisée avec précaution. Par exemple, dans une structure saturée en eau, tel qu'un barrage, une accumulation d'eau peut se créer derrière la réparation et appliquer une pression indésirable accentuant ainsi l'effet des cycles de gel et dégel (Morgan 1996).

3.2.1.3 Compatibilité électrochimique

La compatibilité électrochimique est un aspect important, car elle est reliée à la cause principale de dégradation du béton, soit la corrosion des barres d'armature. Malheureusement, l'analyse de l'état électrochimique qui prévaut dans le béton d'origine est difficile, voire impossible à évaluer adéquatement. Il a été observé dans certains cas, que l'application d'une réparation avec des barres d'armature traversant le béton du substrat et de réparation peut causer une accélération prononcée de la réaction de corrosion de ces barres à l'interface des deux bétons. Cette corrosion accélérée peut mener à l'éclatement du béton sur le pourtour de la réparation et ainsi à sa fragilisation (Emmons et al. 1996).

Il existe plusieurs méthodes pour mitiger la réaction de corrosion, soit l'application d'une barrière électrochimique sur les barres d'armature, l'ajout d'une protection cathodique avec l'aide d'une anode sacrificielle, ou encore la stabilisation chimique de la surface des barres. Par contre, l'efficacité hors de tout doute de ces méthodes n'a jamais été documentée adéquatement. De plus, l'utilisation de certaines de ces méthodes requiert une installation irréprochable pour assurer leur efficacité, et ce, malgré des conditions en chantier difficiles (travail dans un espace restreint, difficulté à atteindre l'endos des barres exposées) (Vaysburd et al. 2000).

3.2.2 Préparation de la surface

La préparation de la surface a pour objectif l'obtention d'une surface rugueuse saine et propre favorisant l'adhérence entre le béton de réparation et son socle. L'adhésion de la surface dépend de 2 facteurs principaux, soit l'emboitement mécanique et l'adhésion chimique entre les bétons. L'emboitement mécanique est lié directement à la rugosité tandis que l'adhésion chimique est principalement influencée par les mêmes paramètres que l'adhésion entre la pâte et les granulats (Courard et al. 2014, Grigoriadis 2016).

3.2.2.1 Démolition du béton endommagé

La préparation de surface doit assurer un bon emboitement à l'interface et créer un béton solide et homogène, libre de fissuration au niveau du socle. En règle générale, l'adhérence est proportionnelle à la rugosité de la surface. Cependant, cela n'est pas toujours vrai si la surface du substrat n'est pas saine et possède beaucoup de microfissures (Garbacz et al. 2006). La Figure 3.11 présente différentes méthodes en fonction de la rugosité. On remarque que le marteau piqueur et l'hydrodémolition offrent la meilleure rugosité, suivis par la scarification, le sable projeté et finalement le polissage.

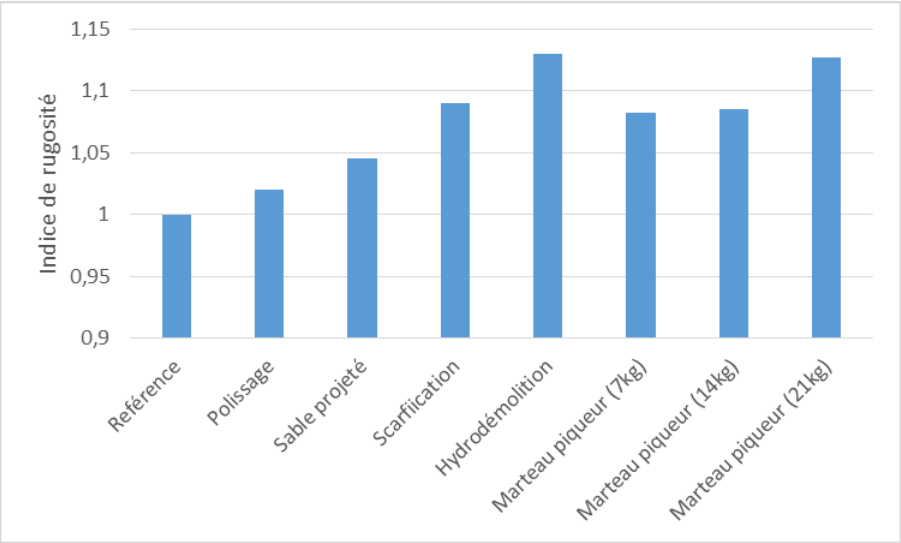


Figure 3.11 Rugosité en fonction de différentes méthodes de préparation de surface (Bissonnette et al. 2006)

Par contre, en observant la Figure 3.12 qui met en relation l'état de fissuration et la résistance en traction à l'interface, la situation change. En effet, les méthodes à impacts comme le marteau piqueur introduisent des contraintes importantes sur la couche supérieure du substrat (Morgan 1996, Bissonnette et al. 2006, Garbacz et al. 2006) , ce qui explique la quantité élevée de fissures observées par rapport aux autres techniques. Cette fissuration élevée pour le marteau piqueur se traduit par une baisse significative de la résistance en traction de la réparation. En somme, l'hydrodémolition, suivie par la technique à sable projeté, sont les méthodes de préparation de surface les plus efficaces (Bissonnette et al. 2006, Courard et al. 2014).

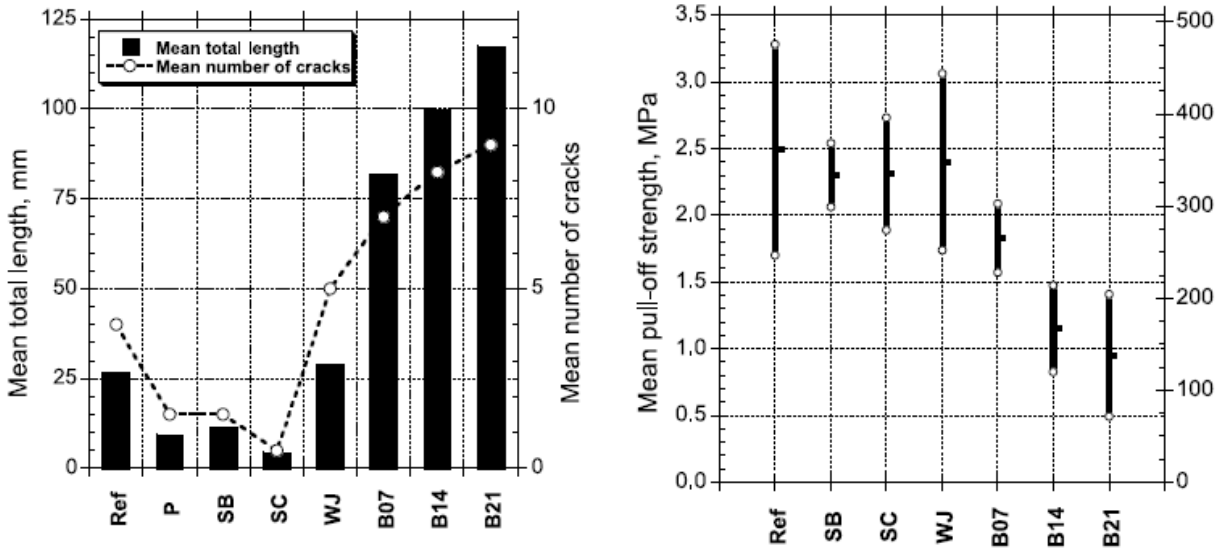


Figure 3.12 Niveau de fissuration et résistance en traction en fonction de différentes méthodes de préparation de surface (Bissonnette et al. 2006)

Il est à noter que l'augmentation de la résistance en compression du socle réduit l'impact de la microfissuration et modifie selon la méthode le mode de défaillance en traction de la réparation, soit une délamination au niveau de l'interface plutôt que dans le substrat (Courard et al. 2014).

3.2.2.2 Facteurs influençant l'adhérence à l'interface

Pour les réparations à base cimentaire, il est préférable d'avoir une base saturée avec surface séchée, c'est-à-dire une surface avec un degré d'humidité élevé, mais sans présence d'accumulation

d'eau. Cela évite ainsi que le béton du substrat absorbe l'eau de la réparation et produise une zone de béton mal hydraté. Inversement, une accumulation d'eau en surface élève le rapport E/C à l'interface et diminue la résistance mécanique de la réparation. Cette dernière situation est beaucoup plus dommageable pour une réparation et il est préférable d'avoir une surface plus sèche que trop humide (Morgan 1996).

L'utilisation d'un agent liant appliqué à la surface du substrat peut augmenter de manière significative la résistance de l'interface (Garbacz et al. 2006). Cependant, cette méthode ne fait pas l'unanimité. En effet, l'ajout d'une couche supplémentaire à l'interface ajoute une complexité et un plan de délaminage potentiel supplémentaire. De plus, il a été noté que dans certains cas, l'utilisation d'une couche liante réduit la résistance en traction à l'interface, notamment dans le cas de béton à haute performance (Mohammadi et al. 2014).

Un autre facteur important est la propreté de la surface. Celle-ci doit être sèche, cohésive, libre de poussières et d'huile de coffrage (Garbacz et al. 2006).

L'adhérence chimique entre la réparation et le socle est similaire à celle qui existe entre la pâte et les granulats. Ainsi l'amélioration de la finesse et la compacité de la pâte cimentaire augmentent la résistance. Il a été observé que l'ajout de fumée de silice a aussi un effet bénéfique sur l'adhérence (Momayez et al. 2005).

3.2.3 Essais de caractérisation de l'interface

3.2.3.1 Caractérisation de la rugosité

Plusieurs méthodes permettent l'évaluation de la rugosité d'une surface, telles que la méthode de classification des surfaces en béton (*concrete surface profil*), la méthode d'épandage de sable (*patch sand test*), ainsi que les méthodes de profilage mécanique et au laser. Malheureusement, ces méthodes proposent toutes leurs propres indices et manières de quantifier la rugosité, sans qu'aucune ne soit adoptée ou normée. Cependant, une corrélation entre certains de ces essais a été notée (Garbacz et al. 2006).

La méthode de classification des surfaces en béton requiert la comparaison de la surface avec 9 jalons de rugosité croissante. Cet évaluation de la rugosité est rapide, mais ne permet qu'une appréciation générale de la surface, et dépend aussi de l'aisance de l'opérateur (Grigoriadis 2016).

La méthode d'épandage de sable utilise un volume précis de sable appliqué sur la surface à mesurer. À partir du diamètre moyen du disque de sable généré, il est possible de calculer un indice de rugosité de surface (*surface rugosity index*). Cet indice permet de quantifier la macrotexture de la surface et possède les avantages d'être peu dispendieux et rapide à déterminer, mais dépend beaucoup de l'expérience de l'opérateur et peut seulement être obtenu pour des surfaces horizontales (Grigoriadis 2016).

Les méthodes de profilage mécanique permettent de tracer le profil de la structure le long d'un axe. À partir de ce profil, il est possible d'analyser la surface en fonction de plusieurs paramètres tels que l'amplitude moyenne ou encore le rayon moyen de courbure. Cette méthode permet une analyse plus poussée de la surface, mais nécessite un instrument de mesure plus encombrant et nécessite un contact avec le spécimen (Grigoriadis 2016).

La méthode de profilage au laser permet d'analyser rapidement et de manière très précise une surface le long de plusieurs bandes. Ce type de méthode utilise des paramètres similaires à ceux du profilage mécanique et nécessite un équipement très spécialisé, ce qui rend son application difficile en condition de chantier. Par contre, le laser permet une analyse rigoureuse de la surface en trois dimensions (Grigoriadis 2016).

3.2.3.2 Caractérisation de la résistance à l'interface

Quatre méthodes sont couramment utilisées pour quantifier la résistance à l'interface (Figure 3.13). L'essai d'arrachement (*pull-off*) permet l'évaluation de la résistance en traction directe de la réparation. L'essai de fendage (*splitting prism*) permet l'analyse de la résistance à l'interface de manière indirecte et est basé sur le concept de l'essai brésilien. L'essai en cisaillement direct (*direct shear*) permet de valider la résistance de l'interface en cisaillement pur. Finalement, l'essai à surface inclinée (*slant shear*) permet l'analyse de la réparation en condition de compression et de cisaillement.

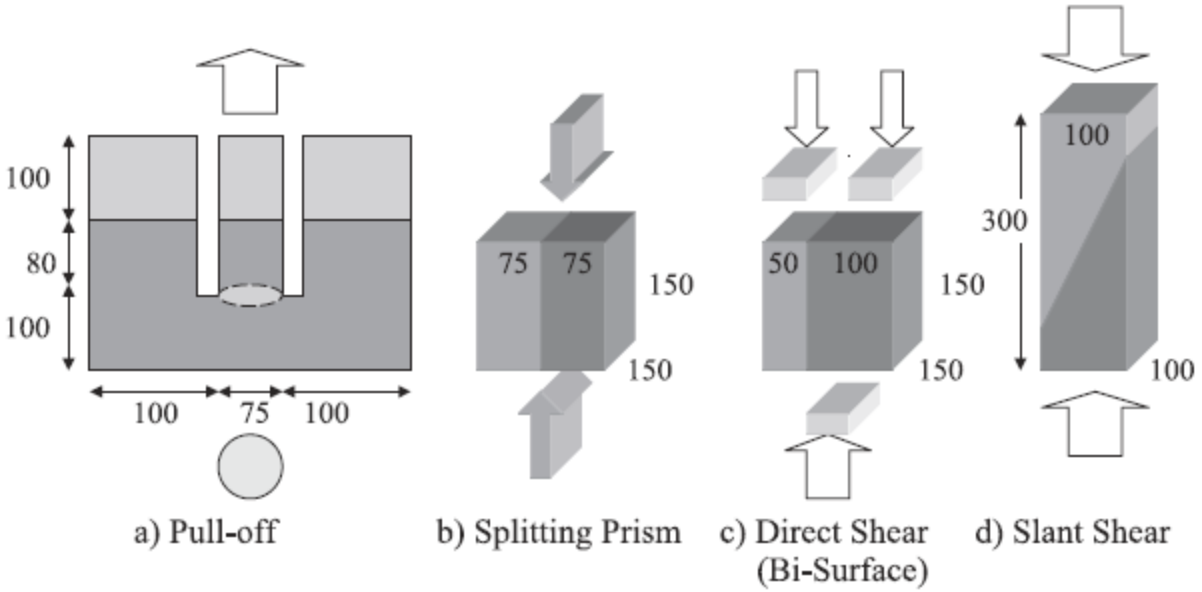


Figure 3.13 Schématisation de différents essais de caractérisation de la résistance d'une réparation (Momayez et al. 2005)

Momayez et al. (2005) ont comparé les résistances mesurées et ont observé un ratio moyen, par rapport à l'essai en traction directe, de 1.1 pour l'essai en traction indirecte, de 1.8 pour l'essai en cisaillement pur et de 7.3 pour l'essai à surface inclinée. L'ingénieur-concepteur doit donc faire preuve de discernement en ce qui a trait aux valeurs de résistance à utiliser en fonction des contraintes appliquées réellement sur l'interface.

De plus, Austin et al. (1999) ont émis des doutes sur la validité de l'essai à surface inclinée, car dans le cas d'une différence importante de module entre les bétons, il peut y avoir une concentration des efforts sur les coins de la pente. De plus, l'essai étant réalisé principalement en compression, l'impact de la rugosité et de la microfissuration du socle sur l'interface est diminué. Aussi, la pente n'est pas nécessairement la pente la plus critique en fonction des propriétés mécaniques des bétons. Il est donc recommandé d'effectuer l'essai pour plusieurs pentes afin de tracer l'enveloppe de résistance. Cela donne ainsi un portrait juste et adéquat de la résistance de la réparation.

3.3 Cas type – Déformation d'une poutre avec réparation mince en BFUP

La présente section résume les résultats obtenus par Bastien-Masse (2010) en ce qui a trait au comportement déformationnel au jeune âge d'une poutre réparée avec couche mince. Le dimensionnement de la poutre étudiée dans ce projet est basé sur une tranche transversale d'une dalle de pont modèle (dalle sur poutre d'acier). Les dimensions de la poutre étudiée sont présentées à la Figure 3.14. En tout, trois poutres ont été fabriquées : une poutre de référence sans réparation, une poutre réparée en BO et une poutre avec une réparation en BFUP.

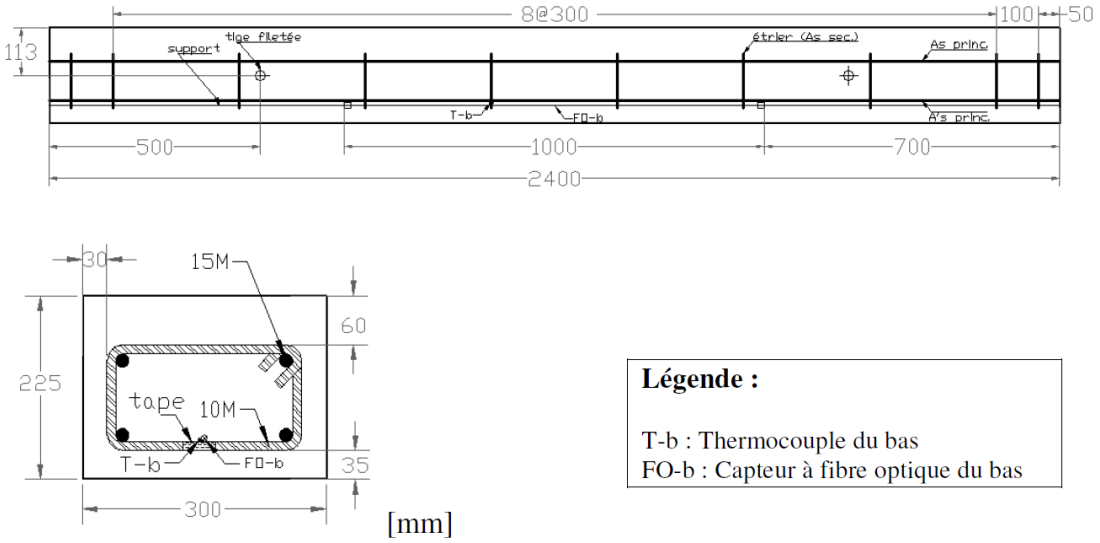


Figure 3.14 Plan de la poutre étudiée sans réparation (Bastien-Masse 2010)

3.3.1 Fabrication

La fabrication a été effectuée en deux phases, soit la fabrication des poutres (substrat), et la fabrication des réparations. Les coffrages, les armatures et les coulées ont été réalisés à Polytechnique Montréal.

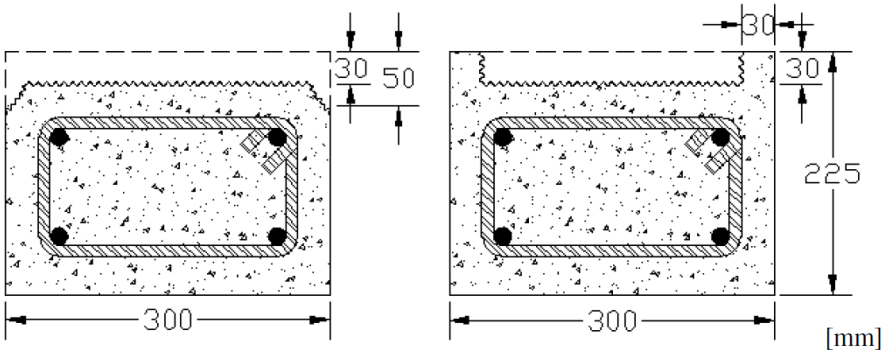
Le béton du substrat est un béton de 30 MPa à 28 jours. Les propriétés mécaniques sont résumées au Tableau 3.1. Avant la coulée, un capteur à fibre optique de marque SOFO et un thermocouple ont été installés dans le centre du coffrage au niveau des armatures du bas. Suite à la coulée des

poutres, une cure avec jute humide a suivi pendant 7 jours. Les trois spécimens ont été décoffrés après 3 jours, soit pendant la cure. Finalement, après la fin de la cure, un revêtement de résine de marque SikaFloor® 2003 a été appliqué sur les côtés pour simuler un comportement continu de la poutre de part et d'autre.

Tableau 3.1 Propriétés mécaniques générales du béton de substrat (Bastien-Masse 2010)

Propriété	Valeur
f'_c	31,5 MPa
f'_t (essai brésilien)	2,9 MPa
E_c	27 611 MPa
ν	0,264

La surface des deux poutres nécessitant une réparation a été préparée par hydrodémolition. Pour éviter un éclatement des coins, un périmètre de 30 mm a été laissé intact sur le tour de la poutre. Par la suite, les coins ont été éclatés avec un marteau et un poinçon tel que présenté à la Figure 3.15. Une épaisseur de réparation de 30 mm a été choisie pour simuler le type de dommage qui surviendrait suite à des problèmes communs tels que des cycles de gel/dégel, épandage de sel de déverglaçage et condition de retrait restreint.



a) Coins éclatés b) Démolition en forme de cuvette

Figure 3.15 Séquence de démolition de la surface de réparation (Bastien-Masse 2010)

Vingt-quatre heures avant la coulée des réparations, l'interface a été exposée à des cycles de mouillage et de séchage et dûment nettoyée à l'air comprimé avant la coulée de la réparation. Comme pour le substrat, un capteur optique de marque SOFO et un thermocouple ont été installés au centre de la réparation. Lors de la coulée, une attention particulière a été apportée au BFUP pour favoriser l'orientation des fibres dans la poutre. Une feuille de polyéthylène a été appliqué sur le BFUP jusqu'au décoffrage. Pour le BO, un plastique similaire a été appliqué pendant 24 heures suivie d'une cure avec jute humide jusqu'au décoffrage. Les poutres réparées ont toutes deux été décoffrées après 3.75 jours exactement. Les surfaces latérales ont été scellées à nouveau avec du SikaFloor® 2003.

3.3.2 Paramètres d'essais

Les poutres ont été installées sur des appuis simples dans une chambre environnementale à 22±2 °C et à 50±5 % d'humidité relative. De plus, un capteur a été installé au centre de chaque poutre pour effectuer le suivi de la flèche tel que présenté à la Figure 3.16. L'installation du LVDT a précédé les réparations afin d'effectuer le suivi des déformations à partir du temps zéro.

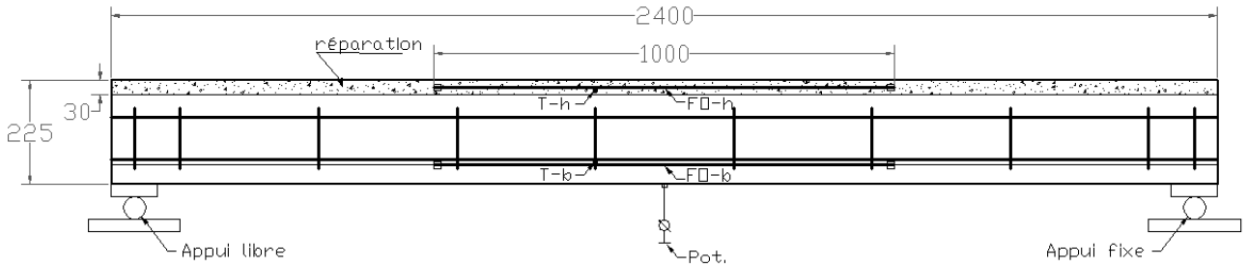


Figure 3.16 Plan d'instrumentation des poutres réparées et condition d'appuis (Bastien-Masse 2010)

3.3.3 Résultats déformationnels au jeune âge

La Figure 3.17 présente la déformation enregistrée par le capteur SOFO dans la réparation ainsi que la flèche au centre de la poutre. Ces déformations sont causées principalement par les déformations thermiques, l'absorption de l'eau de cure, le retrait ainsi que le comportement viscoélastique.

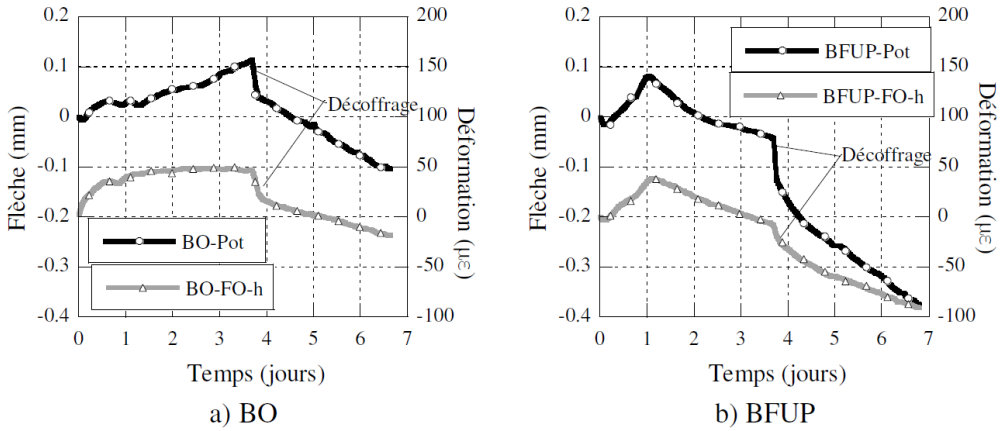


Figure 3.17 Déformation et flèche dans les poutres réparées en BO et en BFUP (Bastien-Masse 2010)

Dans le cas des 2 bétons, il est possible de constater que la réparation subit un gonflement. Ce gonflement est attribuable au dégagement de chaleur lors de la réaction d'hydratation. Bastien-Masse a observé un échauffement maximal par rapport à la température ambiante de 1.3 °C pour le BO et 2.3 °C pour le BFUP. Cet échauffement est conséquent avec le principe de réparation en couche mince. Puisque la réparation est localisée sur la partie supérieure de la poutre, le gonflement de celle-ci engendre une flexion de la poutre vers le haut tel que mesuré par le capteur au centre de la poutre.

Dans le cas du BO, une cure humide est appliquée et se traduit en une absorption d'eau par le béton, ce qui continue le gonflement. Pour sa part, le BFUP, étant complètement scellé, voit sa déformation diminuer à cause de l'initiation du retrait endogène et du refroidissement de la couche de béton durcie.

Après 3.75 jours les deux poutres réparées sont décoffrées et leur cure terminée. Le retrait du coffrage cause une diminution instantanée de la déformation et de la flèche, car le coffrage offrait une rigidité additionnelle à la poutre. Après le décoffrage, les deux poutres subissent un retrait total, soit un retrait endogène et de séchage. La Figure 3.18 présente les déformations dans les capteurs SOFO dans la réparation et dans le substrat à long terme.

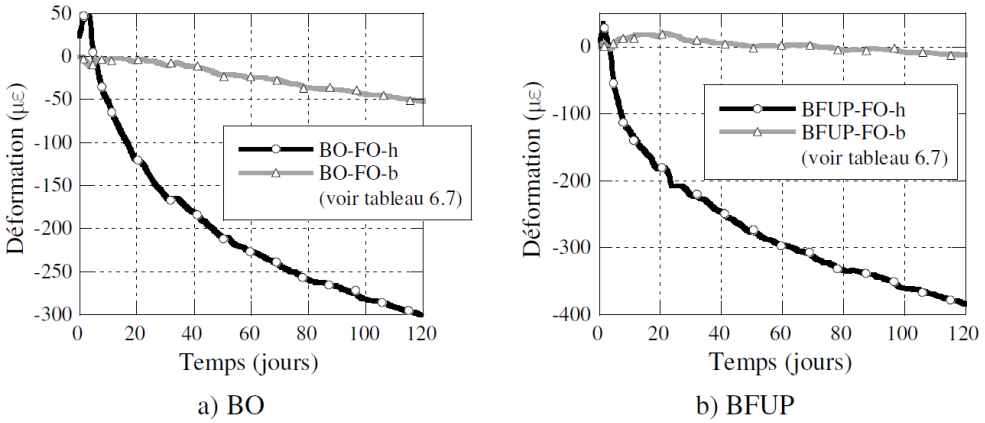


Figure 3.18 Déformation à long terme dans les poutres réparées en BO et en BFUP (Bastien-Masse 2010)

De ces valeurs il a été possible pour Bastien-Masse d'évaluer la relaxation offerte par le fluage pour chaque matériau. Le Tableau 3.2 présente les déformations subies entre le décoffrage à 3.75 jours et la fin des essais à 120 jours. Ces valeurs, une fois comparées aux valeurs du retrait total en conditions libres, permettent de trouver le ratio de restreinte appliquée aux différents matériaux.

Tableau 3.2 Niveau de restreint induit par le retrait dans les réparations (Bastien-Masse 2010)

Matériau	Retrait de la réparation	Retrait libre total	Retrait/Retrait libre
BO	-325 με	-500 με	65%
BFUP	-360 με	-730 με	49%

Bastien-Masse avait préalablement calculé une restreinte pour les poutres d'environ 90 % sans considérer le fluage. Ainsi, le fluage aura diminué de 35 % les contraintes dans le BO et de 51 % dans le BFUP.

L'évolution de la flèche en fonction du temps au centre de la poutre est présentée à la Figure 3.19. Après 120 jours, la flèche enregistrée pour la poutre de référence est de -0.5 mm. Cette valeur est attribuable uniquement au fluage en flexion causé par le poids propre de la poutre. Il est considéré que la différence de poids entre les différents types de béton est négligeable, donc cette valeur est

aussi applicable aux poutres réparées. Des flèches au centre de -1.4 mm et de -1.1 mm furent enregistrées pour les poutres réparées en BFUP et BO respectivement. Ces résultats sont cohérents avec les valeurs de déformation présentées au Tableau 3.2.

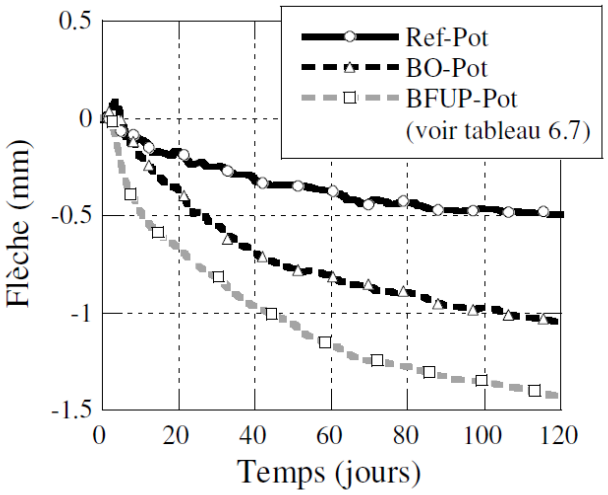


Figure 3.19 Flèche à long terme dans la poutre de référence et les poutres réparées (Bastien-Masse 2010)

Par ailleurs, Bastien-Masse avait estimé que seul le BO devait fissurer entre l'âge de 3 et 7 jours, mais aucune fissuration n'a été observée dans les deux types de béton. Bastien-Masse suggère que le BO possède une capacité de fluage ou relaxation supérieure à ce qui était attendu.

3.4 Conclusions

L'application d'une réparation sur un béton rigide est sujette à une fissuration précoce causée par le retrait restreint. Cette fissuration est induite par un effort de traction causé par la restreinte des déformations liées à l'hydratation du béton et aux effets thermiques. Il a été démontré que la cure humide a un impact important sur la diminution du retrait subi par le béton. De plus, le fluage en traction permet de réduire la contrainte dans la couche de réparation. Selon Bastien-Masse (2010), le fluage en traction permet de réduire d'environ 50 % les contraintes dans le BFUP contrairement à 35 % dans le cas du BO.

Au niveau de l'application de la réparation, il a été déterminé qu'une approche holistique basée sur la compatibilité déformationnelle des matériaux est souhaitable afin d'obtenir une réparation adaptée et durable pour les besoins requis. Dans ce cas, les déformations doivent être minimisées et la perméabilité réduite, afin d'augmenter la durabilité de la réparation. En ce qui a trait à la préparation de surface, l'hydrodémolition suivie par la méthode à jet de sable permettent d'obtenir la meilleure préparation de surface, soit un substrat sain et une rugosité élevée. De plus, il est fortement recommandé d'avoir une interface saturée séchée avant la mise en place du béton de réparation afin d'améliorer la résistance à cet endroit.

CHAPITRE 4 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE PRÉLIMINAIRE

Les réparations minces en béton sont généralement soumises à des contraintes élevées longitudinales en traction qui peuvent mener à une fissuration précoce dans la réparation. Les contraintes sont induites par le retrait du béton de réparation au jeune âge qui est gêné par la structure existante sur laquelle la réparation est appliquée. La présence de contraintes et de déformations restreintes fait apparaitre le comportement viscoélastique (fluage, relaxation) du béton. Le programme expérimental préliminaire vise d'une part à évaluer l'ouverture des fissures dans le BFUP et le BHP dans des conditions de retrait restreint similaires à celles anticipées dans le parapet, et d'autre part à étudier l'utilité d'un adjuvant réducteur de retrait (ARR) dans la formulation du BFUP. Ce chapitre décrit le développement d'un essai de retrait restreint et les résultats d'essais obtenus.

4.1 Développement d'un essai de retrait restreint

4.1.1 Concept du degré d'entrave

L'analyse sectionnelle telle que présentée à la Figure 4.1 permet l'évaluation des contraintes en traction générées dans le béton de réparation (*new*) par le béton préexistant (*old*). Ainsi, le béton de réparation sera soumis à une contrainte variable de $\sigma_{new.1}$ à la surface et $\sigma_{new.2}$ à l'interface des deux bétons.

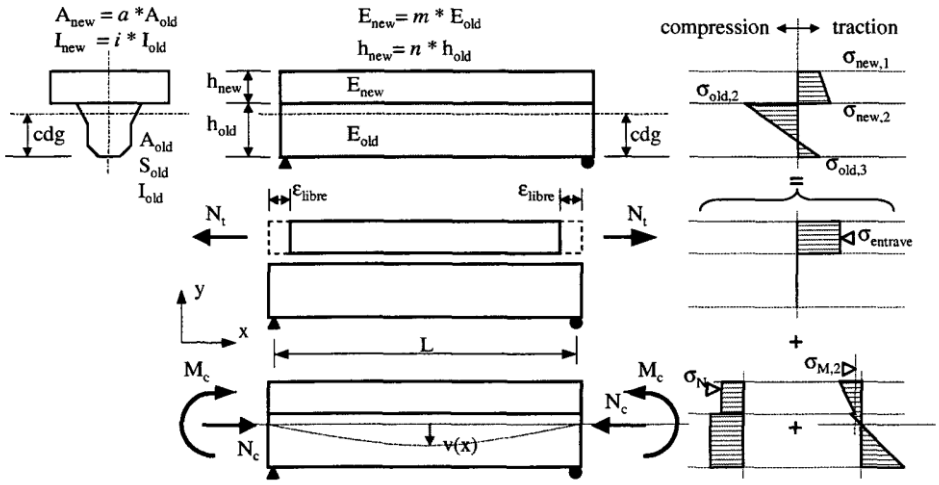


Figure 4.1 Analyse sectionnelle des contraintes longitudinales d'une poutre hybride (Bernard 2000)

Dans le but de quantifier le niveau de restreinte imposé à la couche de béton de réparation, il est possible d'utiliser la notion du degré d'entrave défini par l'équation (4.1).

$$\sigma_{new.2} = \mu\, E_{new}\, \varepsilon_{libre} = \mu\, \sigma_{entrave} \tag{4.1}$$

Cette équation permet l'évaluation de la contrainte en traction maximale $\sigma_{new.2}$ à un temps donné en fonction du degré d'entrave (μ), du module de Young du béton de réparation (E_{new}) ainsi que la déformation que rencontrerait le nouveau béton en condition libre (ε_{libre}), c'est-à-dire, sans restreinte.

Pour sa part, le degré d'entrave (μ) est fonction des paramètres suivants :

- Les différentes propriétés géométriques des sections *new* et *old*, tels que les aires (A), la quantité d'armatures (p), les moments d'inertie (I) ainsi que les hauteurs respectives (h);
- Les propriétés mécaniques des matériaux, tels que le module de Young (E);
- Les conditions d'appuis de la poutre considérée.

Dans le but de valider le potentiel de fissuration au jeune âge d'une couche mince de béton, il est important d'évaluer la contrainte induite en fonction du temps. En effet, les différentes déformations qui affectent le béton ont pour source les déformations thermiques ainsi que le retrait causé par l'hydratation du béton. Ceux-ci auront donc tendance à augmenter dans le temps et ainsi faire accroitre la contrainte dans le béton. Par ailleurs, selon l'équation (4.1), la contrainte induite dans le béton est aussi fonction du module de Young. Ainsi, l'évolution des propriétés mécaniques du béton aura pour effet de faire augmenter la contrainte induite dans celui-ci. De plus, puisque le degré d'entrave est fonction du rapport des modules de Young des deux bétons (*new* et *old*), le degré d'entrave variera aussi en fonction du temps.

Dans le but de calculer le degré d'entrave, les hypothèses de calcul suivantes sont considérées :

- Le comportement mécanique des matériaux est linéaire et élastique;
- Les coefficients de Poisson des matériaux sont nuls;
- La nouvelle section *(new)* est rectangulaire tandis que l'autre (*old*) peut être quelconque;
- Les sections planes restent planes;
- L'adhérence entre les deux bétons est parfaite.

Le principe de calcul permettant l'évaluation du degré d'entrave considère une analyse sectionnelle des contraintes causées par le retrait ainsi que les forces d'équilibre appliquées à la structure hybride composée d'un béton de réparation et d'un béton existant. Premièrement, une force en traction N_t centrée sur le centre de gravité de la couche de réparation est appliquée pour empêcher complètement les déformations libres. Afin d'assurer l'équilibre interne, une force en compression N_c équivalente est appliquée au centre de gravité de la section hybride ainsi qu'un moment M_c pour assurer l'équilibre rotationnel. Puisqu'il est admis que les sections sont linéaires et élastiques, il est possible d'effectuer l'addition de ces trois forces pour trouver le patron de contrainte de la structure hybride tel que précédemment présenté à la Figure 4.1.

Ainsi, en modifiant l'équation (4.1), il est possible de formuler le degré d'entrave en fonction des contraintes à la section, tel que présenté à l'équation (4.2).

$$\mu = \frac{\sigma_{new.2}}{\sigma_{entrave}} = \frac{\sigma_{entrave} + \sigma_{Nc} + \sigma_{Mc.2}}{\sigma_{entrave}} = 1 + \mu_N + \mu_M \tag{4.2}$$

Les paramètres μ_N et μ_M de l'équation précédente représentent le soulagement des efforts de contrainte en ce qui a trait au degré de liberté axial et flexionnel respectivement. Pour une structure isostatique (*iso*) où les déformations axiales et flexionnelles sont permises, ces paramètres seront non nuls. Ainsi, le degré d'entrave ne sera pas égal à 1 et est donné par l'équation (4.3).

$$\mu_{iso} = 1 + \mu_m + \mu_n \tag{4.3}$$

Autrement, dans les cas d'une poutre hyperstatique (*hyp*) où les déformations flexionnelles sont empêchées, cela entrainera un paramètre μ_M nul, ce qui donne l'équation (4.4).

$$\mu_{hyp} = 1 + \mu_n \tag{4.4}$$

Le calcul des paramètres μ_N et μ_M est présenté ci-dessous pour tenir compte de l'impact de l'armature sur la rigidité des bétons utilisés (Charron 2007).

$$\mu_N = -\frac{A_{new}}{A_{eq}} \tag{4.5}$$

$$\mu_M = -\frac{A_{new} \cdot (\overline{y_{new}} - cdg) \cdot (h_{old} - cdg)}{I_{eq}} \tag{4.6}$$

où

$$A_{eq} = \sum \left(\frac{E_i \cdot A_i}{E_{new}}\right) \tag{4.7}$$

$$cdg = \frac{\sum(E_i \cdot A_i \cdot \overline{y_i})}{E_{new} \cdot A_{eq}} \tag{4.8}$$

$$I_{eq} = \frac{1}{E_{new}} \cdot \sum [E_i \cdot (I_i + A_i(\overline{y_i} - cdg)^2)] \tag{4.9}$$

Le paramètre $\bar{y}_i$ représente la position du centre de gravité par rapport à un point arbitraire commun. L'évolution dans le temps du degré d'entrave est donnée par l'évolution du module élastique du béton de réparation.

4.1.2 Conception de l'essai de retrait restreint

Dans le but d'évaluer le retrait restreint dans des conditions similaires à celle du parapet, un essai simplifié a été mis sur pied. L'idée générale consiste à remplacer le substrat en béton par une section d'acier offrant un niveau de restreinte similaire à celui anticipé dans le parapet. Cela permet ainsi d'effectuer des tests préliminaires à petite échelle et permet aussi la réutilisation des sections d'acier pour des tests subséquents, tout en limitant la quantité d'acier à se procurer.

La Figure 4.2 illustre le cheminement de conception de l'essai. Puisque le parapet réparé est un élément complexe avec une épaisseur variable, celui-ci doit être simplifié pour permettre l'évaluation du niveau de restreinte avec les équations présentées à la section 4.1.1. Pour ce faire, une épaisseur équivalente est évaluée ainsi qu'un enrobage moyen pour les différents lits d'armature. Par la suite, une section d'acier est choisie en vue d'obtenir un degré d'entrave similaire à celui calculé pour le parapet réparé simplifié en fonction du temps et pour une épaisseur équivalente. Finalement, la connexion entre la section d'acier et le béton de réparation est assurée à l'aide de trous percés tout le long de l'âme de la poutre d'acier. Cela permet ainsi d'obtenir des goujons en béton qui assurent un comportement monolithique de la poutre composée.

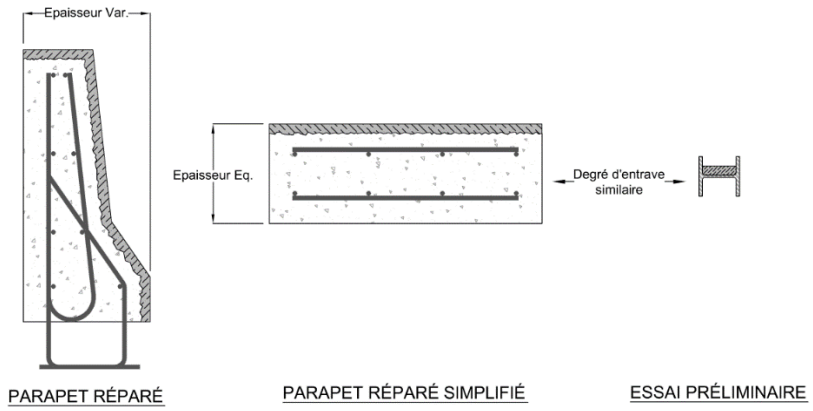


Figure 4.2 Méthodologie de conception de l'essai préliminaire

4.1.2.1 Calcul du parapet réparé simplifié

À partir des dimensions du parapet étudié présenté à la Figure 4.3, il est possible de calculer une épaisseur équivalente. Pour ce faire, une aire sectionnelle équivalente est considérée entre le parapet étudié et simplifié. Ainsi, une épaisseur uniforme équivalente de 321 mm, incluant la réparation, sera utilisée.

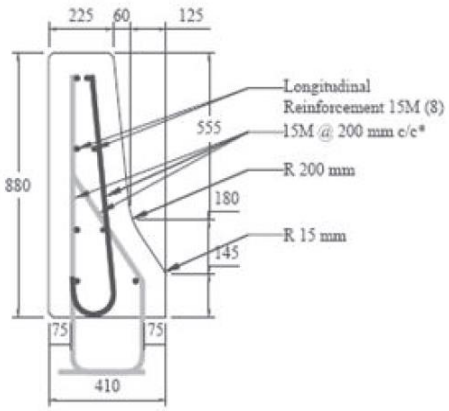


Figure 4.3 Parapet de référence pour le programme d’étude préliminaire

Le choix d'une aire similaire permet notamment de conserver la distribution des efforts axiaux appliqués sur les sections. En conditions hyperstatiques, cela permet d'obtenir des résultats de retrait restreint identiques. La largeur de l'élément simplifié conserve la hauteur d'origine du parapet, soit 880 mm.

En ce qui a trait à la couche de réparation, une épaisseur de 30 mm sera utilisée. Initialement, une réparation plus épaisse allant jusqu'à l'arrière des barres avait aussi été considérée. Cependant, dans le cas d'un parapet de pont, cela représente une épaisseur considérable par rapport à la dimension totale de l'élément. De plus, suite à la recommandation des représentants de la Ville de Montréal, un des partenaires industriels du projet, il a été noté que l'enlèvement d'une telle quantité de béton devient difficile en chantier et qu'il est préférable de simplement remplacer le parapet au complet. Ainsi, cette option a été écartée, et seules les réparations préventives en couche mince seront étudiées.

Finalement, la position des lits d'armature longitudinale est estimée à partir de la position moyenne des barres par rapport à la surface arrière du parapet (côté gauche sur la Figure 4.3). La position du centre des barres 15M est donnée dans le Tableau 4.1. Cela représente un enrobage des barres de 75 mm pour le lit arrière et de 77 mm pour le lit avant ce qui est très similaire à l'enrobage de 75 mm initial. Afin de simplifier le tout, un enrobage global de 75mm est donc adopté pour les deux lits.

Tableau 4.1 Position des barres d'armature longitudinale dans le parapet de référence

Lit	**Barre**	**x (mm)**	**x_{moy} (mm)**
Arrière	1	83.0	83.0
	2	83.0	
	3	83.0	
	4	83.0	
Avant	5	357	245.0
	6	235	
	7	208	
	8	180.9	

La Figure 4.4 présente la poutre réparée simplifiée qui sera analysée.

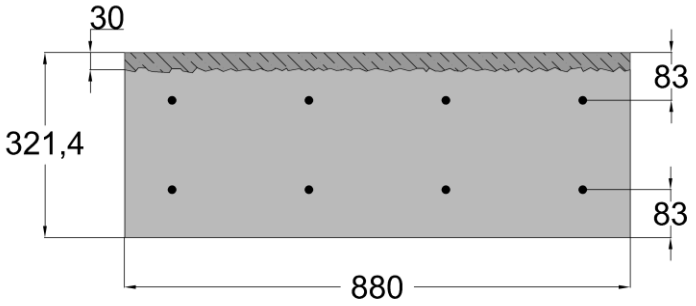


Figure 4.4 Plan du parapet réparé simplifié

4.1.2.2 Méthode de conception de l'essai

La Figure 4.5 illustre les étapes de résolution permettant de choisir une section d'acier optimale pour l'essai de retrait restreint.

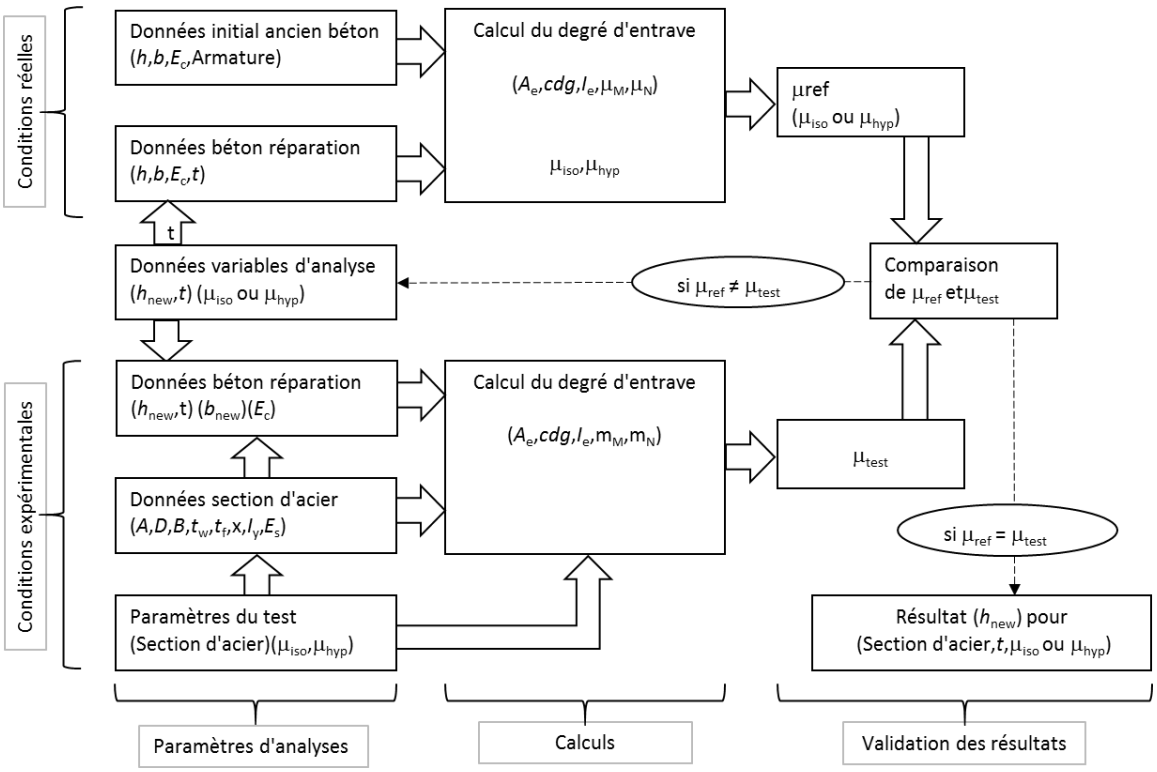


Figure 4.5 Diagramme des étapes de résolution pour choix de la section d'acier

Les parties supérieure et inférieure de la Figure 4.5 présentent les étapes de calcul du degré d'entrave pour le parapet réparé simplifié et celle du béton avec poutre d'acier respectivement. Au centre se trouvent les différents éléments comparatifs et itératifs permettant l'optimisation de la section d'acier. À son tour, chaque section est divisée en trois colonnes distinctes, soit les paramètres initiaux d'analyses, le calcul du degré d'entrave et finalement, la comparaison des degrés d'entrave.

En ce qui a trait à la validation de la section d'acier, un procédé itératif est employé pour trouver une épaisseur de béton à appliquer sur l'âme de la poutre d'acier. Cette donnée variable est modifiée jusqu'à ce que le degré d'entrave de la section simplifiée (μ_{ref}) soit équivalent à celui de la section d'acier (μ_{test}). Lorsque la convergence est atteinte, ce procédé est réalisé à nouveau pour une nouvelle section d'acier. À noter que cette épaisseur n'est valide que pour un temps donné et pour une condition d'appuis de la poutre simplifiée (μ_{iso} ou μ_{hyp}). Le procédé complet est donc répété pour des périodes de temps différentes, soit pour 3, 7 et 28 jours, et ce, pour les deux conditions d'appuis de la poutre simplifiée. Cela permet d'obtenir un tableau comparatif des différentes poutres, permettant ainsi la sélection de la poutre la plus appropriée pour l'essai.

Afin de simplifier le processus itératif, un outil de calcul Excel a été mis sur pied pour accélérer le processus.

4.1.2.3 Calcul du degré d'entrave du parapet simplifié

Selon la Figure 4.5, les paramètres d'analyse sont regroupés en fonction des données initiales du substrat et du béton de réparation. Les paramètres géométriques des deux bétons et des armatures ont été présentés à la Figure 4.4. Les propriétés mécaniques du substrat considèrent un béton avec un module de Young (E_c) de 36300 MPa, soit un béton standard de 50 MPa requis pour les parapets (Namy 2012). En ce qui concerne le béton de réparation, un BFUP est considéré. Les propriétés mécaniques sont estimées à 36000 MPa et une résistance à la compression de 115 MPa à 28 jours (Bastien-Masse 2010). Dans le cas du béton de réparation, le module élastique évolue dans le temps en fonction de l'équation (4.10) (ACI 209.2R-08).

$$E_c(t) = E_c(28) \cdot \left(\frac{t}{4 + 0.85 \cdot t}\right) \tag{4.10}$$

Finalement le module élastique de l'acier d'armature est considéré égal à 200 GPa.

À partir des paramètres initiaux tels que présentés à la Figure 4.5, il est possible de calculer un degré d'entrave pour un temps donné. Avant tout, celui-ci requière le calcul de l'aire équivalente (A_{eq}), le centre de gravité de la section (*cdg*) et l'inertie effective (I_e) pour permettre l'évaluation de μ_M et μ_N. Les équations de ces paramètres ont été présentées à la section 4.1.1.

À des fins démonstratives, seul le calcul du degré d'entrave à 3 jours tel que réalisé avec Excel est présenté ici. L'ensemble des résultats sera présenté sous forme de tableau par la suite. Tout d'abord, le module élastique du béton de réparation est estimé avec l'équation (4.10).

$$E_c(3) = 36000 \cdot \left(\frac{3}{4 + 0.85 \cdot 3}\right) = 16500\ MPa$$

$$E_c(37) = 36000 \cdot \left(\frac{7}{4 + 0.85 \cdot 7}\right) = 25300\ MPa$$

$$E_c(28) = 36000 \cdot \left(\frac{28}{4 + 0.85 \cdot 28}\right) = 36300\ MPa$$

Le calcul de l'aire équivalente est donné par l'équation (4.7) et effectue la sommation de toutes les aires des matériaux. Dans le cas présent, au niveau de l'armature, seules les barres longitudinales sont considérées et leur aire a été retirée de celle du béton dans lequel elles sont encastrées.

$$A_{eq} = A_{eq.new} + A_{eq.old} + A_{eq.armature}$$

$$A_{eq} = \frac{16500 \cdot 26400}{16500} + \frac{36300 \cdot 254832}{16500} + \frac{200000 \cdot 1600}{16500}$$

$$A_{eq} = 26400 + 561004 + 19407 = 606827\ mm^2$$

où :

$$A_{new} = 30 \cdot 880 = 26400\ mm^2$$

$$A_{old} = (321.4 - 30) \cdot 880 - 8 \cdot 200 = 254832\ mm^2$$

$$A_{armature} = 8 \cdot 200 = 1600\ mm^2$$

Le calcul du centre de gravité est effectué avec l'équation (4.8). Le bas de la section simplifiée sert de référence pour les valeurs du *cdg*. Le centre de gravité est situé au centre des sections rectangulaires des deux bétons et au centre des deux lits d'armatures.

$$cdg = \frac{cdg_{new} + cdg_{old} + cdg_{armature.bas} + cdg_{armature.haut}}{E_{new} \cdot A_{eq}}$$

$$cdg = \frac{16500 \cdot 26400 \cdot 306 + 36300 \cdot 254832 \cdot 146 + 200000 \cdot 1600 \cdot (83 + 238)}{16489 \cdot 606827}$$

$cdg = 153.2$mm à partir du bas de la section simplifié

où :

$$cdg_{new} = (321 - 30) + (30/2) = 306\ mm$$

$$cdg_{old} = (321 - 30)/2 = 146\ mm$$

$$cdg_{armature.bas} = 75 + 16/2 = 83\ mm$$

$$cdg_{armature.haut} = 321 - (75 + 16/2) = 238\ mm$$

Pour sa part, le calcul de l'inertie effective se fait avec l'équation (4.9). L'inertie propre des barres d'armature est considérée comme nulle à cause de leur faible dimension par rapport aux sections de béton.

$$I_{eq} = \frac{1}{E_{new}} \cdot \left(I_{eq.new} + I_{eq.old} + I_{eq.armature.bas} + I_{eq.armature.haut}\right)$$

$$\begin{aligned} I_{eq} = \frac{1}{16500} \cdot [&16500 \cdot (1.980 \times 10^6 + 26400(306 - 153.2)^2) + 36300 \\ &\cdot (1.815 \times 10^9 + 254832(146 - 153.2)^2) + 200000 \\ &\cdot (0 + 800(83 - 153.2)^2 + 800(238 - 153.2)^2)] \end{aligned}$$

$$I_{eq} = 4.77 \times 10^9\ mm^4$$

Ces paramètres permettent ainsi le calcul des facteurs adimensionnels μ_N et μ_M et sont obtenus par les équations (4.5) et (4.6) respectivement.

$$\mu_n = -\frac{26400}{606827} = -0.044$$

$$\mu_m = -\frac{26400 \cdot (306 - 153.2) \cdot (291 - 153.2)}{4.77 \times 10^9} = -0.117$$

Cela permet donc le calcul du degré d'entrave isostatique (μ_{iso}) et hyperstatique (μ_{hyp}) à partir des équations (4.3) et (4.4).

$$\mu_{iso} = 1 + (-0.117) + (-0.044) = 0.84$$

$$\mu_{hyp} = 1 + (-0.0435) = 0.96$$

Le Tableau 4.2 présente l'ensemble des degrés d'entrave en fonction du temps. Le calcul a aussi été effectué sans considérer les armatures afin d'évaluer leur impact sur les résultats :

Tableau 4.2 Degré d'entrave de la poutre réparée simplifiée en fonction du temps avec et sans considération des armatures dans le parapet

Temps (en jours)	**3**		**7**		**28**	
Armature	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec
μ_{iso}	0.84	0.84	0.77	0.77	0.70	0.71
μ_{hyp}	0.96	0.96	0.93	0.94	0.91	0.91

À partir du Tableau 4.2, il est possible de constater une diminution du degré d'entrave avec le temps dans toutes les conditions analysées. La cinétique de la réduction des degrés d'entrave est inversement proportionnelle à l'évolution du module élastique du béton de réparation. Ainsi, le degré d'entrave diminue rapidement au jeune âge et se stabilise avec le temps.

En ce qui a trait à l'armature, la différence relative maximum est inférieure à 1 % en condition isostatique et inférieure à 0.25 % en condition hyperstatique. L'armature a donc un très faible

impact sur les conditions d'entrave dans le cas présent. Quant à lui, le niveau d'appuis considéré dans le calcul a un impact important et représente une différence absolue de 13 % à 3 jours et de 28 % à 28 jours par rapport aux conditions isostatiques.

Ces conditions représentent toutefois une idéalisation des déformations permises. En réalité, le parapet se situe quelque part entre ces deux conditions. Les déformations du parapet sont fortement gênées par la connexion à la base avec la dalle. À cet endroit, le parapet est en condition hyperstatique. Les déformations dans la partie haute du parapet sont moins gênées. Il devient donc justifiable de considérer la valeur du degré d'entrave en condition hyperstatique seulement, soit la valeur la plus propice à amorcer la fissuration.

Ainsi, le degré d'entrave considéré dans l'analyse à 3, 7 et 28 jours est de 0.96, 0.94 et 0.91 respectivement. Ces valeurs sont tirées du Tableau 4.2 et considèrent l'impact des barres d'armature.

4.1.2.4 Calcul du degré d'entrave de l'essai de retrait restreint

Le calcul du degré d'entrave de l'essai de retrait restreint se fait de manière très similaire à celui calculé précédemment. Par contre, à cause de la nature différente du substrat (acier au lieu du béton), certains paramètres doivent être adaptés ce qui se traduit par une légère modification de certaines équations.

Selon la Figure 4.5, les paramètres d'analyse des conditions expérimentales sont regroupés en trois sections, soit les données du béton de réparation, les données de la section d'acier et finalement les paramètres de l'essai.

L'épaisseur de la couche de béton de réparation est un paramètre variable et celle-ci sera modifiée afin d'atteindre une convergence. En ce qui a trait à la largeur, il est considéré que les ailes de la section de type W serviront de coffrage latéral. Ainsi, la largeur efficace du béton est calculée avec l'équation (4.11).

$$b_{new} = D - 2 \cdot t_f \tag{4.11}$$

où le paramètre b_{new} est la largeur du béton de réparation, D la hauteur totale de la poutre dans la direction de l'âme et t_{f} l'épaisseur des ailes de la poutre. Les propriétés mécaniques du béton sont

basées sur le même BFUP qu'à la section précédente. Le module de Young est assujetti à la même équation quant à son évolution dans le temps.

Les données initiales de la section d'acier considèrent l'aire totale (A), la hauteur totale du profilé (D), la largeur totale (B), l'épaisseur de l'âme (t_w), l'épaisseur des ailes (t_f), l'inertie de la section (I_y) et finalement le module élastique. Le module élastique de la section d'acier est estimé à 200 GPa. Puisque le béton sera coulé à l'intérieur de la section d'acier et non par-dessus comme dans le cas de la section simplifiée, la valeur h_{old} est calculée avec l'équation (4.12).

$$h_{old.acier} = \frac{B}{2} + \frac{tw}{2} \tag{4.12}$$

Finalement les paramètres de l'essai préliminaire sont fonction de la section d'acier et des conditions d'appuis de celle-ci. La figure suivante présente les déformations attendues pour une poutre courte et longue. En effet, pour une poutre courte, celle-ci aurait tendance à se courber complètement à cause du retrait et serait dans un état isostatique. Par contre, pour une section suffisamment longue, il est adéquat d'imaginer que le poids propre de la section empêchera complètement le soulèvement de la poutre au centre de la portée. Ainsi, cette portion serait en condition hyperstatique seulement. Puisque les poutres étudiées auront une longueur totale de 4 m, il est convenable d'effectuer le calcul pour des conditions hyperstatiques seulement.

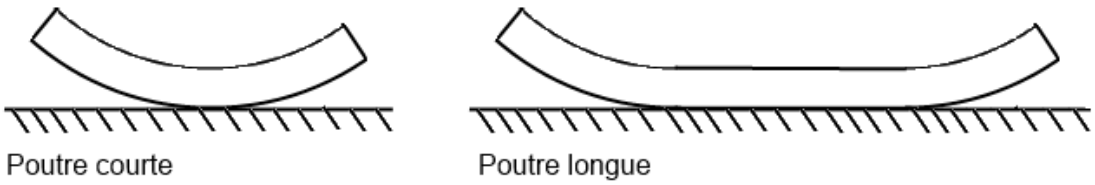


Figure 4.6 Déformation attendu en retrait restreint en fonction de la longueur de la poutre

À partir des données initiales, il est possible de calculer le degré d'entrave de la section hybride. Ce calcul utilise exactement les mêmes équations que précédemment utilisées à la section 4.1.2.3

pour le calcul du degré d'entrave pour la section simplifiée. Cela permet ainsi d'obtenir le paramètre μ_{test} qui sera utilisé lors du processus itératif.

Le processus itératif est effectué pour une section d'acier et un temps donnés. Pour la première itération, une épaisseur très faible est attribuée (soit h_{new} égal à 1 mm). Ceci permet de calculer le paramètre μ_{test} qui est ensuite comparé au paramètre μ_{ref}. Deux résultats sont possibles à cette étape, soit l'obtention de paramètres identiques ou différents. Lorsque les paramètres sont différents, la validation a échoué et une nouvelle itération est entamée avec une épaisseur de 1 mm de plus que la précédente. Éventuellement, les paramètres vont converger ($\mu_{test} = \mu_{ref}$.) Le cas échéant, l'épaisseur requise a été trouvée pour un temps et une section donnés. Ce processus est par la suite répété pour les différents temps et sections d'acier.

Le Tableau 4.3 présente les hauteurs calculées de béton pour une sélection de poutres d'acier.

Tableau 4.3 Hauteur requise de béton en fonction de la section d'acier évaluée

Section	Épaisseur de béton requise (mm)					
	À 3 jours		À 7 jours		À 28 jours	
	μ_{iso}	μ_{hyp}	μ_{iso}	μ_{hyp}	μ_{iso}	μ_{hyp}
W200X31.3	48.7	11.6	48.3	11.6	47.8	11.6
W150X29.8	63.6	15.1	63.1	15.1	62.5	15.1
W250X28.4	35.3	8.4	35.0	8.4	34.7	8.4
W310X28.3	28.6	6.8	28.3	6.8	28.0	6.8
W130X28.1	76.4	18.1	75.8	18.1	75.0	18.1
W200X26.6	41.4	9.8	41.1	9.8	40.7	9.8
W250X25.3	31.2	7.4	30.9	7.4	30.6	7.4
W150X24.0	51.0	12.1	50.6	12.1	50.1	12.1
W310X23.8	24.2	5.8	24.0	5.8	23.8	5.8
W130X23.8	65.0	15.4	64.5	15.4	63.8	15.4

Les sections d'acier présentées au Tableau 4.3 sont arrangées en ordre décroissant en fonction de leur masse linéaire, facteur important au niveau du cout des poutres. Ces valeurs sont basées sur une hypothèse hyperstatique en laboratoire. Cependant, les conditions isostatique et hyperstatique sont considérées pour l'analyse de la section simplifiée. Les valeurs surlignées représentent une hauteur de béton supérieure à la hauteur libre entre le dessus des ailes et l'âme de la poutre d'acier.

Ainsi, il faudrait ajouter sur toute la longueur un coffrage latéral si ces sections étaient choisies. Ces valeurs sont donc rejetées à cause de la complexité ajoutée. La hauteur libre par section est donnée par l'équation (4.13).

$$h_{new.max} = \frac{B}{2} - \frac{t_w}{2} \tag{4.13}$$

À partir du Tableau 4.3, les hauteurs requises en fonction du temps sont parfaitement identiques en condition hyperstatique et presque identiques en condition isostatique. Ainsi, l'évolution dans le temps n'a presque pas d'impact sur le choix de la section d'acier. Cela est normal puisque l'élément qui évolue dans le temps, soit le béton de réparation, est presque identique dans les deux situations. Pour ce qui est du degré d'entrave simulé en laboratoire, la condition isostatique requiert une épaisseur d'un peu plus de 4 fois la valeur en condition hyperstatique, et ce, peu importe la section employée. Tel que mentionné précédemment, il est envisageable de considérer que la poutre simplifiée est en condition hyperstatique, donc seul ce paramètre sera considéré dans le choix de la section d'acier. Ainsi, le choix final de la section repose principalement sur une section qui offre une épaisseur adéquate de béton en plus d'être le plus léger possible, ce qui permet de réduire le cout d'achat des poutres pour les essais en laboratoire. Une poutre de type W130x28.1 fut donc choisie.

Finalement, pour une section de type W130x28.1, une épaisseur de 18.1 mm de béton de réparation a été calculée selon le Tableau 4.3 pour obtenir un degré d'entrave de 0.909 visé à 28 jours. Cependant, afin d'assurer un comportement le plus similaire possible à celui du parapet réel (notamment en ce qui a trait au retrait de séchage qui varie en fonction de l'épaisseur de l'élément de béton), une épaisseur de 30 mm sera plutôt utilisée. Ceci fait en sorte que le degré d'entrave passe de 0.91 à 0.86 à 28 jours. Cette différence reste néanmoins petite et est encore proche de la valeur hyperstatique visée pour la poutre simplifiée, soit une valeur de 0.9q.

4.1.2.5 Évaluation du potentiel de fissuration au jeune âge du béton

Afin d'évaluer le potentiel de fissuration dans le béton de réparation, il faut comparer la résistance en traction à la force induite par le retrait restreint. Cette évaluation est réalisée à différents intervalles de temps afin de déterminer le moment où la fissuration s'amorce, si elle s'amorce. L'initiation de la fissuration survient lorsque la résistance est inférieure aux contraintes induites.

Selon Bastien-Masse (2010), le BFUP utilisé possède une résistance à la traction de 11.0 MPa à 28 jours. Pour connaitre la résistance à d'autres intervalles, il est possible d'utiliser à nouveau l'équation (4.10) (ACI 209.2R-08), mais en remplaçant les termes du module élastique (E_c) par la résistance en traction (f_t). La résistance aux intervalles de temps est donc de

$$f_t(3) = 11.0 \cdot \left(\frac{3}{4 + 0.85 \cdot 3}\right) = 5.0\ MPa$$

$$f_t(7) = 11.0 \cdot \left(\frac{7}{4 + 0.85 \cdot 7}\right) = 7.7\ MPa$$

$$f_t(28) = 11.0 \cdot \left(\frac{28}{4 + 0.85 \cdot 28}\right) = 11.1\ MPa$$

En ce qui concerne la contrainte appliquée, celle-ci est calculée à partir de l'équation (4.1) et fait référence au degré d'entrave (μ), au module élastique de la couche de réparation (E_{new}) ainsi qu'au retrait total en condition libre subit par le béton de réparation (ε_{libre}). Le retrait libre correspond au retrait total mesuré par Bastien-Masse (2010) pour un BFUP et est présenté à la Figure 4.7.

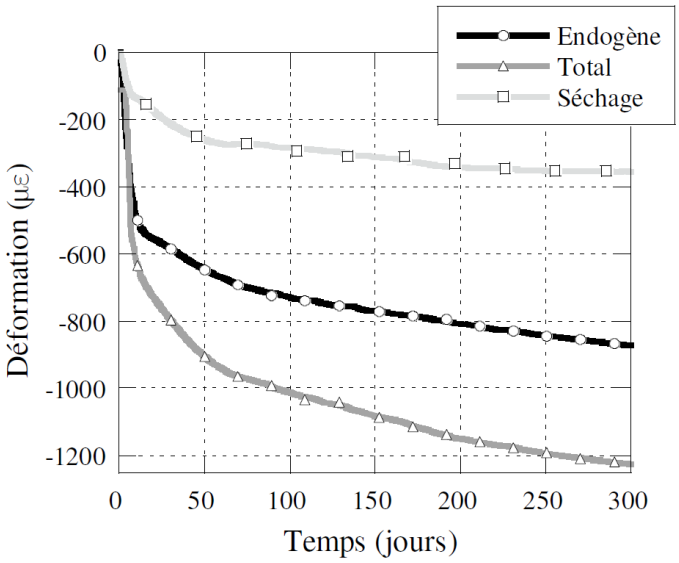


Figure 4.7 Retraits dans le BFUP en fonction du temps (Bastien-Masse 2010)

Les différents paramètres utilisés pour calculer la contrainte induite dans le béton sont résumés au Tableau 4.4. Les valeurs du retrait total sont estimées par interpolation linéaire à l'aide de la Figure 4.7.

Tableau 4.4 Paramètres pour le calcul du degré d'entrave en fonction du temps pour un BFUP

Propriétés	**Temps (en jour)**		
	3	**7**	**28**
μ	0.93	0.90	0.86
E_{new} (MPa)	16500	25300	36300
ε_{libre} (m/m)	-1.00E-04	-5.50E-04	-7.75E-04

À partir de l'équation (4.1) et des valeurs du Tableau 4.4, il est possible de calculer la contrainte qui se développe dans le béton de réparation. Par contre, cela ne tient pas compte du comportement viscoélastique du béton (relaxation des contraintes due au fluage). Ainsi, un facteur φ_{new} est ajouté à l'équation. Dans le cas présent, un facteur de 50 % est utilisé en tout temps tel que discuté à la section 3.3.3 pour tenir compte de la relaxation des contraintes pour un béton maintenu en condition de retrait restreint au jeune âge (Bastien-Masse 2010). L'équation (A.3) est ainsi obtenue.

$$\sigma_{new}(t) = -\mu\,(t) \cdot E_{new}(t)\ \cdot \varepsilon_{libre}(t) \cdot \varphi_{new} \tag{4.14}$$

En substituant les variables par les valeurs présentées au Tableau 4.4, les contraintes appliquées sont

$$\sigma_{new}(3) = 0.930 \cdot 16489\ \cdot -1.00 \times 10^{-4} \cdot 50\% = 0.8\ MPa \text{ (en traction)}$$

$$\sigma_{new}(7) = 0.896 \cdot 25327\ \cdot -5.50 \times 10^{-4} \cdot 50\% = 6.2\ MPa \text{ (en traction)}$$

$$\sigma_{new}(28) = 0.858 \cdot 36259\ \cdot -7.75 \times 10^{-4} \cdot 50\% = 12.1\ MPa \text{ (en traction)}$$

Le Tableau 4.5 compare la résistance en traction à la contrainte induite dans le BFUP en fonction du temps pour la configuration d'essais de retrait restreint envisagé. Selon ce tableau, une fissuration pourrait survenir entre 7 et 28 jours pour le BFUP. Cependant, le comportement en

fissuration ne peut pas être adéquatement estimé avec les équations utilisées et devra être évalué en laboratoire lors des essais.

Tableau 4.5 Contrainte générée dans le BFUP en fonction de sa résistance en traction

Temps (en jours)	**3**	**7**	**28**
f_t (en MPa)	5.0	7.7	11.1
σ_{new} (en MPa)	0.77	6.2	12.1
Validation	OK	OK	Fissuration

4.1.2.6 Dimensionnement des goujons en béton

À la section 4.1.1, il a été posé comme hypothèse que le calcul du degré d'entrave admet un comportement monolithique et néglige le glissement à l'interface entre les bétons. Par conséquent, il est important d'assurer une bonne adhésion entre le béton de réparation et la section d'acier.

Puisque l'âme et les ailes d'acier de la section W choisie sont relativement lisses, il est supposé que le béton possède une adhérence nulle sur l'acier. À cet effet, un système de goujons entre l'acier et le béton est nécessaire pour assurer une adhérence et un comportement hybride adéquat. Puisque le béton est appliqué en couche mince, des goujons en acier installés sur l'âme réduiraient l'aire de la section de béton déjà petite et risqueraient donc de favoriser une fissuration locale.

Ainsi, plutôt que d'utiliser des goujons en acier, des goujons en béton seront plutôt employés. Ces goujons seront formés par la perforation de trous successifs tout le long de l'âme de la poutre d'acier. Au moment de la coulée du béton de réparation, un coffrage sera appliqué sous l'âme. Les ouvertures se rempliront de béton, ce qui formera des goujons de béton. Le détail de calculs de goujons en béton est présenté à l'Annexe A.

4.1.2.7 Choix et usinage de la section d'acier

La Figure 4.8 présente la section d'acier de type W ainsi que l'usinage des trous dans l'âme pour l'essai de retrait restreint préliminaire. Une section de type W130x28.1 d'une longueur de 4000 mm sera utilisée. Sur son âme sont perforés 33 trous de 1 pouce de diamètre à 125 mm C/C l'un

de l'autre. L'écart entre les trous aux extrémités est d'une demi distance, soit de 62.5 mm entre le bord et le centre du premier goujon.

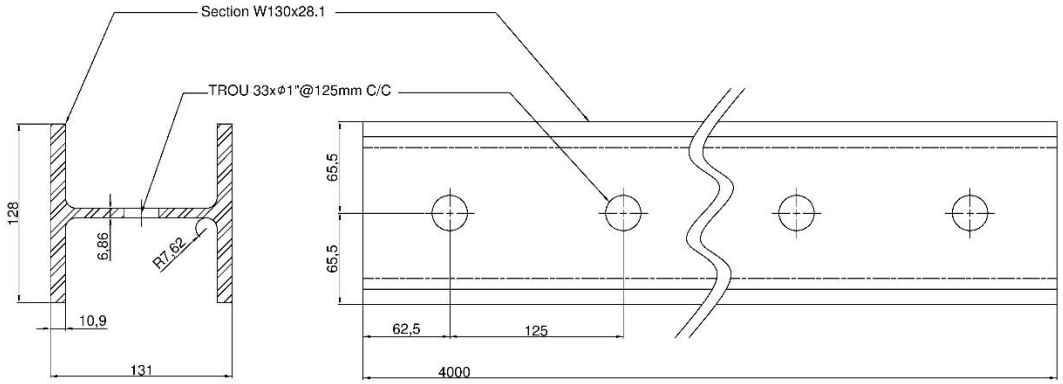


Figure 4.8 Plan d'usinage de la poutre pour essais préliminaires

4.2 Fabrication du montage de l'essai de retrait restreint

Deux poutres de type W130x28.1 de 4 mètres ont été commandées chez Métaux Profusion pour les essais en laboratoire. Elles furent livrées à l'École Polytechnique déjà coupées à la longueur requise. Une fois les poutres reçues, une inspection visuelle sommaire a été effectuée pour s'assurer de leur rectitude.

L'usinage des trous a été effectué avec une perforeuse magnétique portable. Celle-ci a été installée à même l'âme de la poutre. Les trous ont été percés en trois passes successives, soit avec une mèche de un demi-pouce, de trois quarts de pouce et finalement de un pouce, afin de ménager la perforeuse.

4.3 Programme expérimental

Dans le but de tester l'utilisation d'un adjuvant réducteur de retrait (ARR) sur le BFUP, deux coulées ont été réalisées afin de comparer adéquatement l'efficacité de l'adjuvant pour réduire le retrait et donc la fissuration attendue. De plus, pour analyser l'efficacité du BFUP en retrait restreint de manière générale, un essai supplémentaire a été effectué sur un béton de référence, soit un BHP

dans le cas présent. Ainsi, trois bétons différents ont été fabriqués en tout, soit un BFUP avec ARR, un BFUP sans ARR, et un BHP.

Pour le programme d'étude préliminaire, la composition des bétons utilisés ainsi que leurs propriétés à l'état frais sont présentées au Tableau 4.6. Les fibres utilisées dans le BFUP sont de type OL10-0.2, soit des fibres en acier de 10 mm de long et de 0.2 mm de diamètre. Les deux BFUP évalués contiennent 4% de fibre.

Tableau 4.6 Composition des bétons étudiés et leurs propriétés à l'état frais

Composition (kg/m^3)	**BFUP sans ARR**	**BFUP avec ARR**	**BHP**
Ciment	1002	987	400
Ajout cimentaire	251	247	0
Eau	210	206	163
Superplastifiant	66	65	19
Agent réducteur de retrait	0	13	0
Sable	601	592	990
Pierre	0	0	825
Fibre	312	312	0
Masse volumique (kg/m^3)	2445	2472	2326
Affaissement (mm)	-	-	250
Étalement (mm)	550	590	490
Teneur en air (%)	4.3	2.5	3.1
Température (°C)	-	-	24.5

4.4 Coffrage

Puisque les ailes de la section d'acier servent de coffrage latéral au béton, le coffrage des poutres pour les essais est relativement simple. Seuls le dessous des goujons et les extrémités de la poutre ont été coffrés. La Figure 4.9 présente le plan de coffrage des essais préliminaires.

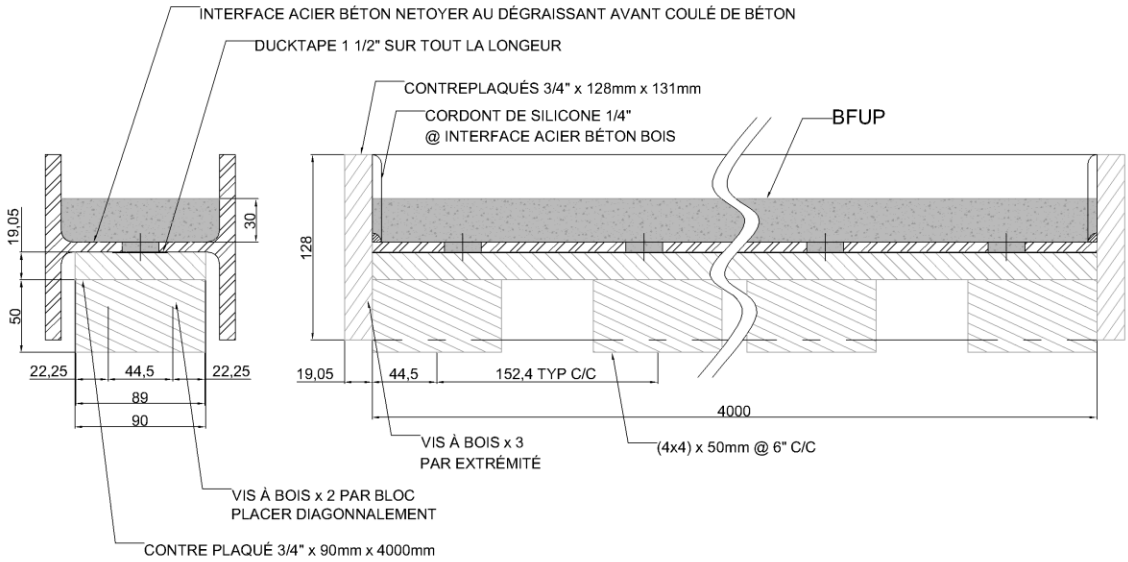


Figure 4.9 Plan du coffrage de la poutre d'acier pour essais préliminaires

Afin de simuler une poutre simplement déposée au sol, il a été décidé de faire reposer l'âme sur une plateforme de bois surélevée, tel que présenté à la Figure 4.10.

Figure 4.10 Plateforme de bois devant section d'acier complètement coffrée lors de l'essai

Cette plateforme de bois permet d'assurer un contact continu sur tout le long de l'âme et en plus d'assurer un coffrage adéquat du dessous des goujons de béton. Aux extrémités, des plaques de bois de trois quarts de pouce ont été vissées aux pattes de bois. Un cordon de silicone a été appliqué à la jonction entre le bois et l'acier pour éviter toute fuite lors de la coulée. De manière identique, un ruban de « *duct tape* » a été appliqué sur le dessous de l'âme sur toute la longueur pour assurer l'étanchéité du coffrage au niveau des goujons. Avant l'application du béton, les surfaces de la section d'acier ont été dument nettoyées avec un dégraisseur puis à l'air comprimé.

Puisque le coffrage n'est pas fixé à la poutre d'acier, il est considéré que celui-ci n'interagit pas sur le comportement monolithique de la poutre hybride. Ainsi, celui-ci n'est pas retiré lors des essais. Cela évite aussi la manutention de la poutre ce qui pourrait mener à une fissuration accidentelle du béton et fausser les résultats obtenus.

4.5 Coulée et cure du béton

Puisque deux sections d'acier ont été achetées, seulement deux essais ont pu être effectués en même temps. Les essais sur les deux BFUP, soit avec et sans adjuvant réducteur de retrait, ont été réalisés en premier. Suite à ces essais, le béton a été retiré et les sections d'acier ont été nettoyées pour la l'exécution de l'essai avec le BHP seul. Par contre, puisque l'essai sur le BHP n'était pas critique, celui-ci a été réalisé après le programme d'étude principale effectué sur les parapets. Comme discuté précédemment, cela a donc permis d'utiliser le même béton de réparation que celui utilisé pour le programme d'étude expérimentale principal.

En ce qui a trait aux séquences des coulées, les deux BFUP ont été coulés la même journée, soit le 10 mars 2014. Pour sa part, le BHP a été coulé le 12 février 2015.

L'Annexe B détaille les méthodes de coulées utilisées pour les réparations de béton et les spécimens de caractérisation.

Puisque les trois essais doivent être comparables, une cure similaire a été effectuée pour chaque essai. Ainsi, dans tous les cas, le film plastique appliqué après la coulée a été retiré après un délai de 48 heures. Les éprouvettes de caractérisation ont aussi été décoffrées à cet intervalle. Le délai de 48 heures est nécessaire dans le cas de coulée en BFUP, car bien qu'il y ait une prise rapide du béton, sa phase dormante est beaucoup plus longue. Par la suite, tous les bétons ont été laissés à l'air libre dans le laboratoire de béton de l'École Polytechnique. Le fait de ne pas avoir appliqué

de cure humide favorise grandement le retrait de séchage à court terme et favorise le développement de fissures causées par le retrait restreint. Cela permet donc d'analyser l'efficacité du béton dans les conditions les plus défavorables.

4.6 Essais de caractérisation

La caractérisation de la résistance en compression (f'_c) a été réalisée en accord avec la norme CSA A23.2-9C-14. Des cylindres de 100 mm de diamètre ont été chargés à vitesse constante (environ 2000±400 N/sec) dans la presse de marque Amsler du laboratoire de l'École Polytechnique. En moyenne, au moins trois essais sont requis pour obtenir une valeur représentative de la résistance du béton. La presse utilisée applique une charge à l'aide d'un vérin hydraulique. Le taux de chargement est appliqué et stabilisé manuellement tout le long des essais.

L'évaluation du module de Young ainsi que le coefficient de Poisson est évalué en même temps à l'aide de cylindre de béton de 100 mm de diamètre instrumentés tel que présenté à la Figure 4.11. Deux anneaux en acier sont fixés parallèlement à chaque extrémité du cylindre de béton. Deux LVDT sont installés entre ces anneaux de part et d'autre du spécimen. Cela permet de mesurer la déformation axiale lors de l'essai et ainsi de calculer le module de Young. L'utilisation de deux instruments de mesure permet de détecter une excentricité causée par l'application de la charge. L'évaluation du coefficient de Poisson est effectuée à l'aide d'un cadre suspendu à l'anneau supérieur. D'une part, une tige métallique du cadre est en contact direct avec la surface du cylindre. Un troisième LVDT diamétralement opposé à cette tige permet de mesurer les changements du diamètre. Cela permet ainsi d'évaluer le coefficient de Poisson. Avant l'essai, deux chargements à 40% de la valeur maximale en compression sont effectués afin que le comportement en compression soit parfaitement élastique. Par la suite, le cylindre est comprimé jusqu'à la rupture, puis le module d'élasticité et le coefficient de Poisson sont mesurés. Les essais sont réalisés dans la même presse que celle utilisée pour les essais en compression.

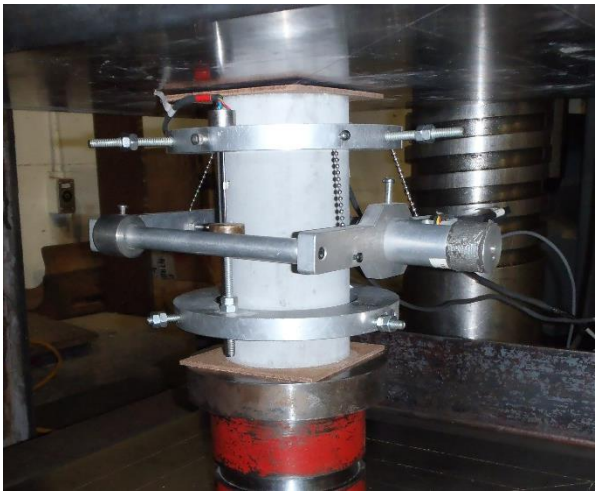


Figure 4.11 Montage pour évaluer en laboratoire le module de Young et de Poisson d'un béton

Les essais en traction indirecte (essai brésilien) ont été réalisés selon les directives de la norme CSA A23.2-13C-14 pour le BHP. Le montage utilisé est présenté à la Figure 4.12. Ce montage facilite l'application d'une charge linéaire uniforme et perpendiculaire par rapport à la surface, et ce, sur tout le long du cylindre de 150 mm de diamètre utilisé. Le cylindre est soumis à un taux de chargement constant de 1263±418 N/sec jusqu'à la rupture du spécimen.

Figure 4.12 Montage de l'essai brésilien pour évaluer la résistance en traction au laboratoire

À partir de la charge maximale appliquée, il est possible de calculer la résistance en traction de manière indirecte avec l'équation (4.15).

$$f_{sp} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot L \cdot D} \tag{4.15}$$

où P est la charge maximale appliquée, L la longueur du cylindre et D le diamètre du cylindre.

Finalement, le montage permettant l'évaluation de la résistance en traction directe du BFUP est illustré à la Figure 4.13. Les en béton sont installés dans la presse à l'aide de mâchoires. Pour assurer un contact uniforme, des panneaux de *masonite* ou des plaques de bois sont installés entre les mâchoires et le béton. Le choix du matériau à utiliser est fonction de la rugosité locale du béton de la surface en contact avec la mâchoire.

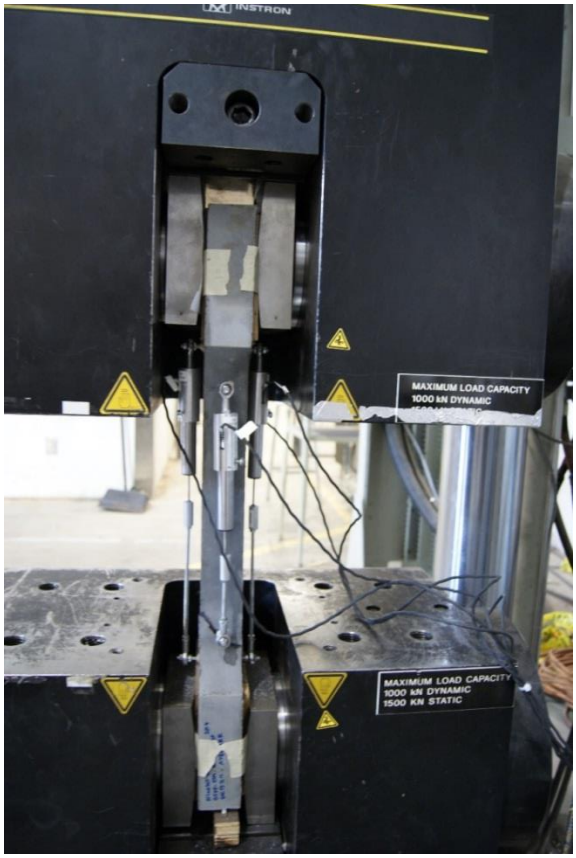


Figure 4.13 Montage pour évaluer la résistance des BFUP en traction directe

Afin d'évaluer les déformations lors de l'essai, quatre LVDT sont installés à l'aide de plots sur chaque spécimen. Chacun fonctionne en paire de part et d'autre du spécimen afin d'évaluer toute flexion accidentelle dans les deux directions. De plus, les LVDT installés sur les côtés plats sont plus longs pour assurer la mesure de l'ouverture des fissures si celles-ci se produisent dans la zone où le prisme en formes d'os s'élargit. Le chargement est effectué par une presse hydraulique Instron. Le déplacement est contrôlé par ordinateur afin d'obtenir un taux de déformation constant, soit une déformation 0.002 mm/s pour la première partie de l'essai. Lorsque la résistance maximale est atteinte, la vitesse est doublée à 0.004 mm/s.

Le Tableau 4.7 présente les résultats des différents essais de caractérisation en fonction des bétons étudiés.

Tableau 4.7 Résultats des essais de caractérisation des bétons étudiés

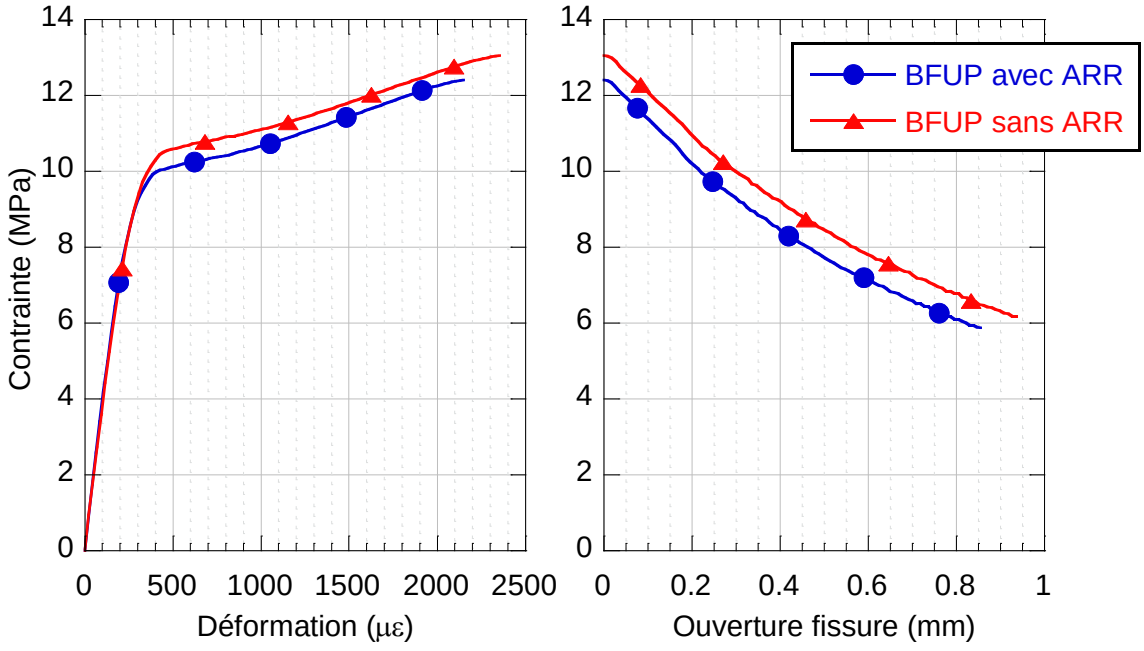
Propriétés	**Échéance**	**BFUP sans ARR**	**BFUP avec ARR**	**BHP**
f_c	7j	87.4	87.7	46.4
	28j	106	117	58.6
E_c	7j	-	-	30800
	28j	29300	36500	34000
ν	7j	-	-	0.221
	28j	0.232	0.238	0.276
f_t	28j	13.1	12.4	1.3

Selon le Tableau 4.7, il est possible de constater que les deux BFUP ont des propriétés mécaniques très similaires, soit une résistance à la compression (f'_c) de 106 MPa et 117 MPa à 28 jours pour le BFUP sans ARR et avec ARR respectivement. Normalement, une résistance à la compression de 120 MPa était attendue à 28 jours. Par contre, cette valeur tient compte d'une cure humide de 7 jours, ce qui n'a pas été le cas ici. Ces valeurs sont donc acceptables.

Au niveau des modules élastiques (E_c) à 28 jours, une valeur normale entre 35000 à 40000 MPa est attendue. Dans ce cas, on remarque que le BFUP sans ARR possède une valeur de 29300 MPa, ce qui est nettement inférieur à cette limite et nettement inférieur à celui du BFUP avec ARR. Selon

l'équation (4.1), un module élastique plus faible vient directement réduire la contrainte appliquée sur le béton de réparation, ce qui vient réduire le potentiel de fissuration du béton. Cet aspect devra être considéré dans l'évaluation de la fissuration dans ce béton. Pour sa part, le module pour le BFUP avec ARR est de 36500 et est très similaire à celui obtenu par Bastien-Masse (2010). Les coefficients de Poisson (v) se situent quant à eux autour des valeurs attendues.

En ce qui concerne la résistance à la traction (f_t) dans le BFUP, les essais ont été réalisés sur plusieurs prismes en forme d'os avec chacun un comportement similaire. Afin de calculer un comportement moyen à partir de plusieurs courbes, celles-ci doivent être dans un premier temps normalisées. Cela est effectué en divisant chaque axe par leur valeur respective au point où la contrainte en traction est maximale. Cela permet ainsi d'effectuer une moyenne entre les courbes des différents prismes pour un même type béton. Par la suite, l'axe des contraintes normalisé est multiplié par la moyenne des contraintes max et les déformations normalisées par la déformation moyenne à ce moment.



a) Comportement pré-pic b) Comportement post-pic

Figure 4.14 Comportement déformationnel en traction directe des BFUP

Dans le cas du BFUP sans ARR, un des prismes en forme d'os en béton s'est rompu avant l'atteinte de la résistance maximale. Cette valeur n'a donc pas été considérée dans la moyenne. Cela permet ainsi d'obtenir le comportement moyen des BFUP soumis en traction directe tel que présenté à la Figure 4.14.

À partir de la Figure 4.14, il est possible de remarquer que les courbes de déformation ont une forme similaire, mais est légèrement plus faible de manière générale pour le BFUP avec ARR. La contrainte ultime en traction est de 12.4 MPa pour le BFUP sans ARR et de 13.1 MPa avec ARR. De plus, les deux BFUP possèdent un comportement écrouissant en traction ainsi qu'un comportement adoucissant à la rupture. Il est aussi possible d'observer que les deux bétons possèdent un comportement élastique similaire. Ainsi, le module élastique faible mesuré pour le BFUP sans ARR est sûrement dû à une erreur expérimentale.

Ainsi, les valeurs des BFUP présentées au Tableau 4.7 et à la Figure 4.14 démontrent que l'ajout d'un adjuvant réducteur de retrait n'a pas d'impact significatif sur les propriétés mécaniques du BFUP.

Pour sa part, le BHP possède des valeurs adéquates pour un béton de sa catégorie, soit une résistance de 50 MPa à 28 jours, un module élastique autour de 35000 MPa et une résistance à la traction faible. Il est important de noter que la résistance en traction directe donnée au Tableau 4.7 est estimée à partir de l'équation (4.16).

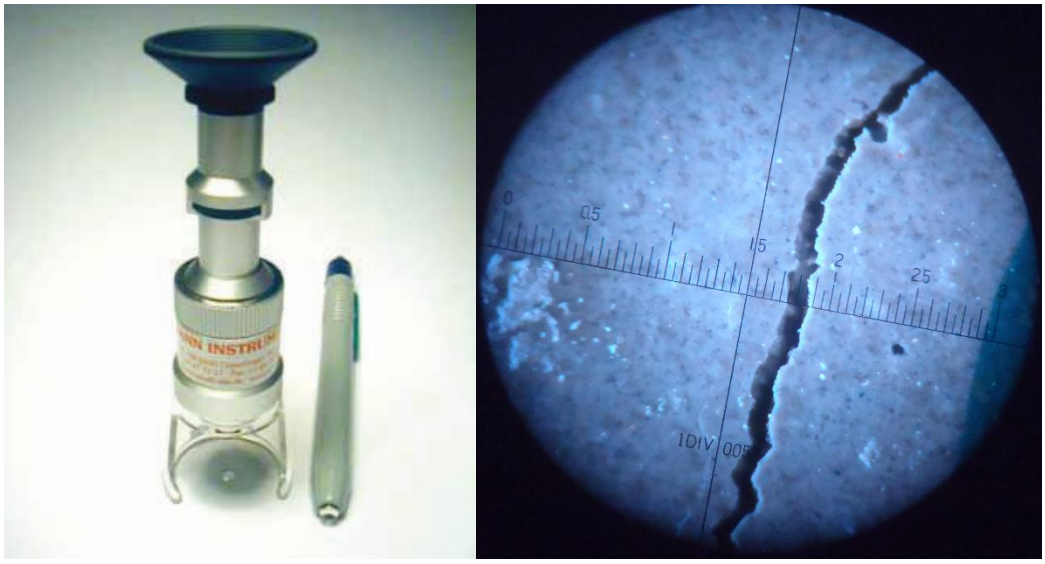
$$f_t = 0.65 \cdot f_{sp} \tag{4.16}$$

où le paramètre f_t est la résistance équivalente en traction directe de l'essai et f_{sp} la résistance à la traction calculée de manière indirecte avec l'essai brésilien à l'équation (4.15).

4.7 Procédure d'analyse de la fissuration

Afin d'évaluer le patron de fissuration causé par le retrait restreint dans les bétons de réparation, un relevé des fissures a été effectué. Celui-ci incluait la position, la longueur et l'ouverture des fissures à différents intervalles pendant la durée totale des essais, soit 28 jours. Afin de faciliter la mesure de l'ouverture des fissures, une lentille grossissante 20 fois de type CS-100 Crackscope de la compagnie Germann Instruments a été utilisée. L'appareil est présenté à la Figure 4.15-a.

L'ouverture de fissure peut être estimée à l'aide de la règle intégrée à l'optique de l'appareil (Figure 4.15-b) avec une précision de 0.05 mm.



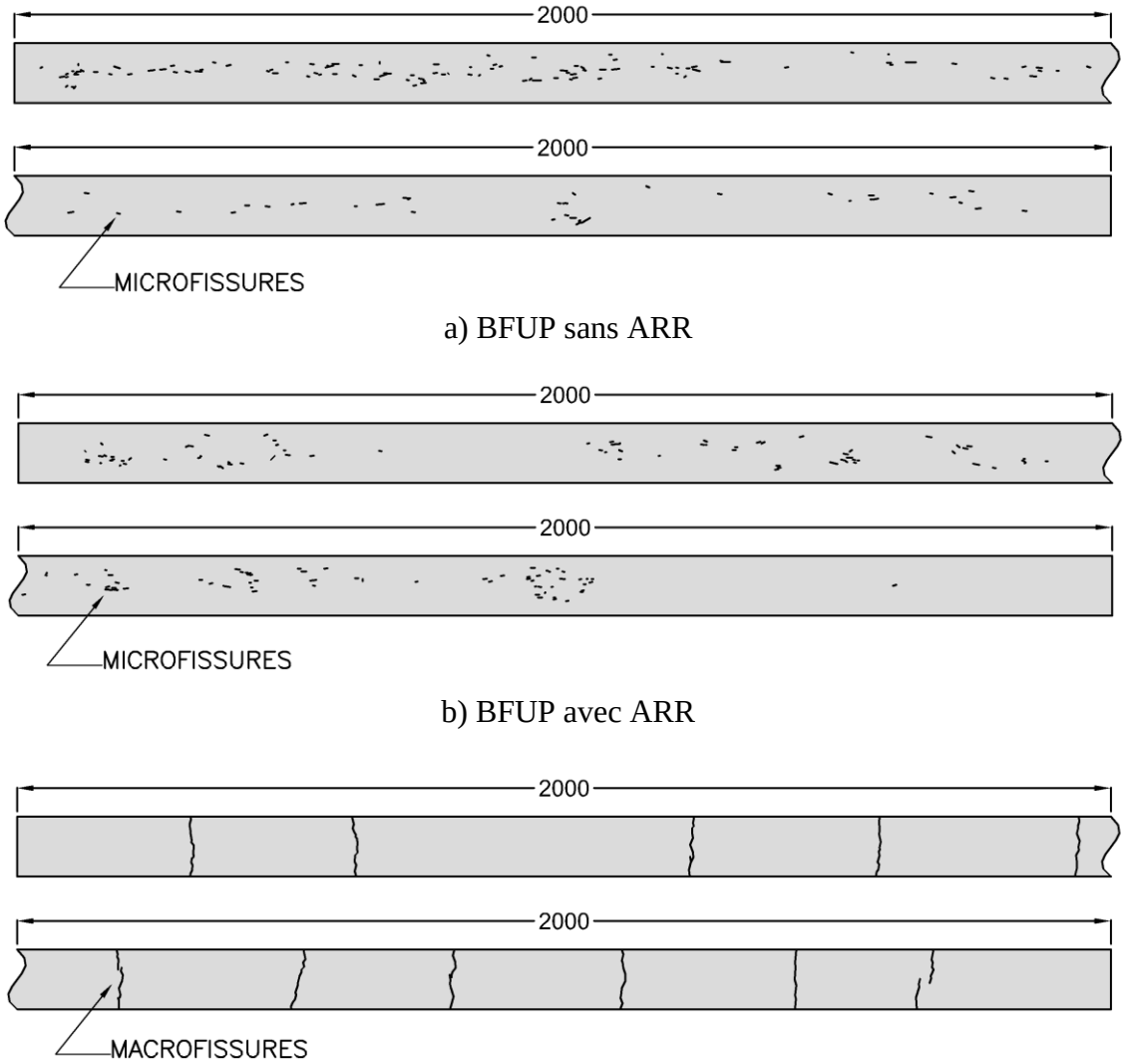
a) Vue d'ensemble de l'appareil b) Observation d'une fissure

Figure 4.15 Crackscope de Germann Instruments

4.8 Résultats et analyse

La Figure 4.16 présente le patron de fissuration observé lors de l'essai avec le BHP et les essais avec le BFUP sans et avec l'utilisation d'un adjuvant réducteur de retrait. Les schémas de fissuration des poutres ont été coupées en deux afin d'améliorer la clarté de la figure. En ce qui a trait aux deux BFUP, aucune fissure transversale n'a été observée. Par contre, plusieurs microfissures parallèles sur la longueur de la poutre sont présentes. Ces fissures sont apparues 24 heures après le retrait de la feuille de polyéthylène de la cure, soit trois jours après la coulée des spécimens. Toutes les microfissures observées dans les deux BFUP avaient une ouverture inférieure ou égale à 0.05 mm à la fin de l'essai, soit après 28 jours. Dans les deux cas, il est possible d'observer une distribution non uniforme des microfissures sur la longueur; celles-ci étaient situées dans les régions de la poutre où la feuille de polyéthylène n'était pas en contact direct avec le béton (surface plus rugueuse par rapport au reste). Le béton a donc été exposé à l'air

contenu dans les bulles d'air entrappées sous la membrane. Ainsi, la microfissuration observée dans les deux BFUP étudiés a surement été causée par un retrait de séchage causé par la dessiccation du béton en surface. Par ailleurs, lorsque le béton a été retiré de la section d'acier une observation sommaire n'a révélé aucune fissuration de la surface en contact avec l'acier.



a) BFUP sans ARR

b) BFUP avec ARR

c) BHP

Figure 4.16 Patron des fissurations dans les trois bétons étudiés

Le Tableau 4.8 présente la longueur moyenne des microfissures observées dans les deux BFUP à 28 jours. Selon ces valeurs, il est possible de mentionner que le BFUP avec ARR possède des

microfissures moyennes moins longues, soit de 5.0 mm en moyenne contrairement à 6.4 mm sans l'adjuvant. De plus, l'écart-type des longueurs est beaucoup plus faible dans le cas du BFUP sans ARR, soit de 2.4 mm par rapport à 3.7 mm avec un adjuvant. Cela permet ainsi de constater que l'adjuvant réducteur de retrait a un effet positif sur les retraits endogène et de séchage et permet de réduire la microfissuration observée. Par contre, puisque l'ouverture des microfissures était inférieure à la précision de l'appareil, soit de 0.05 mm, l'efficacité de l'adjuvant pour réduire l'ouverture des fissures a été impossible à évaluer.

Au niveau du BHP, plusieurs macrofissures transversales ont été observées sur la réparation (Figure 4.16). La distance moyenne entre ces macrofissures, sans compter les extrémités de la réparation, est de 333 mm. Cette valeur est semblable à ce qui a été observé par la Ville de Montréal sur des parapets réparés.

Tableau 4.8 Longueur moyenne des fissures dans les BFUP

BFUP	**Longueur moy (mm)**	**Écart-type (mm)**
Sans ARR	6.4	3.7
Avec ARR	5.0	2.4

La Figure 4.17 présente l'évolution de l'ouverture des fissures dans le BHP en fonction du temps. La fissuration a débuté entre le quatrième et le septième jour pour finalement atteindre une valeur moyenne à 28 jours de 0.15 mm. L'ouverture maximale à cette échéance est de 0.20 mm et l'ouverture minimale observée de 0.10mm. La cinétique de l'ouverture des macrofissures est rapide après l'initiation de la fissuration, mais diminue avec le temps jusqu'à devenir relativement stable à 28 jours. Ce processus est normal, puisque le retrait restreint du BHP est relié au retrait endogène survenant surtout durant les 28 premiers jours de l'hydratation et aussi le retrait de séchage qui débute dès la fin de la cure.

Par ailleurs, quatre jours après la coulée, soit avant l'apparition des macrofissures transversales, des microfissures parallèles ont été observées sur tout le long de la poutre d'acier proche de l'interface entre le BHP et l'acier des ailes. Après le retrait du béton des sections d'acier à la fin des essais, aucune fissure semblable n'a été observée sur l'interface acier/béton. Ces microfissures

ont possiblement été causées par un déplacement différentiel du béton au jeune âge par rapport au profilé. Le béton en surface a eu tendance à former un petit ménisque le long des ailes de la poutre d'acier. L'adhérence du béton à la section d'acier a probablement été supérieure à la résistance en cisaillement de cette protubérance, ce qui a engendré la fissuration observée.

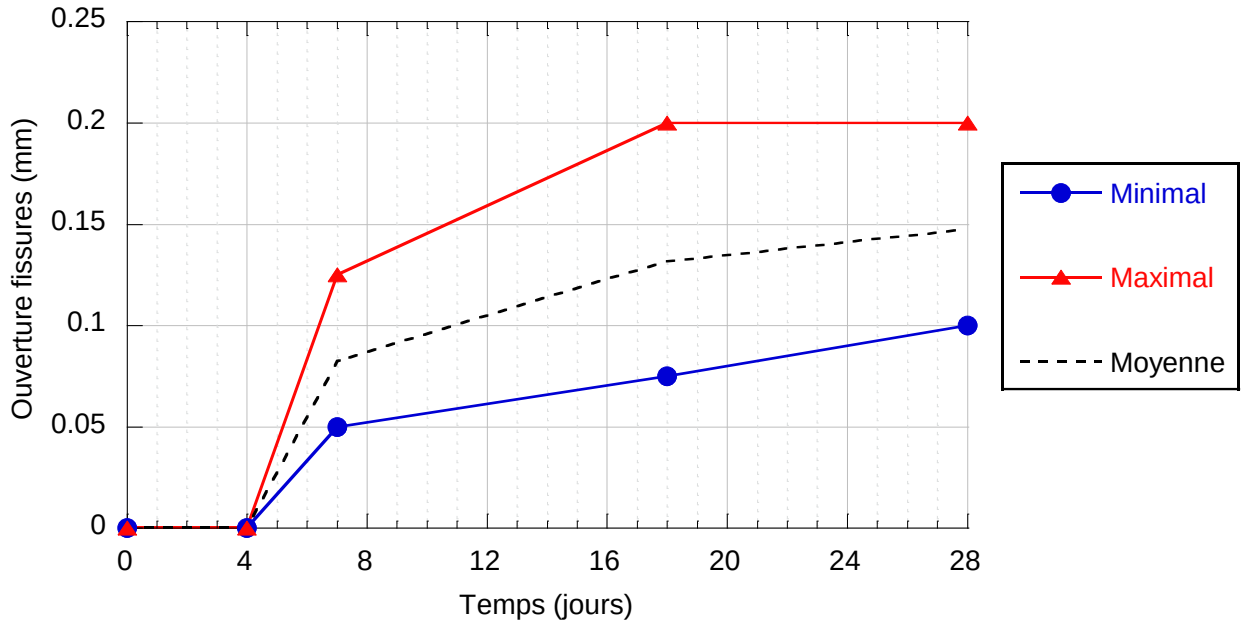


Figure 4.17 Ouverture des fissures dans le BHP en fonction du temps

Une fois les essais de retrait restreint terminés et le béton retiré des sections d'acier, il a été possible de valider l'intégrité des goujons. Ceux-ci n'affichaient pas de signe d'écrasement au niveau de l'âme de la poutre d'acier et ne présentaient pas de fissures en cisaillement. De plus, il a aussi été possible de calculer à l'aide d'un pied à coulisse l'épaisseur de la réparation en béton coulé. La Figure 4.18 présente l'évolution de l'épaisseur en fonction de la longueur dans la section d'acier pour les trois bétons étudiés. Dans le cas du BFUP sans ARR, celui-ci a une hauteur moyenne de 29.0 mm avec un écart-type de 1.2 mm. Pour sa part, le BFUP avec ARR possède une hauteur moyenne de 30.3 mm avec un écart-type de 3.8 mm. Le BHP possède une épaisseur moyenne de 30.6 mm avec un écart-type de 1.4 mm.

L'épaisseur de béton sur la section d'acier peut avoir un impact sur le degré d'entrave dans le béton. Plus la couche de béton est mince, plus le degré d'entrave augmente. L'épaisseur minimale

observée selon la Figure 4.18 est de 21.9 mm, ce qui correspond à une augmentation relative du degré d'entrave de 3.85% par rapport au degré d'entrave pour une épaisseur de base de 30 mm. Inversement, l'épaisseur maximale observée est de 34.1 mm, ce qui représente une différence relative de -1.86% par rapport à la valeur de base. Dans les deux cas, cela représente une différence inférieure à 5%, ce qui est acceptable.

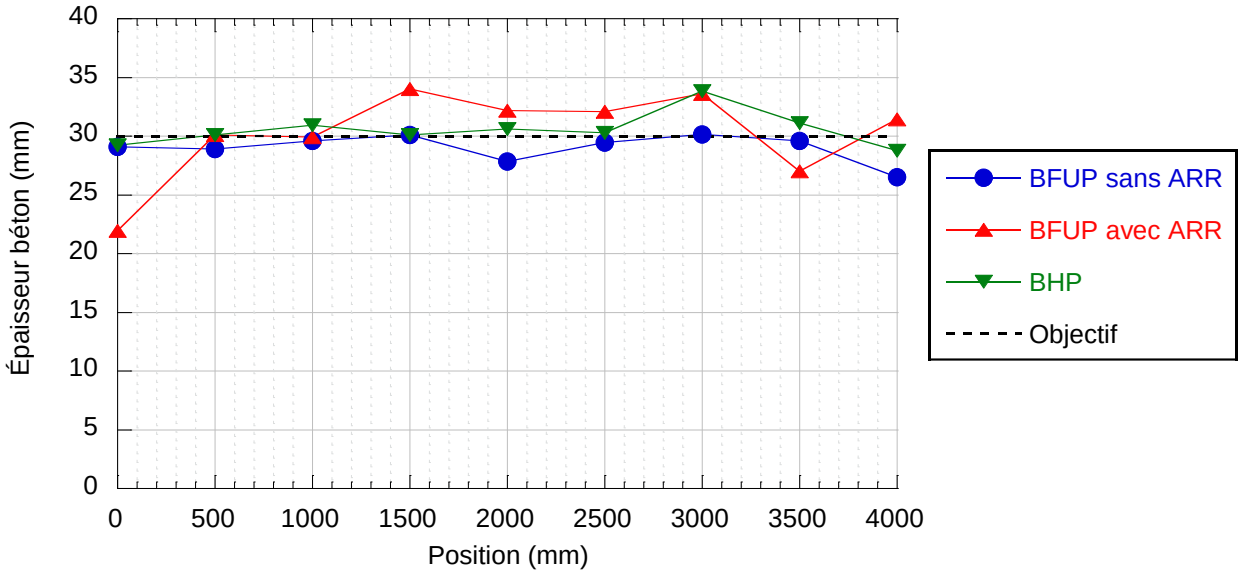


Figure 4.18 Épaisseur du béton coulé sur les sections d'acier en fonction de la longueur

À la section 4.1.2.5, le potentiel de fissuration du BFUP a été évalué. Il avait été estimé que le BFUP aurait dû initier une fissuration entre 7 et 28 jours. Par contre, la résistance à la traction utilisée dans le calcul était de 11.1 MPa à 28 jours. Cette valeur est beaucoup plus faible que celle observée en laboratoire selon le Tableau 4.7, soit une résistance à la traction de 13.05 et 12.4 MPa pour le BFUP sans et avec ARR respectivement. Dans les deux cas, ces valeurs sont légèrement supérieures à la contrainte de 12.05 MPa à 28 jours induite par le retrait restreint considérée précédemment. Cela permet d'expliquer pourquoi aucune fissuration sectionnelle n'a été observée lors des essais. De plus, aucune fissuration n'est apparue malgré le régime de cure sévère appliqué, soit simplement séché à l'air libre.

Ainsi, selon les observations réalisées en laboratoire, il est possible d'affirmer que le BFUP possède un excellent comportement en retrait restreint, car les deux mélanges ne présentent pas de macrofissures transversales tel qu'observé dans le BHP. Les microfissures observées dans les BFUP sont possiblement dues au retrait endogène et surtout la dessiccation prématurée causée par l'application d'une cure inadéquate et aurait surement pu être évitée si une cure humide avait été appliquée. Malgré cela, le BFUP affiche des ouvertures de microfissures inférieures ou égales à 0.05 mm qui ont très peu d'impact sur la durabilité du matériau (section 2.3.8). Quant au BHP, l'espacement et l'ouverture des microfissures diminuent considérablement son efficacité et sa durabilité, et ce, seulement 7 jours après l'application de la réparation sans cure humide.

4.9 Conclusions

Les objectifs du programme d'étude préliminaire étaient d'évaluer d'une part le comportement en fissuration du BFUP dans des conditions de retrait restreint similaires à celles anticipées sur le parapet, et d'autre part, d'évaluer l'utilité d'un adjuvant réducteur de retrait sur le patron de fissuration.

Un essai a été mis au point où une section d'acier de type W est utilisée pour simuler la restreinte engendrée normalement par le béton déjà en place. Afin de trouver le profilé optimal, le degré d'entrave d'un parapet-type simplifié est comparé à celui de plusieurs profilés. Cela a permis d'orienter le choix vers une section d'acier de type W130x28.1. Par la suite, pour assurer un comportement monolithique entre l'acier et le béton, des trous ont été perforés dans l'âme de la section d'acier afin de produire des goujons en béton.

L'essai a été effectué sur trois bétons différents, soit deux BFUP (avec et sans adjuvant réducteur de retrait) et un BHP. Pour favoriser l'apparition de fissures, aucune cure humide n'a été effectuée. Seul une feuille de polyéthylène a été appliqué pendant les 48 premières heures afin d'éviter la dessiccation en surface. Les essais ont été réalisés sur une période de 28 jours.

Le suivi des fissures s'est fait à l'aide d'une lentille grossissante, ce qui a permis d'évaluer leur ouverture avec une précision minimale de 0.05 mm à plusieurs intervalles de temps.

Les patrons de fissuration présentés à la Figure 4.16 nous permettent de faire les observations suivantes:

- Aucune macrofissure transversale ne s’est développée dans les deux BFUP étudiés. Par contre, des microfissures de surface ont été observées sur l’ensemble de la surface exposée. Ces fissures sont probablement une conséquence des retraits endogènes et de dessiccation. L’ouverture de ces microfissures est inférieure ou égale à 0.05mm;
- Aucune différence majeure n’a été notée au niveau du comportement mécanique entre le BFUP avec et sans ARR. Les fissures causées par le retrait restreint ont été en moyenne moins longues dans le béton avec un ARR, mais pas significativement plus petites;
- Plusieurs macrofissures transversales se sont formées dans le BHP. Après 28 jours, les macrofissures affichaient une ouverture moyenne de 0.15 mm et étaient distancées en moyenne de 333 mm.

En conclusion, sur la base des patrons de fissuration observés après 28 jours, le BFUP choisi possède un excellent comportement en retrait restreint et offrira une meilleure durabilité en service que le BHP. De plus, l’effet d’un adjuvant réducteur de retrait n’est pas significatif au niveau du patron de fissuration du BFUP. Son utilisation ne semble donc pas nécessaire pour la suite du projet.

CHAPITRE 5 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL PRINCIPAL

Tel que discuté au Chapitre 4, l'analyse d'une réparation soumise à des conditions de retrait restreint comporte plusieurs variables qui rendent difficile l'évaluation du comportement de la réparation dans le temps. À cet effet, l'analyse déformationnelle en laboratoire d'une telle réparation a été nécessaire.

L'objectif du programme principal d'essais est l'évaluation du comportement mécanique et déformationnel de parapets réparés avec du BHP et du BFUP. Une analyse exhaustive du comportement déformationnel est importante car elle permettra de calibrer le modèle d'éléments finis, développé par la suite au Chapitre 6.

Ce chapitre est divisé en sections représentant les principales phases de travail, soit la conception, la fabrication des parapets et leur réparation, l'évaluation des déformations des parapets réparés et finalement l'évaluation de la résistance mécanique des parapets réparés.

5.1 Programme expérimental

La première phase du programme consiste en la fabrication des parapets et leur réparation. En tout, deux parapets ont été fabriqués. Le premier possède une réparation en BHP et le second une réparation en BFUP. Afin d'éviter la fabrication d'un troisième parapet de référence sans réparation, le type de parapet et les dimensions seront les mêmes que ceux utilisés dans le projet de Amadou Thiaw (2014). Cela permet d'utiliser les résultats obtenus dans le cadre de son projet comme parapet de référence.

La seconde phase du programme expérimental consiste à analyser le comportement déformationnel des réparations et du parapet après l'application de la réparation. Le suivi des déformations est effectué à l'aide de thermocouples et de capteurs de déformation, coulés dans le substrat et la réparation elle-même, et ce, sur une période d'au moins 2 mois.

La dernière phase du programme expérimental consiste à évaluer, sous un chargement statique, le comportement mécanique des parapets réparés à l'aide d'un vérin hydraulique. Ceci permet de quantifier la résistance mécanique apportée par la réparation et de vérifier si le comportement est adéquat. Lors des essais, les déformations sont principalement mesurées à l'aide de capteurs installés en surface des parapets.

5.2 Conception et fabrication des parapets

5.2.1 Conception

Tel qu'indiqué précédemment, afin de réduire le nombre de spécimens à fabriquer dans le cadre du projet, il a été décidé de réutiliser la même section de parapet qu'a étudié Amadou Thiaw (2014). En effet, les résultats mécaniques obtenus dans le cadre de son projet pourront être utilisés pour le parapet en tant que référence non-réparé.

Le parapet simplifié utilisé est basé sur le parapet avec trottoir typique, coulé en place et utilisé par la Ville de Montréal en milieu urbain (Figure 5.1).

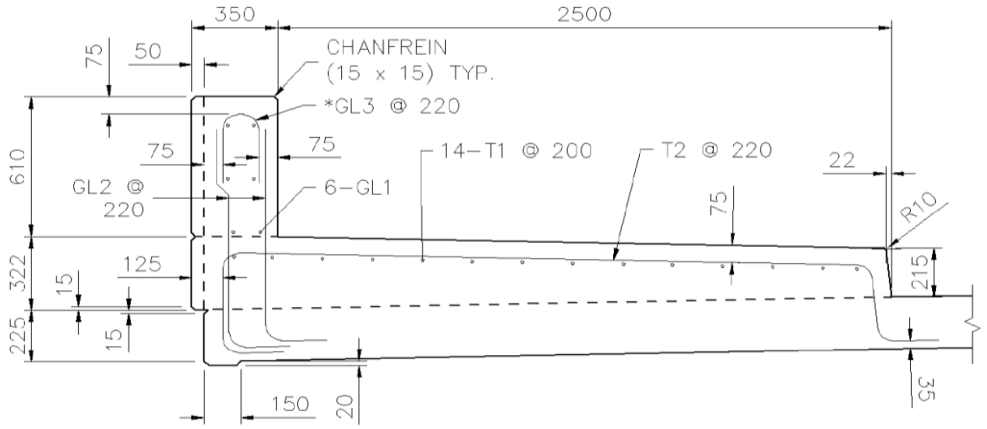
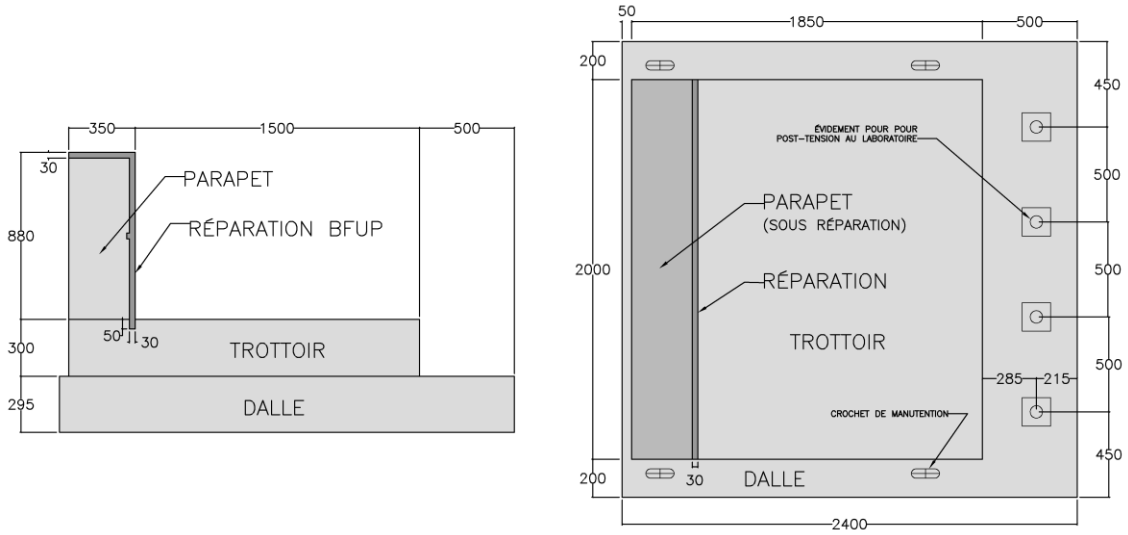


Figure 5.1 Parapet avec trottoir type en milieu urbain (Ville de Montréal, 2012)

Selon la norme CSA S6-14, ce parapet est de catégorie TL-4, ce qui correspond à une force transversale de conception de 100 kN. En tenant compte du facteur d'amplification dynamique de 1.7 à l'état limite ultime et du facteur de tenue moyen de 0.75 pour le béton armé, la force à laquelle doit résister le parapet réparé devient donc de 227 kN.

Cependant, ce parapet présente plusieurs éléments superflus ou inutiles dans le cas de la validation du comportement du parapet. Ainsi, celui-ci a été simplifié pour faciliter sa manutention et les essais en laboratoire. La Figure 5.2 présente les dimensions des spécimens simplifiés qui seront

utilisés dans le cadre du présent projet. Chaque spécimen est composé de quatre sections distinctes: la dalle de béton, le trottoir, le parapet et la réparation (absente pour le parapet de référence).



a) Vue latérale b) Vue en plan

Figure 5.2 Parapet simplifié

Les simplifications réalisées par Amadou Thiaw sur la section présentée à la Figure 5.1, pour obtenir la Figure 5.2, sont résumées ci-dessous :

- Réduction de la largeur du trottoir de 2.5 m à 1.5 m pour réduire la taille des spécimens;
- Variation de l'épaisseur du trottoir uniformisé afin de simplifier la fabrication. Cette variation sert normalement à l'écoulement des eaux.
- Élimination d'éléments superflus n'ayant aucun impact sur la structure de l'élément.
- Élimination de la structure en acier et allongement de la hauteur du parapet en béton à 880 mm. Cela permet ainsi de négliger l'impact de la connexion en acier dans le béton.
- Longueur du parapet fixée à 2 m à des fins pratiques.

En ce qui a trait à la conception de la réparation, le choix d'effectuer une réparation mince de 30 mm d'épaisseur repose sur des discussions avec la Ville de Montréal. En effet, une réparation plus

profonde s'avère plus difficile et coûteuse, car elle nécessite de retirer le béton jusqu'à l'arrière des armatures. Dans ce cas, il devient plus facile de tout simplement remplacer le parapet. De manière similaire, il a été décidé d'appliquer la réparation sur le dessus et la face avant du parapet seulement, puisque ces faces sont les plus exposées aux agents agressifs et sont par conséquent plus susceptibles de se détériorer. Il faut également noter que l'application d'une réparation à l'arrière du parapet en condition de chantier, est plus difficile.

Il a ensuite été résolu de prolonger la réparation mince sur une distance de 50 mm dans le trottoir, à l'aide d'une encoche. Cette encoche permet de réduire la pénétration d'eau et d'agents agressifs à l'interface parapet-dalle en condition de service. Elle permet aussi la participation de la réparation à la résistance mécanique du parapet.

Finalement, afin d'éviter une phase d'hydrodémolition des parapets pour produire la réparation, il a été décidé de fabriquer le parapet avec 30 mm d'épaisseur en moins. Cela permet d'éviter la location d'un équipement spécialisé en plus de la logistique liée à son utilisation. Afin d'assurer une interaction adéquate entre le parapet et la réparation, une interface rugueuse doit être préparée pour être représentative de celle anticipée dans le cas d'une hydrodémolition.

5.2.2 Fabrication

La fabrication des parapets a été réalisée en deux étapes distinctes, soit la fabrication du parapet à réparer (substrat) et la réalisation de la réparation. La première étape a été effectuée chez Béton Brunet de Valleyfield, un partenaire industriel du projet. Cette étape consiste en la préparation de l'armature, ainsi que la coulée du béton de la dalle, du trottoir et du parapet. Par la suite, les deux spécimens fabriqués ont été transportés à la Polytechnique de Montréal, où la couche de réparation a été appliquée.

5.2.2.1 Béton de référence et préparation de surface

Les spécimens d'essais ont été réalisés en trois coulées distinctes : une coulée pour la dalle, une pour le trottoir et ainsi qu'une pour le parapet. Le béton a été choisi selon les recommandations de la Ville de Montréal. Il s'agit d'un béton de résistance de 50 MPa en compression et de résistance de 3 MPa en traction. Les bétons utilisés ont été produits à l'usine et transportés jusqu'au spécimen à l'aide de camion-malaxeurs.

Afin d’assurer un comportement monolithique entre les différentes coulées, une bonne préparation des interfaces a été requise. La Figure 5.3 illustre la préparation effectuée avant les différentes coulées. Étant donnée la grande surface entre la dalle et le trottoir, un joint froid traditionnel a été produit, c'est-à-dire une surface de béton sans nivellement et finition. Cela permet l’obtention d’une rugosité suffisante et procure une adhérence adéquate entre le trottoir et la dalle.

Au niveau du joint entre le parapet et le trottoir, une surface à granulats exposés a été réalisée afin d’assurer la meilleure adhérence mécanique possible entre les bétons. Ce type de préparation de surface permet d’obtenir une adhérence similaire à celle d’une surface hydrodémolie. Pour se faire, à la suite de la finition du béton du trottoir, un agent retardateur de prise a été vaporisé à la surface. Vingt-quatre heures après la coulée, la surface a été frottée à l’aide d’une brosse en acier et d’un jet d’eau afin de déloger la pâte de ciment en surface et ainsi exposer les granulats.

Enfin, pour ce qui est du parapet, une surface à granulats exposés a aussi été préparée pour maximiser la résistance à l’interface entre la réparation et le substrat et favoriser un comportement monolithique. Dans ce cas, un jet d’eau à haute pression a servi à retirer la pâte de ciment en surface et à exposer les granulats.

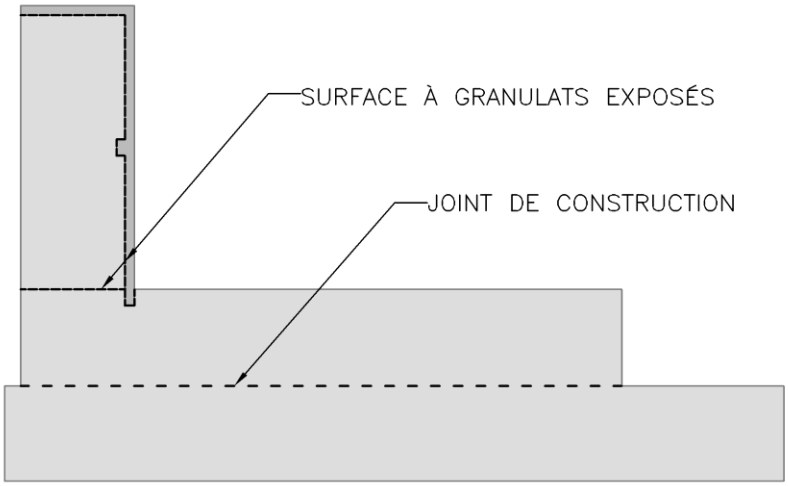


Figure 5.3 Préparation des interfaces entre les différentes sections de bétons

5.2.2.2 Fabrication des spécimens

Cette section présente succinctement les étapes de la fabrication des spécimens; la dalle de béton, le trottoir et le parapet. Puisque les deux spécimens réparés possèdent un substrat identique, tous deux ont été fabriqués de la même manière. La fabrication des deux spécimens a été réalisée à l'usine de Béton Brunet, un partenaire industriel du projet.

Les armatures en acier ont été pliées et coupées à l'usine. À l'exception de 6 barres 25M, toutes les barres pour une dimension donnée proviennent du même lot d'acier. Pour chaque lot, des échantillons de barre 15M et 25M ont été mis de côté pour la caractérisation des matériaux. De plus, chaque spécimen possède des armatures instrumentées de jauges de déformations, sur une barre verticale dans le trottoir ainsi que sur une barre horizontale dans le parapet. L'instrumentation sera discuté plus tard à la section 5.5.1. La localisation des armatures instrumentées y sera aussi présentée.

Puisque les coffrages d'acier utilisés dans le cadre du projet d'Amadou Thiaw (2014) ont étés conservés à l'usine, il a été possible de les réutiliser afin d'assurer une grande fidélité par rapport au spécimen témoin sans réparation produit lors de son projet.

La plupart des armatures du trottoir et une partie de celles du parapet étant ancrées dans la dalle, elles ont dû être installées avant la coulée de la dalle. De plus, afin de maintenir en place les armatures hors de la dalle, le coffrage du trottoir a été installé avant la production de la dalle, tel qu'illustré à la Figure 5.4. Une attention particulière a été portée à l'installation des barres instrumentées afin de ne pas les endommager.

Figure 5.4 Préparation de l'armature et des coffrages pour la coulée de la dalle

Un autre élément qui a été important en ce qui concerne la dalle de béton a été l'ultilisation de barres de manutention afin de permettre son transport (Figure 5.5).

Figure 5.5 Barre pour la manutention des spécimens avant la coulée de la dalle

Les barres de manutentions sont des goujons en forme de "V" inversés. Ceux-ci sont installés en surface avec leurs extrémités en dessous des barres 25M, afin d'assurer un comportement mécanique adéquat lors du transport. Un bloc en plastique a été installé sur l'extrémité du goujon. Celui-ci a été retiré 24 heures après la coulée afin d'exposer l'ancrage. La position des barres de manutention est identique à celle du spécimen de référence d'Amadou Thiaw (2014). Ceux-ci ont été positionnés de manière à répartir le poids au niveau des 4 barres de manutention.

Finalement, les trous pour les barres d'ancrage du spécimen sur la dalle du laboratoire ont aussi dus être préparés. Des tuyaux en plastique ABS ont été installés au travers de la dalle. Ces tubes resteront en place après la fabrication et lors des essais en laboratoire. Les tubes ont été fixés à la base de la dalle par un tube d'acier soudé à la plaque de base et ainsi que par le dessus à l'aide d'une barre transversale, tel qu'illustré à la Figure 5.6. La position et la verticalité des trous d'ancrage doivent être parfaites afin d'assurer un bon ancrage au laboratoire. En effet, puisque la dalle du laboratoire est très épaisse, une erreur de verticalité ou de position des trous peut engendrer des difficultés à insérer les barres d'ancrage lors de l'installation des spécimens. La verticalité a été validée avant la coulée.

Figure 5.6 Positionnement des tubes pour barres d'ancrage

Avant la coulée de la dalle, de l'huile de décoffrage a été appliquée sur le coffrage à l'aide d'un pinceau. De plus, des cylindres pour la caractérisation du béton ont été préparés. Cet aspect sera discuté à la section 5.3.

Après la coulée de la dalle une cure humide de trois jours a été réalisée sous une bâche (cure de type 1 selon la norme CSA A23.1-14), telle qu'illustré à la Figure 5.1. Vingt-quatre heures après la coulée, un cylindre a été testé en compression en usine pour assurer le développement d'une résistance adéquate afin de continuer la fabrication.

Figure 5.7 Cure humide après la coulée de la dalle

La coulée du trottoir a été réalisée vingt-quatre heures après celle de la dalle. En effet, l'ensemble des armatures avait été préparé à l'avance, car la plupart de celles-ci sont ancrées dans la dalle. Le seul élément supplémentaire a été l'installation de la tige d'acier dans le coffrage du trottoir afin de former l'encoche dans ce dernier. Cet élément est illustré à la Figure 5.8. Cette encoche était formée d'un tube d'acier de forme carrée auquel une plaque d'acier a été soudée afin d'obtenir une profondeur de 50 mm et une largeur de 30 mm.

Figure 5.8 Tube d'acier d'acier dans le coffrage pour former l'encoche dans le trottoir

La préparation de la coulée du trottoir était très similaire à celle de la dalle. Les coffrages ont été huilés et les spécimens de caractérisation préparés. De plus, de l'adjuvant retardateur de prise a été appliqué à l'aide d'un pinceau sur le tube d'acier utilisé pour former l'encoche dans le trottoir. Une attention particulière a été portée à assurer qu'il n'y ait pas d'égouttement de l'adjuvant sur les armatures ou au niveau de l'interface entre le trottoir et la dalle

Une fois le trottoir coulé, la surface exposée a été nivelée, à l'aide d'une longue barre en aluminium, afin d'obtenir la surface finale telle que présentée à la Figure 5.9.

Figure 5.9 Surface nivelée suite à la coulée du trottoir

Au niveau de l'interface entre le trottoir et le parapet, le même adjuvant retardateur de prise a été vaporisé à la surface.

Une cure humide de 3 jours a été effectuée sous une bâche. Vingt-quatre heures après la coulée, le tube d'acier utilisée pour former l'encoche dans le trottoir a été retiré. Par la suite, l'interface entre le trottoir et le parapet ainsi que la surface de l'encoche ont été frottées avec une brosse en acier afin d'obtenir une surface à granulats exposés.

Avant le début de la fabrication du parapet, un cylindre de béton a été testé en compression pour assurer une résistance adéquate. La fabrication du parapet a débuté avec l'installation des capteurs au centre du parapet, soit un capteur déformationnel de marque SOFO et un thermocouple. Le capteur SOFO possède une distance de mesure active de 1 m et utilise une fibre optique en son centre pour mesurer très précisément les déformations. Par contre, à cause de la fibre optique, le câble ne peut être plié en dessous d'un rayon critique sans endommager le capteur. Afin de fixer les capteurs parfaitement au milieu de la section, des barres 10M ont été installées horizontalement entre les barres verticales dans le parapet. Des collets en plastique ont été utilisés pour fixer le capteur aux barres selon les recommandations du fournisseur. Les câbles des capteurs ont été sortis par le côté du parapet, puisqu'il s'agit de l'endroit le moins critique lors des essais. Les barres d'armature horizontales restantes ont par la suite été installées.

Pour éviter l'hydrodémolition d'une couche de béton pour l'application de la réparation, le panneau avant du coffrage du parapet a été modifié afin de déplacer le panneau de 30 mm vers l'intérieur du parapet. De plus, une surépaisseur de la réparation a été requise à mi-hauteur, tel que présenté à la Figure 5.2. Cette surépaisseur est nécessaire dans la réparation puisque le capteur SOFO y occupe un espace considérable. Ainsi, une plaque de métal d'une épaisseur de 12 mm et d'une largeur de 50 mm a été soudée à l'intérieur du panneau avant du coffrage du parapet.

Avant de refermer le coffrage pour la coulée, tel qu'illustré à la Figure 5.10, les surfaces ont été huilées, à l'exception de la surface avant, qui elle a été enduite d'un adjuvant retardateur de prise. Des cylindres de caractérisation ont aussi été préparés. Suite à la coulée, un adjuvant retardateur de prise a aussi été vaporisé sur la surface supérieure du parapet.

Figure 5.10 Coffrage d'acier installé en vue de la coulée du parapet

Une cure humide de 7 jours a été effectuée sous une bâche (cure de type 2 selon la norme CSA A23.1-14). Vingt-quatre heures après la coulée, le coffrage a été complètement retiré et les surfaces avant et supérieure du parapet ont été traitées avec un jet d'eau à haute pression afin d'exposer les granulats.

Les capteurs coulés dans le parapet ont été testés avant et après la coulée pour assurer un fonctionnement adéquat. De plus, une série de prises de mesure à un intervalle de 15 minutes a eu lieu afin d'analyser le comportement du parapet avant l'application de la réparation.

5.2.2.3 Fabrication de la réparation

La quantité de béton requise pour les réparations et les essais de caractérisation étant faible, il a été décidé de transporter les deux parapets à l'École Polytechnique de Montréal pour y effectuer la coulée des réparations. De plus, cela permettait d'avoir un meilleur contrôle sur la production des bétons et un meilleur suivi des déformations après les coulées.

Avant la mise en place du béton de réparation, des instruments de mesure ont été installés, tel qu'illustré à la Figure 5.11.

Figure 5.11 Installation des capteurs coulés en place dans la réparation au niveau de la surépaisseur

L’instrumentation comprend un capteur de déformation de marque SOFO et un thermocouple, soient les mêmes instruments utilisés dans le substrat mentionné précédemment. Ceux-ci ont été installés au centre du parapet, au niveau de la surépaisseur de la réparation. Afin que les jauges soient bien localisées dans le béton de réparation, elles ont été soutenues à l’aide de vis à béton, positionnées à intervalle régulier dans le substrat. Selon les recommandations du fabricant, des collets en plastique ont été utilisés pour fixer les instruments sur les vis.

Un coffrage en bois a été utilisé pour la réparation. Celui-ci a été fabriqué et vérifié à sec, chez Béton Brunet, avant le transport des spécimens à l’École Polytechnique. Pour assurer une épaisseur de réparation précise, le coffrage englobait complètement le parapet. Ainsi, puisque l’épaisseur des panneaux latéraux était exactement de 350 mm, il a été possible de mouler une réparation d’exactement 30 mm d’épaisseur. Afin d’éviter tout déplacement du coffrage, ce dernier a d’abord été fixé par l’arrière à l’aide de vis en béton sur sa partie supérieure. Des poutres en bois ont également été mises de part et d’autres du trottoir sur la partie inférieure du coffrage.

Vingt-quatre heures avant la coulée, les surfaces en contact avec le béton frais ont été huilées. Le jour de la coulée, avant de fermer définitivement le coffrage, les surfaces ont été huilées à nouveau afin d’assurer que le coffrage n’absorbe pas l’huile de décoffrage. De manière similaire, l’interface entre la réparation et le substrat a été mouillée vingt-quatre heures avant la coulée pour permettre au béton d’absorber l’eau. Avant la coulée, la surface a été mouillée à nouveau, mais ensuite séchée de manière à obtenir une surface saturée séchée (sans accumulation d’eau en surface). Cela permet d’empêcher l’absorption d’eau à l’interface de la réparation, tel que discuté à la section 3.2.2. Les spécimens de caractérisation ont aussi été préparés pour la coulée.

Avant la fermeture du coffrage, un silicone a été appliqué pour sceller le coffrage aux endroits adjacents à la réparation. Les trous des fils de capteurs ont été remplis de mousse isolante dense.

La coulée de la réparation en BHP a été réalisée en premier. Après la préparation du béton à l’aide d’un malaxeur à tambour de 50 L, le béton a été acheminé par chaudière. Le béton est déversé sur la partie supérieure du parapet et s’est écoulé dans l’espace de 30 mm de la réparation, tel que montré à la Figure 5.12. À cause de la faible épaisseur de la réparation, le BHP fabriqué a été conçu pour être autoplaçant, donc aucune vibration du coffrage n’était nécessaire.

Figure 5.12 Coulée de la réparation en BHP

Lors de la mise en place du béton dans le coffrage, un bombement important de la surface avant du coffrage a été observé, dû à une rigidité insuffisante du coffrage. Une intervention à l'aide de deux poutres de bois et par des sangles a permis de tenir en étaux le coffrage et ainsi réduire considérablement la déformation, tel qu'illustrée sur la Figure 5.13.

Figure 5.13 Poutres en bois tenues en étaux afin de corriger le bombement dans coffrage avant du parapet

La cure de la réparation en BHP, suivant les recommandations de la Ville de Montréal (cure de type 3 selon la norme CSA A23.1-14), a débuté par l'application de jute humide, surmontée d'une feuille de polyéthylène, sur la surface supérieure exposée du parapet. Après un délai de vingt-quatre heures, le coffrage a été retiré. Par la suite, la jute humide a été placée sur toutes les surfaces exposées de la réparation. Un tuyau perforé a été installé sur le dessus du parapet afin de permettre à l'eau de la cure de percoler le long de la réparation. Une feuille de polyéthylène a été ajoutée pour recouvrir le tout. La cure a été appliquée pendant 7 jours après la mise en place de la réparation. La Figure 5.14 illustre le parapet sept jours après la fin de la cure humide.

Figure 5.14 Surface de la réparation en BHP après le décoffrage

Tout comme pour les capteurs dans le parapet, les instruments ont été testés avant et après la coulée de la réparation. Une prise de mesure à chaque 15 minutes a été initiée immédiatement après la mise en place du béton et a duré 2 mois. La prise de mesure sera discutée davantage à la section 5.4.1 .

Tel que mentionné plus tôt, la rigidité insuffisante du coffrage lors de la coulée de la réparation en BHP a causé un bombement de la surface avant du parapet. Afin de quantifier l'épaisseur de la réparation en tout point, un relevé topographique a été effectué à l'aide d'un théodolite au laser. Cela a permis d'obtenir des courbes isométriques, définissant l'épaisseur de la réparation (Figure 5.15). Comme attendu, le bombement a été principalement observé au centre, vers le bas du parapet, soit l'endroit où le coffrage était le moins rigide. L'épaisseur maximale de la réparation observée était de 43 mm, soit 43.3 % de plus que souhaité. L'épaisseur moyenne de la réparation était de 37.6 mm. La réparation dans le haut du parapet variait entre 30 et 32 mm et dans le bas elle variait entre 35 à 40 mm. Il était important d'augmenter la rigidité du prochain coffrage en son centre et au niveau du trottoir. De plus, la surépaisseur sera à considérer lors de l'analyse des résultats du parapet réparé en BHP, notamment en ce qui a trait au patron de fissuration observé. Par contre, la surépaisseur ne devrait pas avoir un impact majeur sur la résistance mécanique, car l'endroit critique est au niveau de l'encoche pratiquée dans le trottoir. Cette section n'a pas été affectée par la surépaisseur.

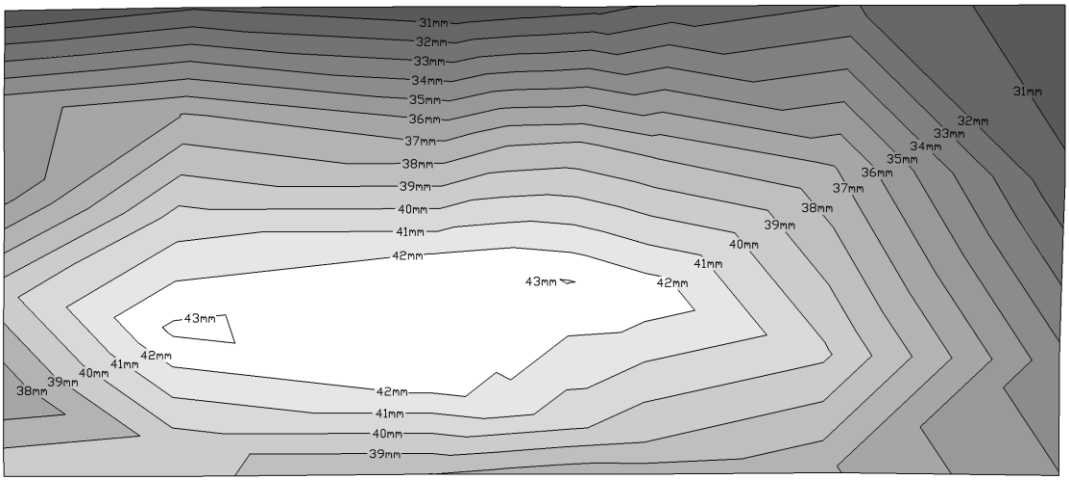


Figure 5.15 Épaisseur de la réparation en BHP au niveau de la surface avant du parapet

Pour la coulée de la réparation en BFUP, le coffrage a été reconstruit pour offrir une résistance et une rigidité adéquate. Des solives continues, et en plus grand nombre, ont été installées tout le long de la surface avant, tel qu'illustré à la Figure 5.16. De plus, des poutres doubles en 2x6 ont été ajoutées de part et d'autre du parapet au milieu et dans le bas du coffrage. Des tiges filetées ont été

utilisées afin de maintenir les poutres entre elles. Aussi, des supports supplémentaires ont été ajoutés dans le bas et dans le centre du parapet afin d'éviter le bombement de la surface avant. Ces supports ont été ancrés dans le trottoir à l'aide de vis à béton

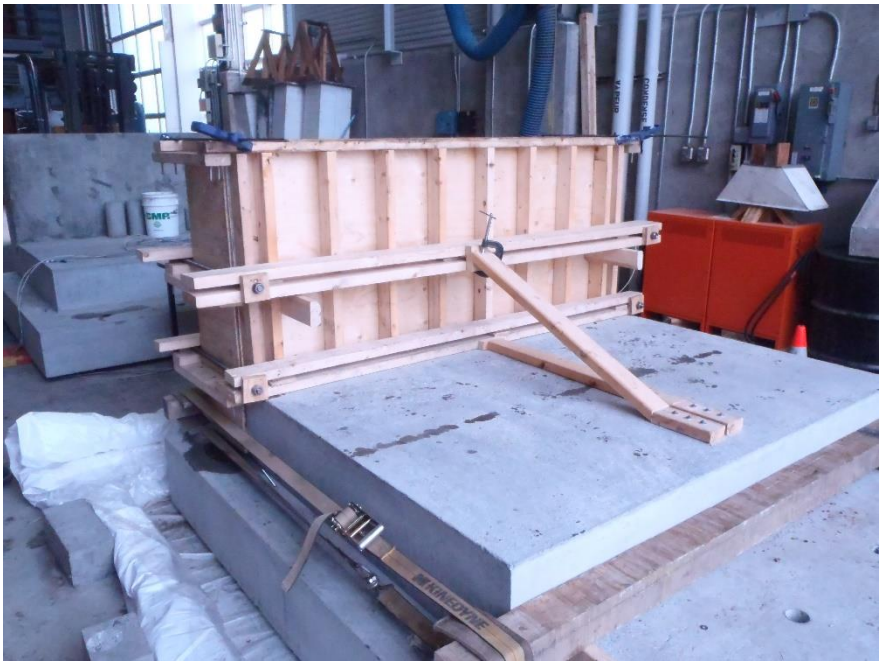


Figure 5.16 Coffrage renforcé pour la réparation en BFUP

La préparation du coffrage avant la coulée a été identique à celle réalisée lors de la coulée en BHP, notamment lors de la préparation de surface saturée séchée.

La coulée en BFUP utilisait les mêmes méthodes et équipements employés précédemment avec le BHP. Le béton a été déversé au milieu de la face supérieure du parapet et s'est écoulé dans l'interstice entre le substrat et le coffrage, tel qu'illustré à la Figure 5.17. L'écoulement résultant a permis de favoriser une distribution horizontale des fibres dans le coffrage. Cela qui aidera à augmenter la résistance et à potentiellement réduire l'apparition de fissures verticales dans la réparation engendrées par le retrait restreint.

Figure 5.17 Coulée de la réparation en BFUP

Pour la cure, une jute humide enrobée d'une feuille de polyéthylène a été placée et laissée sur la surface supérieure de la réparation pendant 48 heures. Après ce délai, le parapet a été décoffré et la cure s'est poursuivie avec un système d'écoulement continu d'eau, tel qu'utilisé dans le cas de la réparation en BHP. La Figure 5.18 illustre le parapet après l'application de la cure. Une surface très plane a été observée sans aucun bombement visible. Ainsi, le nouveau coffrage a efficacement contenu le béton frais et permis l'obtention d'une épaisseur de béton adéquate et uniforme de 30 mm.

Figure 5.18 Surface de la réparation en BFUP après le décoffrage

5.3 Évaluation des propriétés des bétons

Les essais de caractérisation des bétons de chaque coulée du projet ont été effectués afin de permettre une analyse adéquate des résultats des essais mécaniques et déformationnels ainsi que la calibration des modèles par éléments finis.

La présente section discute du comportement mécanique des bétons, soient les résistances à la compression (f'_c) et à la traction (f'_t), le module élastique (E_c) et le coefficient de Poisson (v). La caractérisation du retrait, du fluage ainsi que des effets thermiques dus à l'hydratation du béton seront discutés à la section 6.1, puisque ces informations sont plus pertinentes à l'étude numérique.

Pour les essais de résistance à la compression, le module de Young et le coefficient de Poisson, 6 cylindres de 100 mm de diamètre ont été préparés à chaque échéance. Les essais ont été réalisés sur la presse Amsler du laboratoire de l'École Polytechnique selon les recommandations de la norme CSA A23.2-9C. En ce qui a trait aux essais de la résistance à la traction, 4 cylindres de 6 pouces ont été préparés pour tous les bétons, à l'exception du BFUP pour lequel 6 prismes en forme d'os en béton ont été utilisés. L'essai en traction indirecte de type brésilien pour béton ordinaire a été effectué selon la norme CSA A23.2-13C. L'essai de traction sur prismes en forme d'os pour BFUP est basé sur la norme Rilem TDF-162. L'ensemble des procédures d'essais et des montages ont été décrits à la section 4.6.

Pour tous les essais de caractérisation, les bétons ont été soumis à la même cure que le béton d'origine. Cela a été accompli en plaçant simplement les différentes éprouvettes coulées sous une feuille de polyéthylène avant le décoffrage et sous la bâche avec un apport d'humidité.

5.3.1 Caractérisation des bétons du parapet

Au niveau de la caractérisation du substrat, six bétons différents ont été testés, soit deux dalles, deux trottoirs et deux parapets. Les propriétés des bétons ont été testées à une seule échéance, soit au moment de l'essai mécanique du parapet en laboratoire. Les résultats de ces essais sont présentés au Tableau 5.1.

Tableau 5.1 Propriétés mécaniques des bétons pour chaque spécimen fabriqué

Propriétés	**Parapet avec réparation en BHP**			**Parapet avec réparation en BFUP**		
	Dalle	**Trottoir**	**Parapet**	**Dalle**	**Trottoir**	**Parapet**
f'_c (MPa)	64.4	56.5	53.6	69.2	65.3	48.8
E_c (MPa)	32 200	29 800	30 200	34 600	36 100	29 000
ν (-)	0.221	0.223	0.225	0.217	0.241	0.203
f_{sp} (MPa)	3.9	3.6	4.0	3.9	4.0	2.9

Une valeur de 50 MPa était prévue à 28 jours pour le béton des parapets. Dans le cas présent, il est possible d'observer que presque tous les bétons respectent cette exigence. De plus, les résultats présentés au Tableau 5.1 sont pour une échéance nettement supérieure à 28 jours (184 jours dans le cas du béton le plus jeune du spécimen réparé en BHP et de 185 jours dans le cas du BFUP). Cela permet en partie d'expliquer pourquoi certains bétons ont une résistance nettement supérieure à celle demandée, à cause du gain additionnel de résistance après la période de 28 jours. Par contre, au niveau du béton du parapet pour le spécimen réparé en BFUP, une résistance de 48.8 MPa a été notée, ce qui est légèrement inférieur à ce qui était demandé.

En ce qui a trait au module de Young et de Poisson, des valeurs moyennes de 30 000 à 36 000 MPa et de 0.22 respectivement étaient prévues. Dans le cas présent, presque tous les bétons respectent ces exigences. Cependant, le béton du parapet réparé en BFUP affiche un module et un coefficient de Poisson plus faibles comparativement aux autres bétons étudiés.

Finalement, les valeurs de résistance à la traction par fendage sont très similaires et sont comparables aux valeurs observées par Thiaw (2014) pour un béton similaire. Par contre, le béton du parapet réparé en BFUP possède une valeur nettement inférieure par rapport aux autres. Ainsi, puisque ce béton affiche de manière systématique une résistance mécanique nettement inférieure par rapport aux autres bétons caractérisés et par à ce qui était souhaité, une attention particulière devra être apportée lors de l'analyse des résultats mécaniques.

Les propriétés de l'acier d'armature ont aussi été mesurées, notamment la résistance élastique des barres (F_y), la résistance ultime des barres (F_u) ainsi que le module élastique de l'acier d'armature utilisé. Les essais ont été réalisés sur la presse Instron installée dans le laboratoire et ont été effectués selon la norme ASTM-E8. En tout, trois lots différents d'acier ont été évalués, soit l'acier

des armatures 15M utilisées dans les deux parapets, l'acier des armatures des barres 25M utilisées dans les deux parapets et un second lot utilisé pour seulement 6 barres 25M utilisées dans la dalle du parapet réparée en BFUP. Pour chaque lot d'armature, trois spécimens d'une longueur de 610 mm ont été préparés lors de la fabrication des parapets.

Les essais de caractérisation consistent en l'application d'une jauge de déformation attachée à 100 mm de part et d'autre du centre de l'armature. Par la suite, les barres sont installées dans les mâchoires de la presse hydraulique. Le taux de chargement a été de 9 MPa/s selon la norme ASTM-E8.

Les propriétés mécaniques des armatures sont présentées au Tableau 5.2. Les résultats sont adéquats pour des armatures de nuance 400W. Enfin, il est possible d'observer que les deux lots d'armature 25M utilisés possèdent des propriétés mécaniques différentes.

Tableau 5.2 Propriété mécanique des lots d'armature utilisés

Résistance	**15M**	**15M-Usiné**	**25M-L1**	**25M-L2**
F_y (MPa)	454	458	473	426
F_u (MPa)	623	666	642	562
E_y (GPa)	231	253	226	208

5.3.2 Caractérisation de la réparation des parapets

Le Tableau 5.3 présente le résultat des essais de caractérisation des bétons de réparation. Contrairement au béton du substrat, la réparation requiert une bonne compréhension de l'évolution des propriétés dans le temps due à la réaction d'hydratation. Ainsi, les deux bétons de réparation ont été caractérisés à 7 jours, 28 jours et lors de l'essai mécanique sur les parapets. Une cure humide de 7 jours a été appliquée cette fois aux spécimens pour bien représenter les conditions de cure imposées aux réparations des parapets.

Tableau 5.3 Propriétés mécaniques des bétons de réparation utilisés

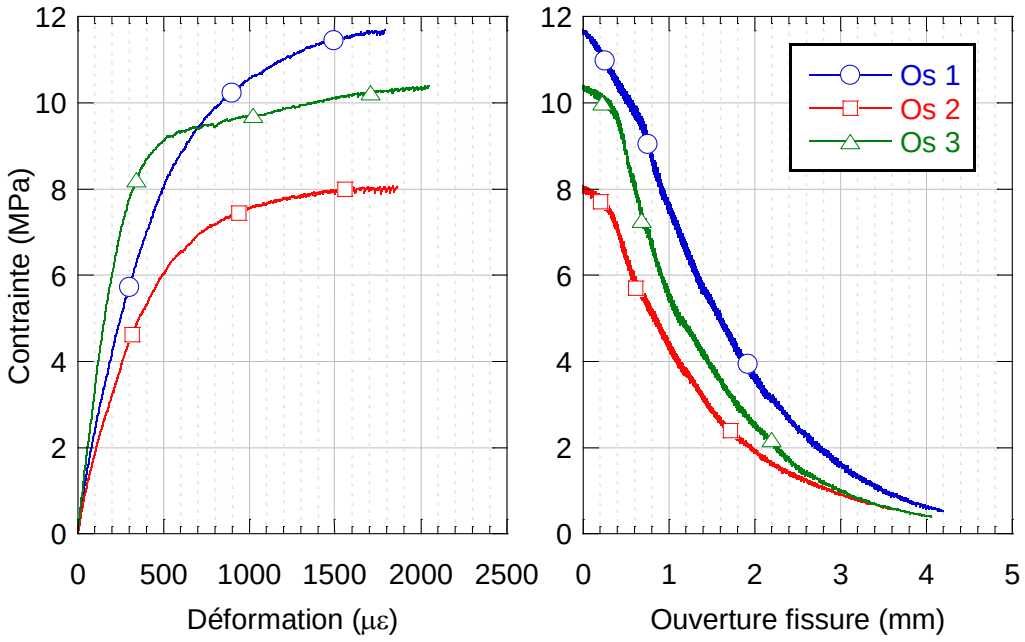
Description générale		**Réparation BHP**	**Réparation BFUP**
f_c (MPa)	7 jours	46.9	98.2
	28 jours	72.1	131.4
	Essai	74.1	132.2
E_c (MPa)	7 jours	33 300	31 500
	28 jours	37 100	34 500
	Essai	37 600	34 300
v	7 jours	0.199	0.219
	28 jours	0.220	0.195
	Essai	0.233	0.184
f_t (MPa)	Essai	NA	10.3
f_{sp} (MPa)	Essai	3.6	NA

Premièrement, il est possible d'observer que les résistances en compression du béton de réparation en BHP et en BFUP sont respectivement de 72.1 MPa et 131.4 MPa. Ces deux valeurs sont très proches des valeurs de conception, soit 70 MPa dans le cas du BHP et 120 MPa pour le BFUP.

Deuxièmement, les modules élastiques observés à 28 jours sont aussi similaires aux valeurs attendues, soit entre 30 000 MPa et 36 000 MPa pour les deux bétons. Les coefficients de Poisson se sont aussi montrés adéquats.

Les essais en traction par fendage sur le BHP et de traction directe sur le BFUP requièrent de grands volumes de béton. Par conséquent, il a été décidé d'effectuer les essais pour une seule échéance, soit lors de l'essai mécanique sur les parapets. Les deux valeurs ont été séparées dans le Tableau 5.3, car ce type d'essais ne se traduit pas par un comportement équivalent. Dans le cas du BFUP, la résistance à la traction observée est de 10 MPa tandis qu'une valeur de 3.6 MPa a été mesurée pour le BHP.

La Figure 5.19 illustre les courbes contraintes déformation en traction du BFUP mesurées sur trois spécimens. Le second prisme affiche une résistance de 8 MPa, soit une résistance nettement inférieure à celle prévue d'environ 10 à 12 MPa pour un BFUP de ce type. Ce phénomène peut avoir été causé par la nature hétérogène du matériau testé et une orientation des fibres différentes entre les spécimens.



a) Comportement pré-pic b) Comportement post-pic

Figure 5.19 Courbes contraintes déformations pour les essais en traction sur prisme en forme d'os pour le BFUP

5.4 Évaluation du comportement déformationnel des parapets

5.4.1 Instrumentation des essais de retrait restreint sur parapets

Tel qu'expliqué à la section 5.2.2, plusieurs capteurs ont été installés dans la réparation et le parapet. Ces capteurs servent principalement à la mesure des déformations et de la température suite à l'application d'une réparation en béton. La liste complète des capteurs utilisés par spécimen pour l'évaluation du retrait restreint est présentée au Tableau 5.4.

Tableau 5.4 Capteurs utilisés pour les essais en retrait restreint

Identification	Description	Position	Type
FO1	Fibre optique installée dans le parapet	Centre	SOFO
FO2	Fibre optique installée dans la réparation	Centre	SOFO
TH1	Thermocouple installé dans le parapet	Centre	THERMO
TH2	Thermocouple installé dans la réparation	Centre	THERMO
AMBIANT	Thermocouple à l'air ambiant	Centre	THERMO

En tout, deux capteurs à fibre optique de marque SOFO ont été utilisés pour mesurer les déformations dans la réparation et le parapet respectivement. Un thermocouple situé en plein centre du parapet a aussi été jumelé à chaque SOFO afin de déterminer la température dans chacun des éléments étudiés. De plus, un troisième thermocouple est laissé à l'air libre afin d'évaluer la température ambiante à laquelle sont soumis les parapets.

Le capteur SOFO permet une mesure des déformations avec une précision de l'ordre de 2 $\mu\varepsilon$. Le capteur est composé de trois zones importantes, soit le miroir d'extrémité, la zone active (L_a) et la zone passive (L_p), telles qu'illustrées sur la Figure 5.20.

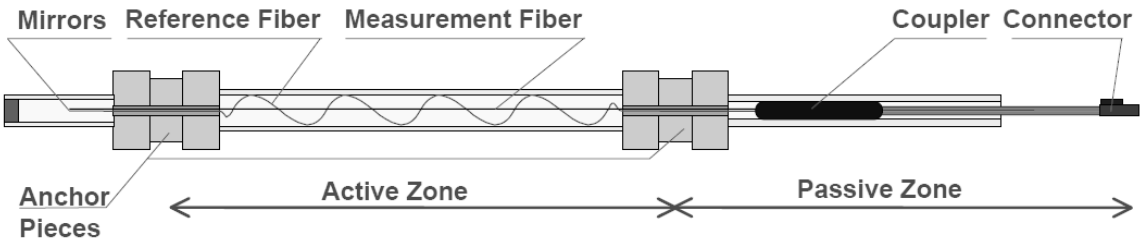


Figure 5.20 Schéma des parties du capteur de déformation optique de marque SOFO

Le fonctionnement du capteur repose sur l'analyse du temps pris par un signal lumineux à faire un aller-retour le long de la fibre optique. La prise de mesure est effectuée au niveau de la zone active. À cet endroit, une fibre optique est tendue entre deux ancrages de part et d'autre de la zone active (*Measurment Fiber*). Lorsqu'il y a une déformation entre ces ancrages, il y a un changement de la longueur de la fibre, qui à son tour modifie le temps que le signal prend à faire un aller-retour. Par contre, la fibre de mesure est assujettie au changement thermique. Ainsi, pour chaque mesure, le

temps de parcours est comparé à une fibre optique de référence non tendue dans la zone active (*Reference Fiber*). Cela permet d'éliminer l'effet de la température sur la lecture de la déformation. Le miroir installé à l'extrémité permet de refléter le signal dans la fibre. Pour sa part, la zone passive contient le mécanisme de couplage des faisceaux sur une courte longueur adjacente à la zone active. Le reste de la zone passive est utilisé pour acheminer le signal à l'unité de lecture.

Bien que ce type de capteur possède une haute précision, il possède aussi certains désavantages. Par exemple, le capteur ne peut être plié au-delà d'un certain rayon de courbure en fonction de la zone et ne peut être coupé. Ainsi, une attention particulière a donc été apportée pendant l'installation et pendant la période d'essai en laboratoire afin d'éviter l'endommagement des capteurs SOFO. Cela a été réalisé par une bonne gestion des fils et le placement de l'unité de mesure à un endroit avec peu de circulation.

Dans le cas présent, les différents capteurs SOFO possèdent une longueur active (L_a) de 1 m et une zone passive (L_p) variant entre 12 et 15 m en fonction du capteur.

L'unité de lecture utilisée (Figure 5.21) est une partie intégrale du système de capteur SOFO. Celle-ci est responsable de l'envoi du signal, du calcul du temps de parcours, ainsi que l'évaluation de la déformation subséquente dans le capteur. L'unité de lecture offre la possibilité de brancher jusqu'à 12 capteurs SOFO ainsi que 6 thermocouples distincts à l'aide d'un module externe. Ainsi, il est possible d'effectuer les essais en retrait retreint sur les deux spécimens en même temps.

Figure 5.21 Unité de lecture portative des capteurs SOFO

Aussi, une batterie interne offre une sécurité additionnelle en cas de panne électrique au laboratoire. La programmation de l'unité et le prélèvement des mesures prises ont été effectués à l'aide d'un programme dédié fourni par le fabricant.

Les capteurs SOFO *F01* et *FO2* ont été installés horizontalement au centre du parapet et verticalement à 440 mm au-dessus du trottoir. De plus, la zone active a été parfaitement centrée sur le parapet tel qu'illustré à la Figure 5.22.

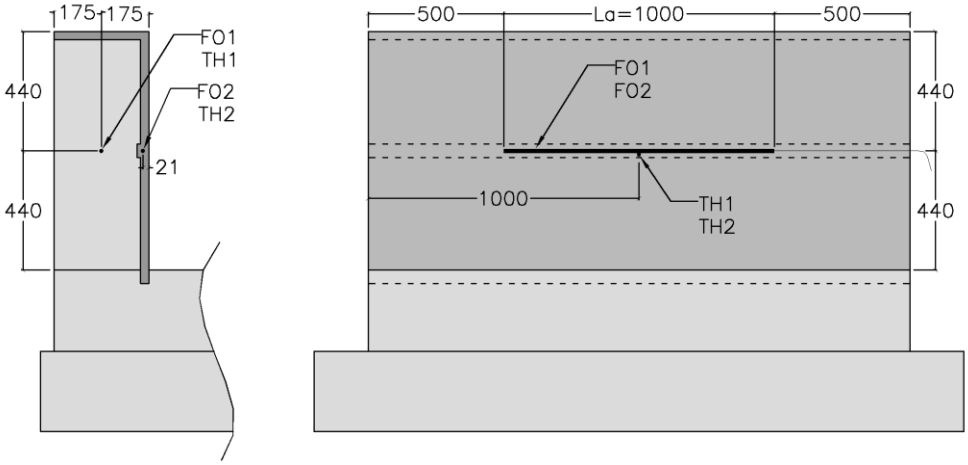


Figure 5.22 Position des capteurs coulés en place dans les spécimens

Ainsi, les déformations mesurées sont données pour la partie de 1 m de large au centre du parapet. Dans le cas du capteur *F01*, celui-ci a été installé au centre de la réparation au niveau de la surépaisseur. Le capteur est donc situé à 22 mm par rapport à la surface avant du parapet réparé. Quant à lui, le capteur *F02* a été installé au centre du parapet réparé, donc à 175mm par rapport à la surface avant du parapet réparé. Finalement, la zone active des thermocouples *TH1* et *TH2* a été installée au centre de la zone active des SOFO *F01* et *F02* respectivement. Le thermocouple responsable de la lecture de la température ambiante (capteur nommé *AMBIANT*) a été placé à proximité du parapet en prenant soin que l'extrémité active ne soit pas en contact avec aucune surface. Ce capteur de référence était le même pour les deux parapets. Les positions verticales et horizontales des capteurs SOFO et thermocouples sont illustrées sur la Figure 5.23, soit la sortie des fils des capteurs sur le côté des parapets.

Figure 5.23 Sortie des fils des capteurs coulés en place sur le bord du parapet

Il est aussi possible d'observer que les fils des jauges installées sur les barres d'armature (quatre jauges par spécimen) sortent aux mêmes endroits que les capteurs décrits précédemment, afin de limiter le nombre d'ouvertures à pratiquer dans la paroi du coffrage lors de la fabrication. La position des jauges sur armature sera présentée à la section 5.5.2. Le choix de faire sortir les fils par le côté s'explique par le fait que cette face est la moins sollicitée lors des essais mécaniques et que la partie des capteurs SOFO coulée dans le parapet ne peut être pliée excessivement.

5.4.2 Procédure expérimentale des essais de retrait restreint sur parapets

Tous ces capteurs permettent ainsi la prise de mesure des déformations pertinentes à l'analyse du retrait restreint dans le parapet. Pour ce faire, l'unité de lecture a été programmée pour prendre automatiquement une mesure de tous les capteurs à un intervalle de 15 min. Cette prise de mesures a débutée tout juste après la mise en place du béton de réparation et s'étale sur une période de 2 mois. La prise de mesure a dû être interrompue lors d'activité majeure, tels que le décoffrage des spécimens et le transport des parapets dans le laboratoire.

Finalement, afin d'évaluer l'évolution de la fissuration des réparations, une inspection visuelle a été réalisée quotidiennement durant les premiers jours à partir du moment où le coffrage a été retiré. En plus de tracer les fissures sur le parapet, un carnet d'observation a été conservé avec les fissures en fonction du temps et leur ouverture. L'ouverture des fissures a été évaluée à l'aide d'un « crackscope », tel qu'utilisé lors des essais préliminaires.

5.4.3 Résultats et analyse des essais de retrait restreint sur parapets

Cette section présente les résultats des essais de retrait restreint des réparations mises en place sur les parapets. En premier lieu, il sera question de l'évolution de la température dans les parapets due à l'hydratation des bétons de réparation. En second lieu, l'évolution des déformations dans les parapets sera discutée. Finalement, l'évolution de la fissuration dans les réparations sera analysée.

5.4.3.1 Évolution de la température

L'évolution de la température a été mesurée à l'aide des thermocouples installés dans le parapet et la réparation, et d'un capteur de référence pour la température ambiante. De plus, pour les deux figures suivantes, seuls les résultats des 14 premiers jours sont présentés, soit la période où l'hydratation et la cure humide surviennent.

La Figure 5.24 présente la température dans la réparation, dans le parapet ainsi que dans l'air ambiant pour le parapet réparé en BHP. L'échauffement du béton de réparation dû à l'hydratation est bien illustré. La phase dormante apparait par un refroidissement du béton de réparation pendant les 8 premières heures dans le coffrage. Par la suite, la réaction d'hydratation accélère et un grand dégagement de chaleur a été observé. Une température maximale de 27.4 °C a été atteinte 16 heures après la coulée. Cela représente une différence de 5.4 °C par rapport à la température ambiante. Par la suite, la température a commencée à diminuer, en raison de la décélération de la de réaction d'hydratation. Une nette baisse de la température a été observée après 24 heures, à cause du début de l'application de la cure humide avec un écoulement d'eau en surface. La température dans le spécimen a convergé après 4 jours vers la température moyenne de l'eau appliquée, soit une température moyenne de 18 à 19 °C.

Pour sa part, la température au centre du parapet a atteint une température maximale de 24.9 °C après 24 heures. Le délai entre les valeurs maximales observées du parapet et de la réparation s'explique par le fait que la température dans le parapet a augmenté par conductivité dans le béton et que le thermocouple possède un recouvrement dans le parapet beaucoup plus important que dans la réparation.

Au niveau de la température ambiante, l'évolution journalière est observable, malgré le fait que le spécimen a été installé à l'intérieur du laboratoire. Après la cure humide de 7 jours, les thermocouples installés se sont mis à converger vers la température ambiante. L'effet du changement de température journalier devient visible dans les capteurs du parapet 48 heures après la fin de la cure humide.

Le trou dans les données entre la neuvième journée et la dixième journée est dû à un mauvais démarrage de l'unité de lecture à ce moment. Ainsi, aucune donnée n'a été enregistrée pour cette période.

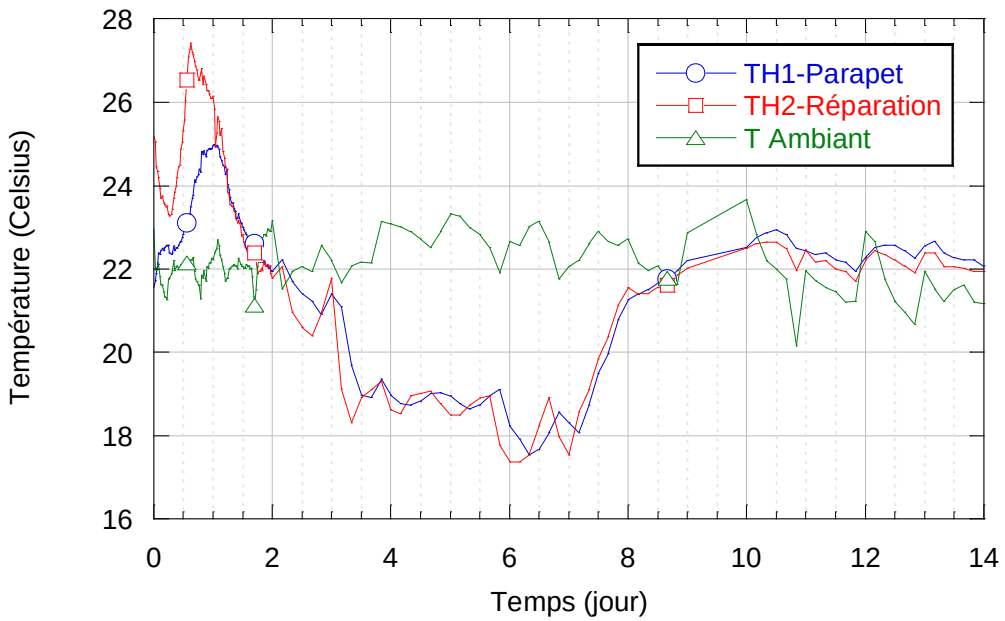


Figure 5.24 Température mesurée dans le parapet réparé en BHP après l'application de la réparation

La Figure 5.25 présente les résultats des thermocouples pour le parapet réparé en BFUP. En observant la Figure 5.25, il est possible de constater que cette panne de lecture est survenue à un moment critique de l'échauffement de la réparation en BFUP, soit l'atteinte de la température maximale. Par contre, il est possible de remarquer un début de ralentissement au niveau de l'échauffement de la réparation avant la perte de données. Il est donc possible de considérer que la valeur réelle ne doit pas être trop différente de la valeur maximale observée. Cependant, puisque la température dans le parapet est décalée par rapport à la réparation, il est difficile d'estimer la valeur maximale qui a été atteinte. Ainsi, seules les valeurs maximales qui ont été mesurées seront considérées dans cette analyse.

Les différentes phases de l'hydratation de la réparation en BFUP sont aussi bien visibles, soit une phase dormante d'environ 12 heures suivie par un fort échauffement du béton. La valeur maximale enregistrée est de 29.6 °C. La phase dormante plus longue et l'échauffement plus important dans le BFUP ont été respectivement causés par le dosage élevé de superplastifiant qui retarde initialement l'hydratation et la très grande quantité de ciment dans le mélange. L'échauffement

maximal qui a été enregistré dans le substrat est de 27.8 °C, ce qui est déjà beaucoup plus élevé (+4 °C) que dans le cas du parapet réparé en BHP.

Comme cela a été observé au niveau du spécimen réparé en BHP, l'application de la cure humide a été appliquée 48 heures après la coulée. Cela a eu un effet important sur la température de la réparation et du parapet. Ensuite, environ 3 jours ont été requis pour que la température dans les bétons converge vers la température moyenne de l'eau de cure (17-18 °C) et 2 jours après la cure humide pour converger vers la température ambiante.

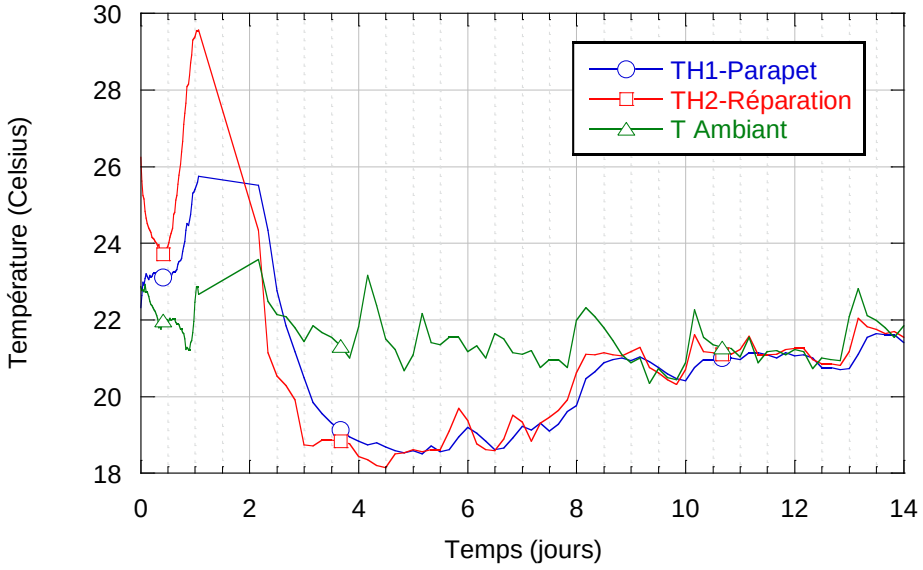


Figure 5.25 Température mesurée dans le parapet réparé en BFUP après l'application de la réparation

5.4.3.2 Évolution de la déformation

L'évolution des déformations dans les parapets a été relevée par les capteurs à fibre optique SOFO. La Figure 5.26 présente les déformations dans le parapet au niveau de la réparation en BHP et au centre du parapet lui-même. Dans les 7 premiers jours, il est possible d'observer l'impact de l'échauffement du béton par l'expansion mesurée dans la réparation et le parapet. Ensuite, la contraction subséquente est liée au retrait endogène et au refroidissement causé par la cure humide. À la fin de la cure (7 jours), la température du parapet augmente légèrement en causant une légère

expansion. Enfin, les courbes de déformations montrent par après une contraction continue causée par les retraits endogène et de dessiccation.

Contrairement au dégagement thermique observé dans le parapet (Figure 5.24), les courbes de déformation du parapet et de la réparation ne convergent pas. En effet, à partir de la troisième journée, il est possible d'observer une contraction plus importante dans la réparation que dans le parapet. Cette différence devient notable après la fin de la cure humide et est causée par les retraits endogènes et de dessiccation dans le béton de réparation. La contraction dans le béton de réparation est de l'ordre de 120 με à 30 jours et de 50 με dans le parapet à échéance similaire.

Les courbes de déformations dues aux retraits pour les deux bétons de réparation ainsi que le béton du substrat seront analysées en plus amples détails à la section 6.1.3.

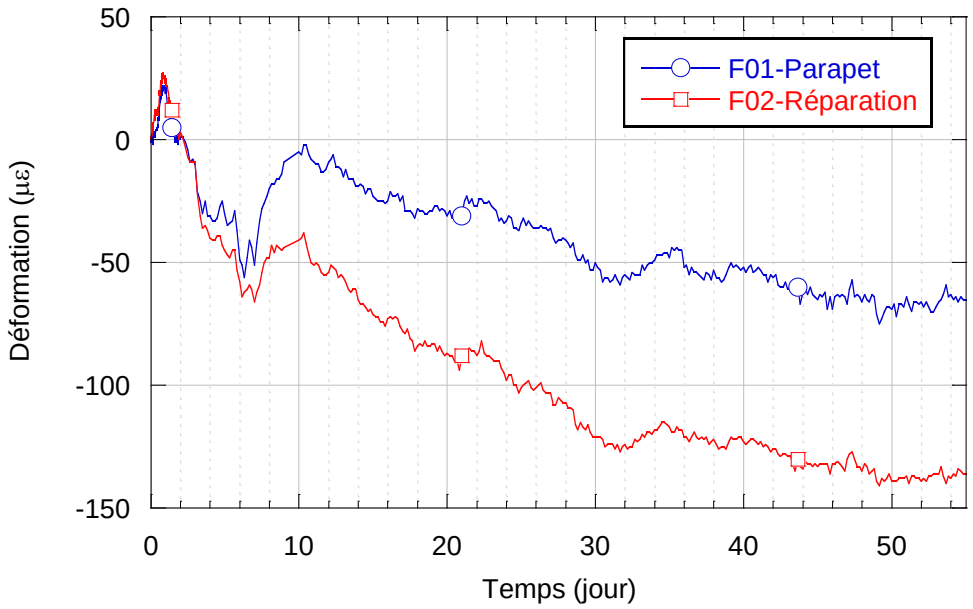


Figure 5.26 Évolution des déformations dans les capteurs SOFO dans le parapet réparé en BHP

La Figure 5.27 présente pour sa part les déformations dans la réparation en BFUP suite à la coulée de la réparation. Les déformations thermiques résultant de l'échauffement du béton et de la cure humide ont eu un impact important à court terme sur les déformations dans le parapet. Puisque l'échauffement dans le béton a été beaucoup plus important dans le BFUP que le BHP, l'expansion

observée est plus grande dans la réparation en BFUP par rapport à celle en BHP, soit une expansion maximale observée de 34 με et 27 με respectivement.

Similairement à ce qui a été observé pour le BHP, la courbe de déformation dans la réparation en BFUP commence à se distinguer après trois jours seulement. Par contre, l'expansion observée dans le parapet après la cure humide est moins importante dans le cas du BFUP. Cela peut s'expliquer par le fait que les déformations induites par le retrait restreint sont plus importantes dans le cas du BFUP. En effet, les déformations dans le parapet sont de l'ordre de -42 με à 7 jours dans le BHP et de -57 με dans le BFUP à pareille date. Cette tendance se maintient à moyen terme avec une déformation de -77 με dans la réparation en BHP et de -132 με dans celle en BFUP. Cette différence de déformation peut s'expliquer par un retrait endogène plus élevé dans le BFUP par rapport au BHP, à cause de la plus grande teneur en ciment et du rapport E/C faible du BFUP. Cette différence de déformation peut aussi être en partie attribuable aux faibles résistances mécaniques du béton du parapet réparé en BFUP tel que présenté au Tableau 5.2.

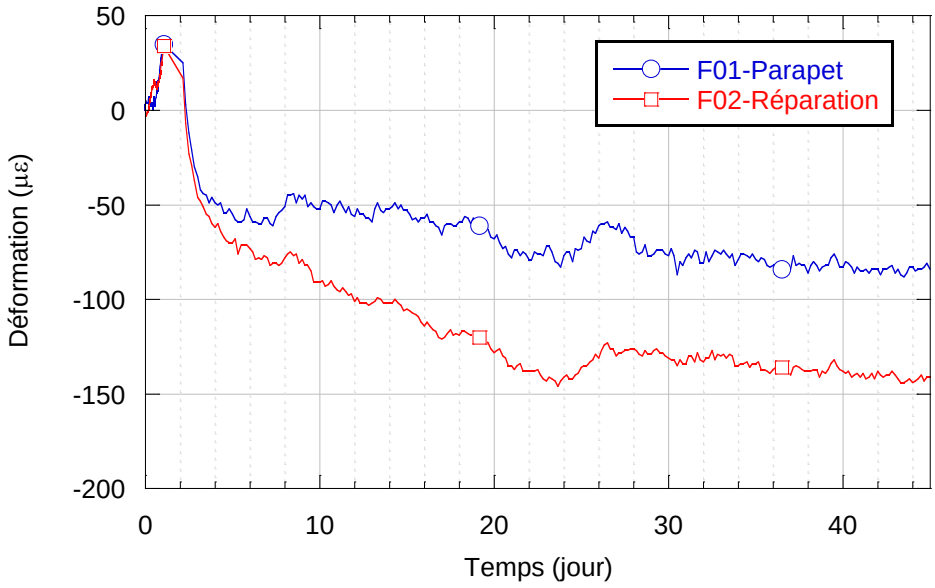


Figure 5.27 Évolution des déformations dans les capteurs SOFO dans le parapet réparé en BFUP

5.4.3.3 Évolution de la fissuration

En ce qui a trait à l'évaluation des fissures, aucune fissuration n'a été observée au niveau de la réparation en BHP après 28 jours. Ce résultat diffère de ce qui a été observé au niveau des essais préliminaires (section 3.3.3). Cela peut s'expliquer par le fait que le béton de réparation a subi une cure humide avec écoulement d'eau. La cure a permis ainsi de décaler le retrait dû au séchage et permis au BHP de développer une résistance adéquate pour contrer les contraintes en traction induites par le retrait restreint.

En ce qui a trait au parapet réparé en BFUP, aucune fissuration n'a été observée durant les premiers jours. Avant de la réalisation de l'essai mécanique, une peinture blanche diluée a été appliquée sur les surfaces du parapet afin d'améliorer la visibilité des fissures lors de l'essai mécanique. L'application de cette peinture sur le parapet réparé en BFUP a permis de déceler des microfissures qui n'avaient pas été observées jusqu'à ce moment. La Figure 5.28 présente la surface avant du parapet réparé en BFUP ainsi que les microfissures observées après l'application de la peinture.

Figure 5.28 Microfissures sur la face avant du parapet réparé en BFUP

Ces microfissures étaient principalement horizontales et remontent légèrement au niveau des extrémités telles que présentées à la Figure 5.28. L'ouverture des fissures a été évaluée à l'aide d'une lentille grossissante. L'ouverture observée des fissures n'a pu être mesurée adéquatement, étant moindre que la limite minimale de l'appareil de mesure, soit 0.05mm. Une attention particulière a été apportée afin de mesurer aux endroits où la peinture avait le moins pénétré les fissures.

Puisque ces fissures n'ont pas été observées durant les 30 premiers jours après le décoffrage, elles ont probablement été causées par la combinaison des retraits endogène et de séchage à long terme subi par le BFUP. Vu leur faible ouverture, les microfissures ne devraient pas avoir d'impact significatif sur la durabilité du béton (Charron et al. 2008). Cet aspect sera considéré lors de l'analyse de l'essai mécanique du parapet pour évaluer si cette microfissuration a un impact sur la résistance générale du béton ou sur la résistance à l'interface.

5.5 Évaluation du comportement mécanique des parapets

Les essais mécaniques réalisés sur les parapets permettent l'évaluation du comportement mécanique jusqu'à la rupture et la validation d'un comportement adéquat en fonction des exigences de performance du code des ponts routier du Canada (CSA S6-14).

5.5.1 Montage expérimental pour les essais mécaniques sur parapets

Les essais ont été effectués avec le même montage que celui utilisé dans le projet de Thiaw (2014). Cela permet ainsi l'utilisation des courbes de résistance de son parapet sans réparation (parapet de référence). Le montage en BHP sans réparation pour l'analyse des résultats est présenté à la Figure 5.29.

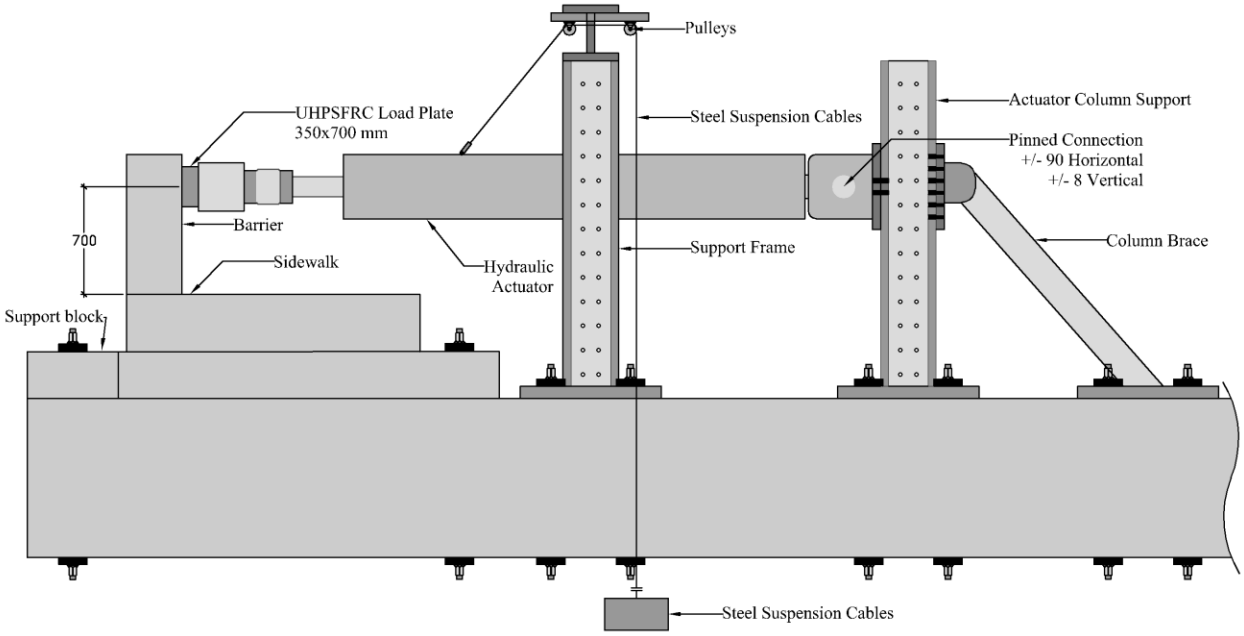


Figure 5.29 Montage en laboratoire pour évaluation du comportement mécanique des parapets (Thiaw 2014)

Le montage et les essais ont été réalisés directement sur la dalle du laboratoire de structure. Le montage comprend trois sections, soit le parapet ancré sur la dalle, le cadre métallique supportant le vérin hydraulique et finalement, les instruments de mesure (non présenté à la Figure 5.29).

Avant l'installation du parapet sur la dalle, toutes les surfaces exposées des spécimens ont été traitées avec une peinture blanche diluée pour faciliter l'observation des fissures lors des essais. De plus, un quadrillage de 10 x 10 cm a été dessiné sur les surfaces du parapet pour aider la reproduction du patron de fissuration se développant pendant l'essai mécanique.

Un coulis a été appliqué sur la dalle du laboratoire avant de déposer le spécimen pour obtenir un bon contact entre le spécimen et la dalle. Le parapet est ancré sur la dalle à l'aide de 4 barres d'ancrage Dywidag passant au travers de la dalle du spécimen et de la dalle du laboratoire. Des plaques d'acier ont été utilisées à chaque extrémité afin de répartir adéquatement la force des barres d'ancrage. Pour assurer un contact adéquat entre les plaques d'acier et la surface supérieure du trottoir, un coulis a été appliqué entre la plaque et la dalle du parapet. Finalement, afin d'éviter que

le parapet glisse horizontalement lors des essais, un bloc de support a été ancré dans la dalle tout juste derrière le parapet.

Un vérin hydraulique de 1000 kN a été utilisé pour l'application de la charge sur le parapet. L'axe centrale du vérin a été installé horizontalement à 700 mm par rapport au-dessus du trottoir, tel qu'exigé par le code de conception des ponts (CSA S6-14). Le vérin est muni d'une attache rotulée à l'arrière et a été fixée à un poteau en acier ancré dans la dalle du laboratoire. Ce poteau a été soutenu à l'aide d'un support incliné à 45 degrés ancré dans la dalle du laboratoire. Afin d'assurer que la charge appliquée sur la surface avant du parapet soit parfaitement horizontale, la partie avant du vérin a dû aussi être soutenue. Pour ce faire, un système composé de deux câbles de part et d'autre du vérin reprenaient le poids propre du ce celui-ci. Ces câbles étaient soutenus à l'aide de poulies fixées à un cadre en acier installé par-dessus le vérin. Ceux-ci étaient reliés à leur autre extrémité par un contrepoids situé dans le sous-sol du laboratoire de structure, (Figure 5.30). Le contrepoids installé au sous-sol du laboratoire était composé d'une plateforme de bois chargée de sacs de ciment afin d'atteindre une force de soulèvement dans les câbles équivalente au vérin.

Figure 5.30 Contrepoids relié aux câbles soutenant le vérin

Finalement, pour obtenir un contact adéquat entre le parapet et le vérin, un dispositif de transmission de charge a été utilisé, tel que présenté à la Figure 5.31. La surface avant du dispositif est de 350 mm verticalement et de 700 mm horizontalement.

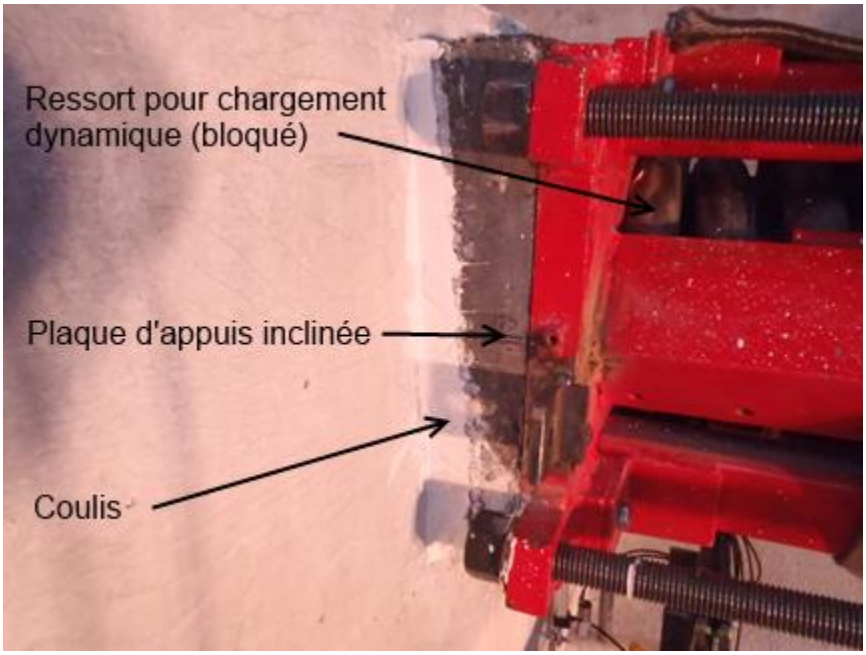


Figure 5.31 Dispositif de transmission de charge sur la surface avant du parapet

Un coulis a été appliqué quelques jours avant les essais entre le dispositif de transmission de la force et la surface avant du parapet afin d'assurer une surface de contact adéquate. Le coulis a permis de corriger la surface avant du dispositif de transmission qui avait été modifiée dans un projet précédent afin d'appliquer une charge sur un parapet incliné. Ce dispositif permet d'appliquer un chargement statique ou dynamique au parapet. Dans ce projet, seul un chargement statique a été appliqué.

5.5.2 Instrumentation pour les essais mécaniques sur parapets

L'instrumentation des essais mécanique a principalement été installée en surface des spécimens et le plus proche possible sur l'axe central. Certains des capteurs doivent mesurer des déplacements totaux dans le parapet. Pour ce faire, deux cadres en acier ont été installés par-dessus le spécimen

lors des essais (Figure 5.32). Ces cadres permettaient ainsi d'attacher les instruments sur une référence fixe qui n'est pas affectée par l'application de la charge sur le parapet.

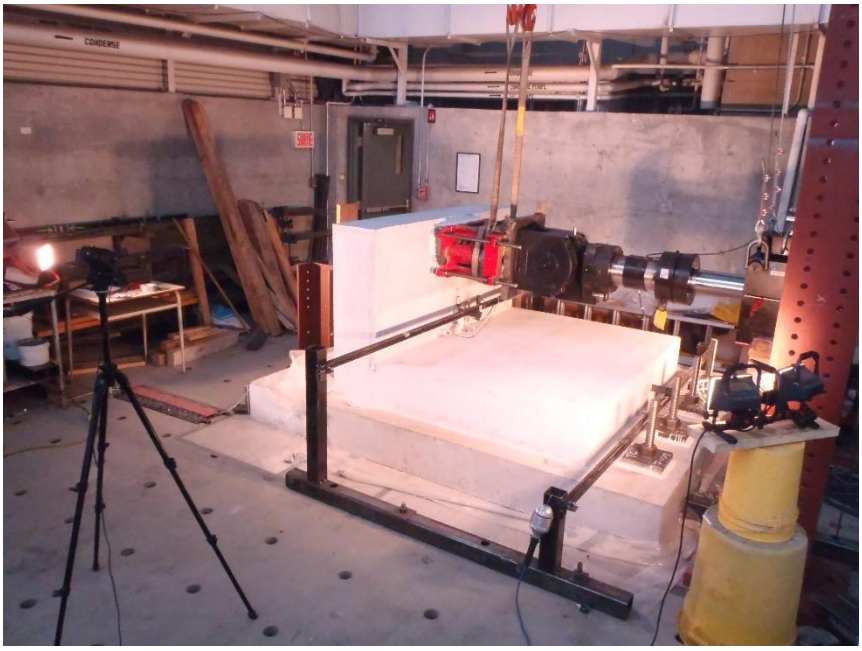


Figure 5.32 Cadres d'instrumentation installés sur le parapet pour l'essai mécanique

Le premier cadre a été installé tout juste à l'avant du parapet et au-dessus du trottoir. Le second a été installé par-dessus la dalle entre les ancrages et le trottoir. Les cadres ont été à leur tour fixés sur des profilés de type HSS de part et d'autre du spécimen. Ces profilés HSS ont été solidement fixés à la dalle du laboratoire à l'aide de tige d'ancrage pour éviter tout déplacement.

Le Tableau 5.5 présente l'ensemble des instruments de mesure qui ont été installés sur le montage et sur le parapet afin d'évaluer les déplacements, déformations et ouvertures de fissure lors des essais mécaniques.

Tableau 5.5 Capteurs utilisés pour les essais mécaniques

Identification	**Description**	**Position**	**Type**	**Course (mm)**	
				Min	**Max**
GP1	Glissement base parapet	Centre	LVDT	-15	15
GT1	Glissement base trottoir	Centre	LVDT	-15	15
DR1	Décollement réparation	Centre	LVDT	-15	15
SP1	Soulèvement base parapet	Centre	LVDT	-15	15
ST1	Soulèvement trottoir	Centre	LVDT	-15	15
OP1	Ouverture 1 fissures flexion parapet	Centre	L-POT	-12.5	12.5
OP2	Ouverture 2 fissures flexion parapet	Centre	L-POT	-12.5	12.5
OP3	Ouverture fissure flexion latérale arrière	Centre	L-POT	-12.5	12.5
JT1	Jauge sur armature dans trottoir (2 fois)	Centre	Jauge		
JP1	Jauge sur armature dans parapet (2 fois)	Centre	Jauge		
FR	Force appliquée	Centre	Cellule charge		
FL	Flèche parapet	Centre	L-POT	-100	100

Les capteurs ont été regroupés en trois sections distinctes, soit à l'arrière du parapet, à l'avant du parapet et au niveau du trottoir proche des tiges d'ancrage. La Figure 5.33 présente une partie des capteurs installés devant le parapet. Les capteurs *ST1* et *SP1* ont été supportés par le premier cadre et permettaient de calculer le déplacement vertical dans le trottoir et à la base du parapet respectivement. Afin d'assurer un contact au niveau des surfaces de béton, des plaques métalliques (certaines en forme de « L ») ont été collées aux surfaces de référence. La différence de mesure entre ces capteurs a permis ainsi l'évaluation de l'ouverture de l'interface entre le parapet et le trottoir.

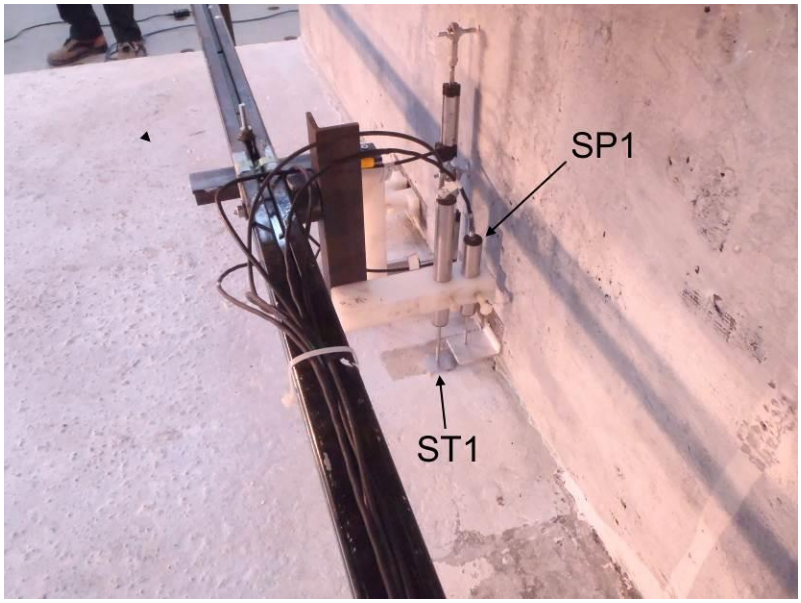


Figure 5.33 Capteurs installés à l’avant du parapet visible par la droite

La Figure 5.34 présente les autres capteurs installés au même endroit, visibles par l’autre côté du spécimen. Les capteurs *OP1* et *OP2* ont été installés directement à la surface avant du parapet à l’aide de plots en acier. La plage de mesure du capteur *OP1* était de 25 à 125mm au-dessus du trottoir, tandis que le capteur *OP2* était de 125 à 225 mm. Ces capteurs permettaient l’évaluation de l’ouverture des fissures à la base du parapet. Pour sa part, le capteur *GP1* a été installé sur la barre de support et mesurait le déplacement horizontal de la surface de réparation du parapet. Finalement, le capteur *DR1* servait à évaluer le décollement de la couche de réparation par rapport au substrat. Afin d’y parvenir, un trou a été perforé au niveau de la réparation jusqu'au substrat. Le capteur a été ancré sur la surface de la réparation et mesure les déplacements au fond du trou. Un disque en aluminium a été collé au fond du trou afin d’assurer une lecture adéquate.

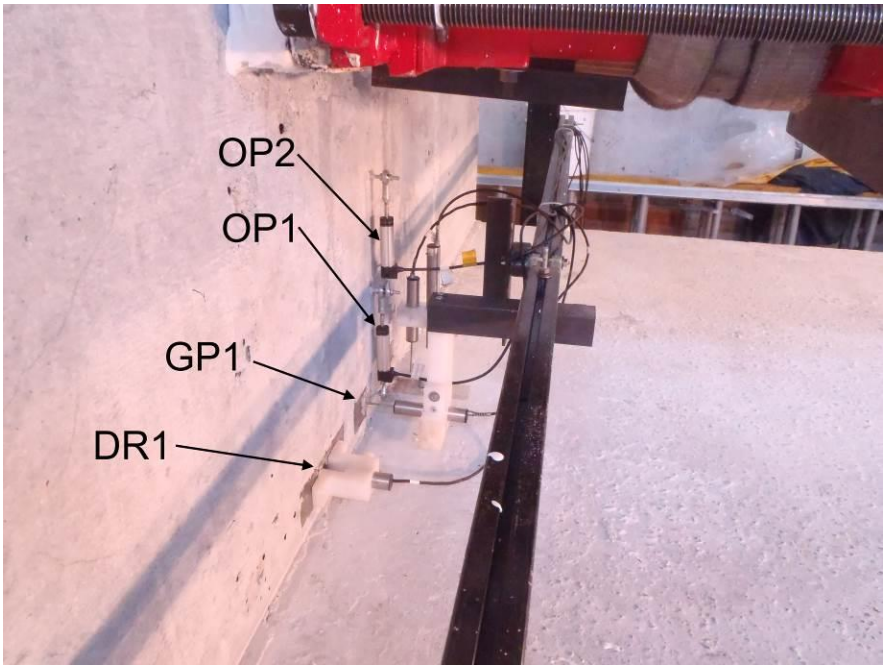


Figure 5.34 Capteurs installés devant le parapet visible par la gauche

La Figure 5.35 illustre les capteurs installés à l'arrière du parapet. Le capteur *OP3* a été installé horizontalement sur la surface arrière du parapet. Ce capteur permettait l'évaluation de l'ouverture des fissures verticales sur une largeur de 500 mm.

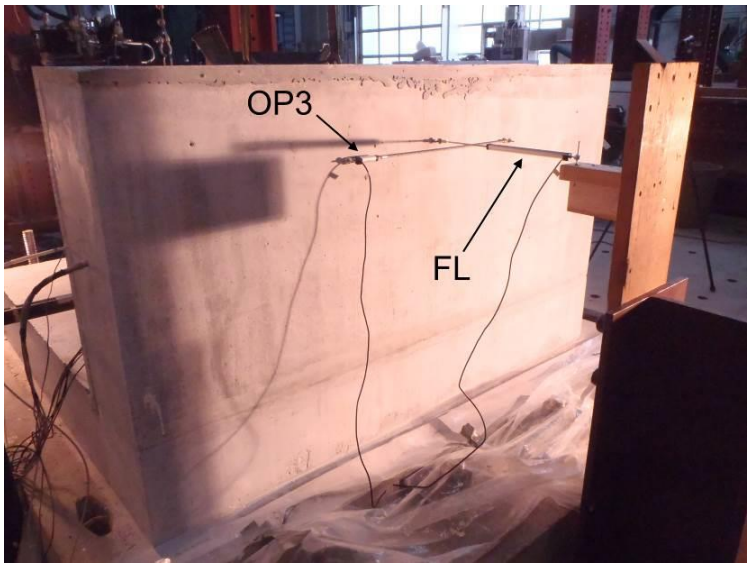


Figure 5.35 Capteurs installés à l'arrière du parapet

Le capteur *FL* a permis quant à lui la mesure de la flèche horizontale du parapet. Le capteur a été installé à la même position verticalement et horizontalement que le vérin appuyé sur la face avant du parapet.

La Figure 5.36 présente le dernier capteur installé en surface, soit au niveau des ancrages dans la dalle. Le capteur *GT1* a permis l'évaluation du glissement horizontal du trottoir par rapport à la dalle du laboratoire.

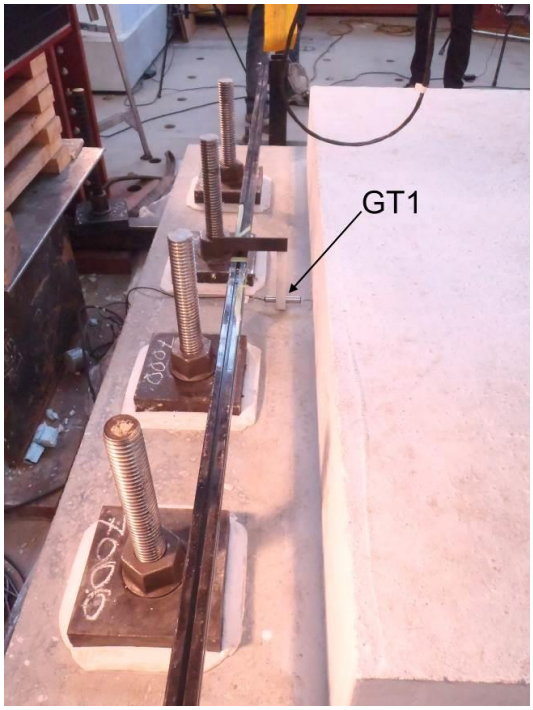


Figure 5.36 Capteur installé devant le trottoir

Finalement, les jauges installées au niveau des armatures dans le trottoir et dans le parapet, *JT1* et *JP1* respectivement, ont servi à quantifier les déformations dans certaines armatures et ainsi identifier le moment où celles-ci atteignent la plastification, soit la résistance élastique du parapet. La position des jauges est présentée à la Figure 5.37.

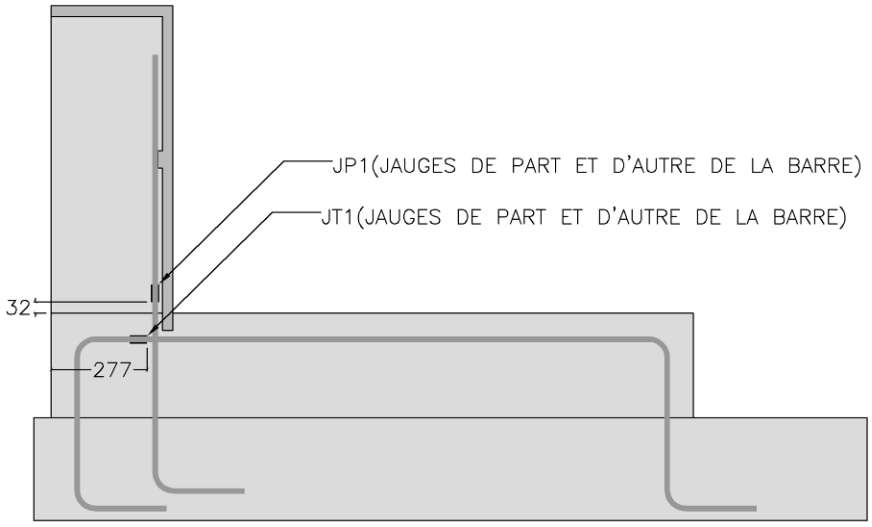


Figure 5.37 Position des jauges installées sur les armatures

L'ensemble des capteurs présentés au Tableau 5.5 ainsi que leur position sur le parapet est identique à ceux du projet d'Amadou Thiaw, afin de pouvoir comparer adéquatement les résultats du parapet de référence réalisés dans le cadre de son projet. Certains des capteurs utilisés dans le projet d'Amadou ont été retirés, car les mesures effectuées étaient non significatives. Cela a permis, entre autres, de retirer un cadre d'instrumentation situé au centre du trottoir.

En ce qui a trait à la procédure de chargement, la force appliquée par le vérin hydraulique a été contrôlée en déplacement. Au début des essais, la vitesse de déplacement du vérin était fixée à 0.05 mm par seconde. Lorsque la plastification des armatures a été atteinte, la vitesse a été augmentée à 0.075 mm par seconde. De plus, des pauses de chargement à chaque 50 kN ont été réalisées afin de tracer les fissures qui se sont développées. Les essais ont été arrêtés lorsqu'un risque d'éclatement du béton en compression à l'arrière du parapet a été observé.

Afin de valider le comportement à l'interface de la réparation et du substrat, un carottage des parapets a été effectué. Le carottier a été installé sur la surface avant du parapet afin d'éviter un éclatement de la réparation. L'appareil a été installé au centre et le plus bas possible. Un seul échantillon a été prélevé par parapet. Le trou et la carotte a été inspecté afin de prélever les fissures dans la masse de béton et l'interface a simplement été inspecté visuellement.

5.5.3 Résultats et analyse des essais mécanique sur parapets

Dans cette section, l'analyse des résultats des essais mécaniques sur les deux parapets testés en laboratoire est présentée. Les résultats sont aussi comparés à un parapet de référence sans réparation étudié par Thiaw (2014). En premier lieu, la discussion portera sur les résultats obtenus à l'aide des différents capteurs installés en surface. Deuxièmement, les patrons de fissuration extérieurs observés sur les parapets seront discutés. Finalement, un carottage effectué en fin d'essai perpendiculairement à la surface avant du parapet est analysé.

5.5.3.1 Comportement mécanique

La Figure 5.38 présente la force appliquée sur le parapet en fonction de la flèche horizontale du parapet pour les 2 spécimens étudiés et la référence testée par Thiaw (2014). Tout d'abord, il est possible d'observer un comportement linéaire élastique équivalent pour les trois spécimens pour une force appliquée inférieure à 100 KN. Après ce point, le parapet de référence possède une rigidité moindre. Cela est dû au fait que le béton du parapet ne possédait pas d'encoche dans le trottoir, il y a donc plus rapidement eu un décollement entre le béton du parapet et du trottoir. Dans les cas des deux spécimens réparés, l'encoche a permis un comportement élastique amélioré. Au niveau des deux réparations, un comportement linéaire similaire a été observé jusqu'à une force d'environ 200 kN. Par la suite, le comportement du parapet réparé en BHP tend vers un comportement similaire au parapet de référence. Par contre, le parapet réparé en BFUP présente un déplacement nettement inférieur aux deux autres parapets pour une force identique.

Finalement, les petites chutes de résistance observées au cours des essais ont été causées par les pauses de chargement réalisées pour le traçage des fissures. L'essai étant contrôlé en déplacement, la réduction de résistance est reliée à la relaxation des contraintes dans les spécimens. La relaxation ne semble pas avoir eu d'effet sur le comportement général, car le comportement est similaire avant et après la chute de résistance.

Tel que discuté à la section 5.2.1, la force de conception pondérée à l'état limite ultime est de 227 kN. La Figure 5.38 démontre que le parapet de référence ainsi que les parapets réparés surpassent aisément ce niveau de résistance.

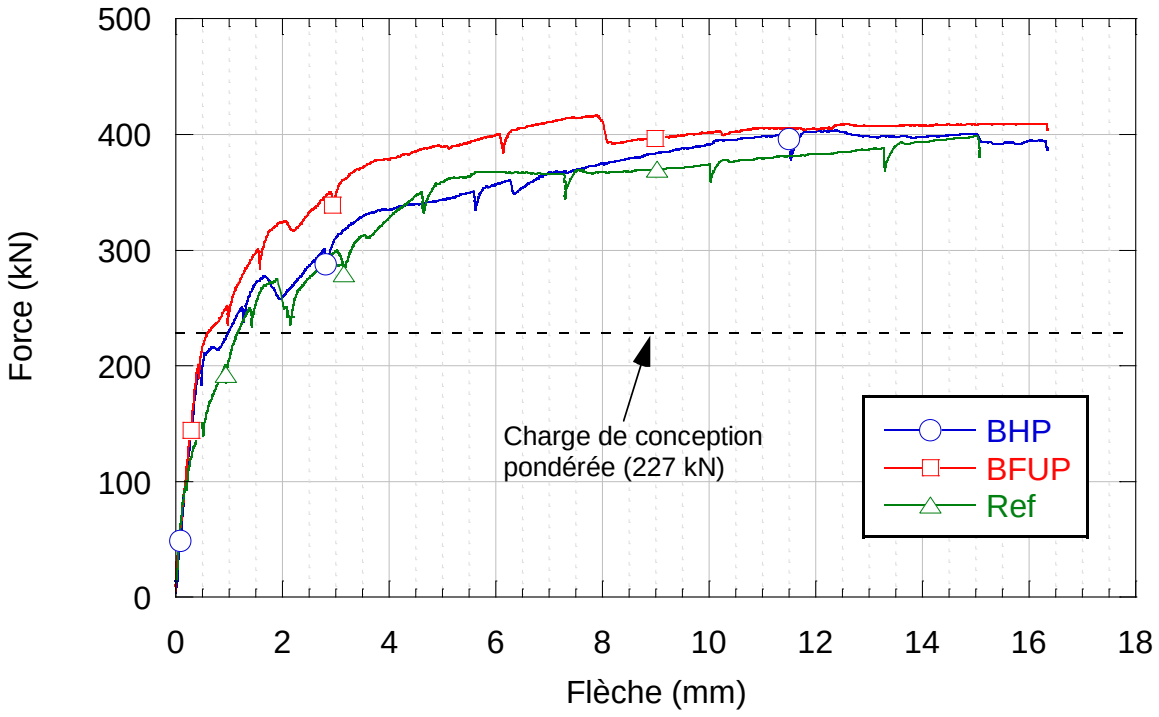


Figure 5.38 Force appliquée sur les parapets en fonction de la flèche horizontale

La Figure 5.39 présente la force appliquée sur le parapet en fonction de la déformation mesurée dans les armatures au niveau du trottoir et du parapet à l'aide des jauges (Figure 5.37). Il est possible de constater que la déformation dans la barre d'armature pour le parapet de référence se démarque très tôt des autres. Cela est dû au fait que le béton du parapet de référence ne possédait pas d'encoche dans le trottoir. En conséquence, ceci sollicite davantage les armatures du parapet pour la reprise des efforts. Ainsi, les déformations dans les armatures du parapet et du trottoir ont été considérablement réduites pour une même force dans les deux spécimens réparés en comparaison au parapet de référence. Par contre, après la fissuration de l'encoche en béton, à environ 200 kN, les armatures reprenaient seules les contraintes, leur déformation a augmenté très rapidement. Dans le cas du parapet réparé en BHP, la déformation de l'armature dans le parapet tend vers celle du parapet de référence jusqu'à atteindre la plastification. Pour ce qui est des autres armatures, aucune plastification nette n'a été observée dans les jauges. Cependant, il est probable que la plastification ait eu lieu à proximité puisque le comportement global démontre que la plastification des armatures a été atteinte. De manière générale, les déformations observées dans les armatures du parapet réparé en BFUP ont été inférieures à celles du parapet réparé en BHP.

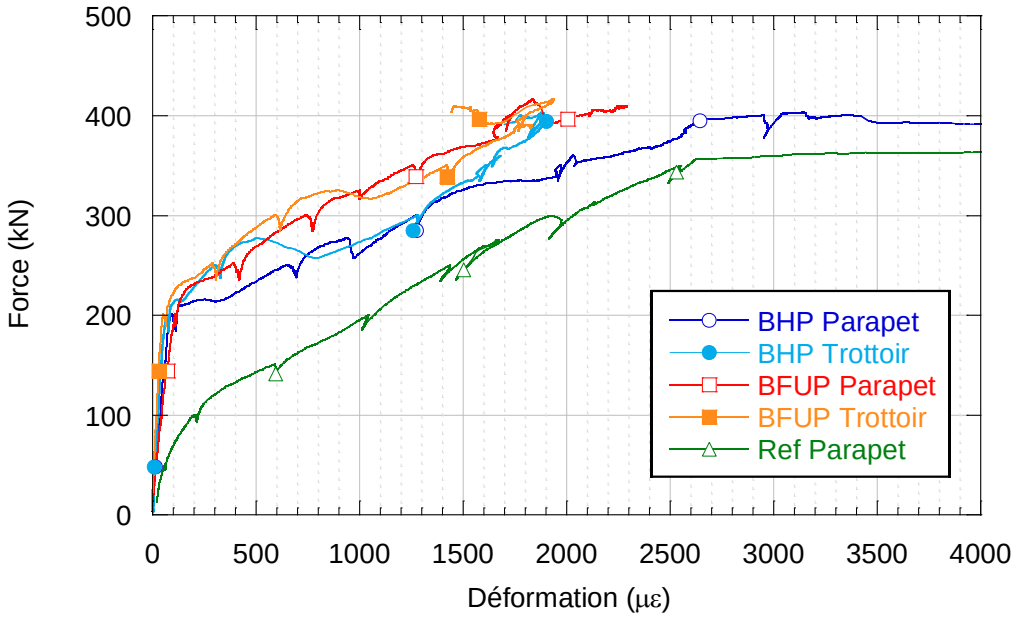


Figure 5.39 Force appliquée sur le parapet en fonction de la déformation moyenne mesurée dans les armatures

La Figure 5.40 illustre le soulèvement avant du parapet par rapport au trottoir. Les tendances observées sont très similaires à celles de la Figure 5.38 présentant la force appliquée en fonction de la flèche horizontale. Ceci est normal puisque le décollement du parapet mène directement à une augmentation de la flèche. Outre cela, il est possible d'observer que le parapet de référence se soulève presque immédiatement par rapport au trottoir en comparaison aux parapets réparés. Au niveau des parapets réparés, il est possible de confirmer que l'apport mécanique de l'encoche de béton disparait progressivement à partir d'une charge de 200kN. Par contre, la présence de fibre dans le BFUP et dans l'encoche permet donc de réduire le soulèvement et la flèche totale dans le parapet.

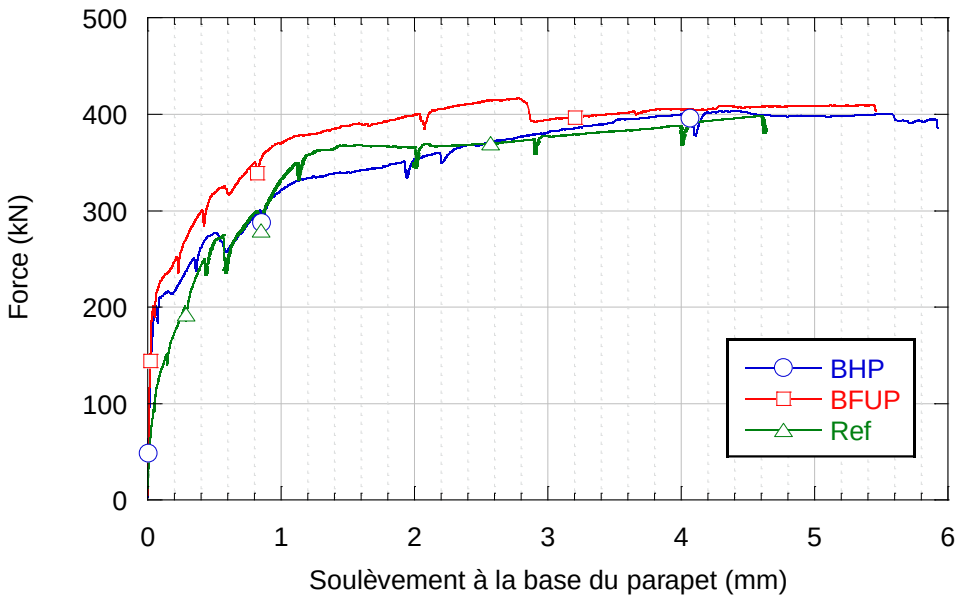


Figure 5.40 Force appliquée en fonction du soulèvement à la base du parapet

5.5.3.2 Ouverture des fissures

La Figure 5.41 présente la force appliquée en fonction du comportement de l'interface de réparation tel que mesurée par le capteur *DR1*. Une valeur positive représente un allongement du capteur, donc un décollement de la réparation par rapport au parapet. Tout d'abord, il est possible d'observer un comportement similaire entre les deux courbes pour une force appliquée inférieure à 200 KN. Au-delà de ce point, le comportement des capteurs varie. Dans le cas de la réparation en BFUP, un écrasement de l'interface a été observé pour la majeure partie des essais. Par contre, la réparation en BHP présente un relâchement après 200 kN et un écrasement avant d'atteindre le plateau plastique. Cette différence de comportement est probablement attribuable au développement d'un réseau de fissures à proximité du capteur. L'écrasement dans les deux cas, ainsi que les très faibles valeurs de déplacement mesurées permettent d'affirmer qu'il n'y a probablement eu aucun décollement des réparations par rapport aux parapets. L'analyse des carottes permettra la validation de cette observation.

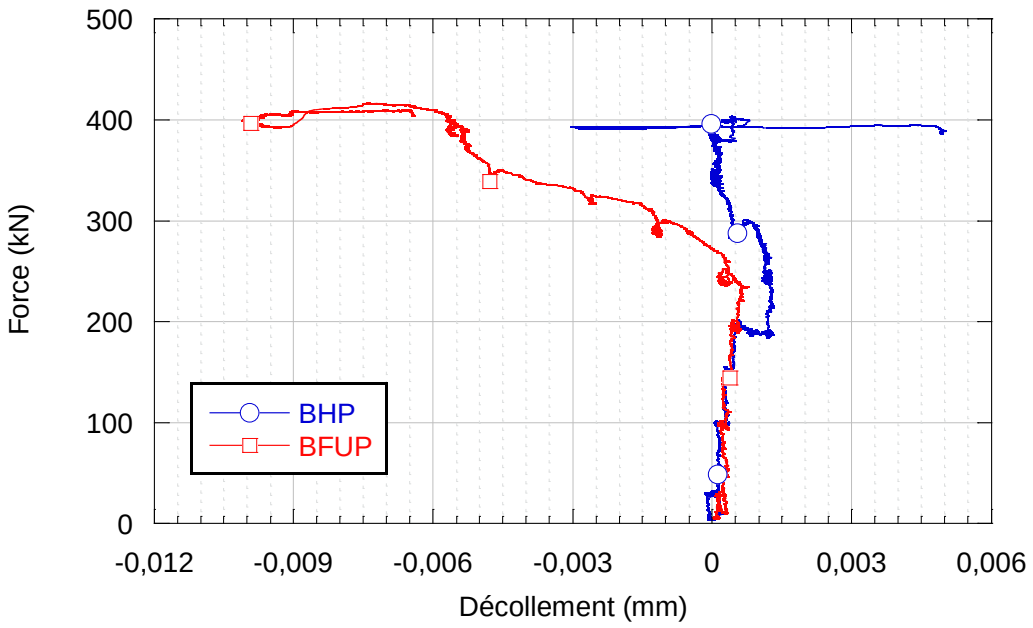


Figure 5.41 Force appliquée sur le parapet en fonction du décollement de la réparation

La Figure 5.42 présente l'ouverture des fissures à la base du parapet tel que mesurée par les capteurs *OP1* et *OP2*. Il est possible d'observer que l'ouverture des fissures à la base du parapet est très variable. Dans le cas du parapet de référence, une fissure s'était développée dans la zone située entre 150 et 225 mm au-dessus du trottoir pour une force supérieure à 300 kN. Dans le cas du parapet réparé en BHP, aucune ouverture de fissure n'a été mesurée par les capteurs. La fissure s'est développée sous les deux capteurs à la base du parapet. Cela a probablement été causé par la surface non plane engendrée par le bombement du coffrage lors de la coulée de la réparation. Par conséquent, cette fissure n'a pas pu être mesurée. Finalement, dans le cas du parapet réparé en BFUP, une ouverture de fissure a été observée à la jonction des capteurs *OP1* et *OP2*, à leur points de fixation commun. Le plot de fixation a probablement décollé, car dans le capteur *OP2*, une ouverture de fissure est mesurée, alors que le résultat inverse est obtenu pour le capteur *OP1*. Ceci dit, pour le chargement en service de 170 kN prévu dans le Code des ponts (CSA-S6-14), les ouvertures de fissures sont inférieure à la limite de 0.25 permise.

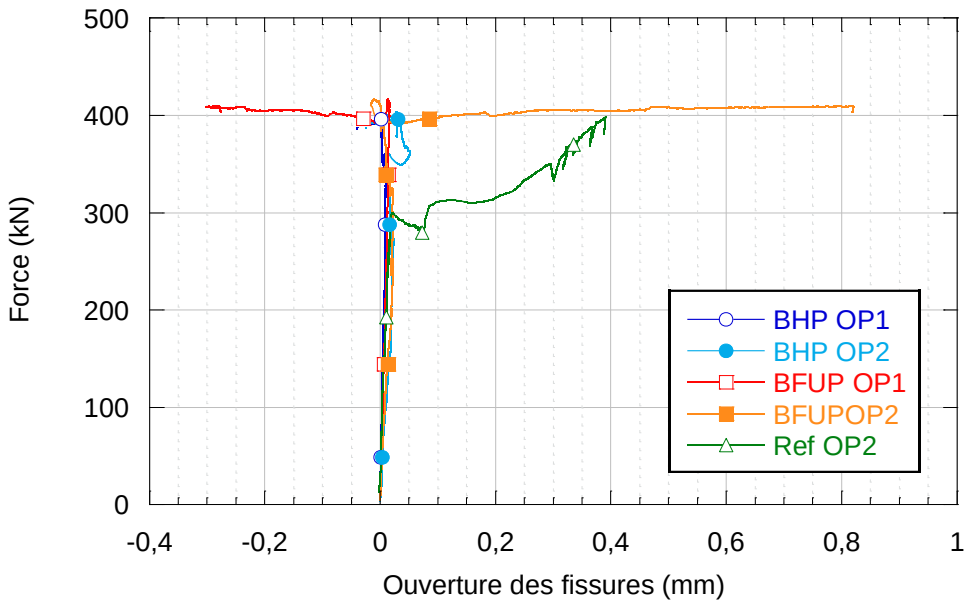


Figure 5.42 Force appliquée en fonction de l'ouverture des fissures sur la surface avant du parapet

Finalement, la Figure 5.43 présente l'ouverture totale des fissures verticales à l'arrière du parapet mesurée par le capteur *OP3*.

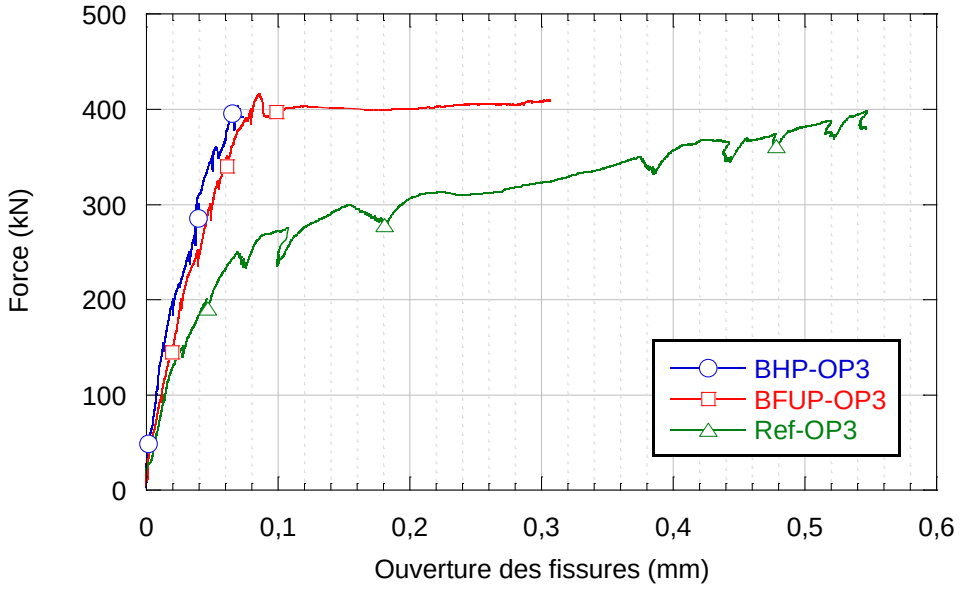
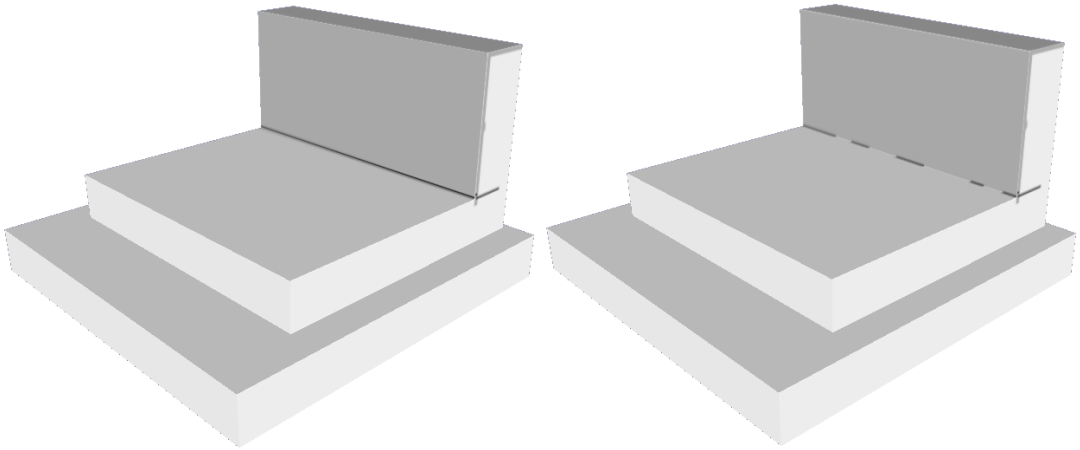


Figure 5.43 Force appliquée en fonction de l'ouverture des fissures verticales à l'arrière du parapet

Dans le cas du parapet de référence, il a été possible d'observer une ouverture totale de fissures beaucoup plus importante par rapport aux parapets réparés. Cela est probablement attribuable au fait que la réparation est aussi présente sur le dessus du parapet et réduit probablement la flexion responsable de la fissuration verticale à l'arrière du parapet.

5.5.3.3 Patrons de fissuration

La Figure 5.44 présente le patron de fissuration pour les parapets réparés en BHP et en BFUP respectivement pour une force appliquée de 250 kN. Les schémas illustrent le début de la fissuration dans chacun des parapets. La fissuration a été notée pour la première fois au palier de 200 KN dans le cas du parapet réparé en BHP et à 250 KN dans le cas du parapet réparé en BFUP. Dans les deux cas, il est possible d'observer que la fissure s'initie à la base du parapet à la jonction avec le trottoir. À partir de ce moment, l'encoche de béton du parapet est fissurée dans le trottoir. De plus, la flexion dans l'axe longitudinal du parapet conduit à un décollement entre le parapet et le trottoir (face avant).

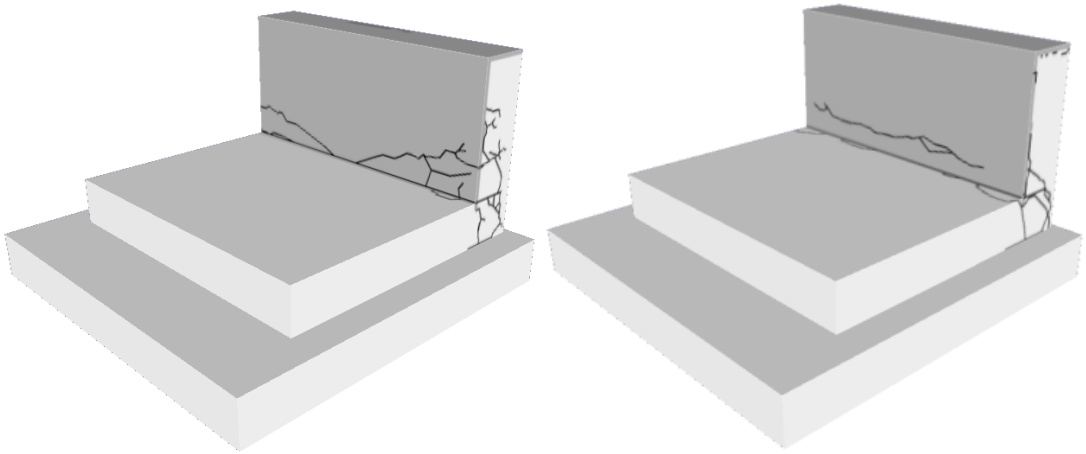


a) Parapet réparé en BHP b) Parapet réparé en BFUP

Figure 5.44 Patron de fissuration dans les parapets réparés pour une force appliquée de 250 kN

La Figure 5.45 présente le patron de fissuration dans les parapets après l'arrêt du chargement final pour les parapets réparés en BHP et en BFUP respectivement. Tout d'abord, une fissure verticale

dans le trottoir (sous le parapet à la jonction avec la face avant du parapet où se situe l'encoche) est apparue à 300 KN et à 350 KN dans les parapets en BHP et en BFUP respectivement. Par ailleurs, une fissure a été observée à environ 200 mm au-dessus du trottoir. Cette fissure s'est développée lors de la plastification des armatures d'ancrage du parapet à une force de 400 kN et est cohérente avec la fissure observée au niveau du parapet de référence effectué par Amadou Thiaw (2014). Pour le parapet réparé en BHP, cette fissure rejoint le bas du parapet au centre. Cela est probablement causé par le bombement de la surface avant de la réparation lors de la coulée. De fines fissures ont aussi été notées entre le trottoir et la dalle sous le parapet en fin d'essai. La fissuration verticale au centre de la face arrière des parapets (non-visible sur les schémas) s'est développée tranquillement tout le long des essais.



a) Parapet réparé en BHP b) Parapet réparé en BFUP

Figure 5.45 Patron de fissuration dans les parapets réparés à l'arrêt des essais mécaniques

5.5.3.4 Adhérence de la réparation

Un carottage a été effectué dans chaque parapet testé. La carotte a été prélevée au point le plus bas possible pour l'équipement de forage en plein centre de la face avant du parapet. La Figure 5.46 illustre les deux carottes.

a) Parapet réparé en BHP b) Parapet réparé en BFUP

Figure 5.46 Carottes de béton prélevées dans le bas des parapets

Pour les deux parapets, le béton de réparation est solidement fixé au substrat et aucune fissuration au niveau de l'interface n'a été observée. Cela vient ainsi confirmer la bonne l'adhérence du BHP et du BFUP sur le substrat ainsi que l'efficacité de la préparation de surface. Les carottes ont été extraites en plusieurs morceaux du carottier, ce qui correspond aux fissures dans la masse du béton observées a même les trous de forage, tel qu'illustré à la Figure 5.47. Ainsi les fissures dans les carottes n'ont pas été causées par le processus d'extraction, mais bien par l'application de la charge lors des essais mécaniques.

Figure 5.47 Fissurations dans le trou de forage de la carotte prélevé dans le parapet réparé en BHP

5.6 Conclusions

Le programme d'essais principaux avait pour objectif d'évaluer le comportement déformationnel de parapets réparés en condition de retrait restreint ainsi que d'évaluer le comportement mécanique sous un chargement transversal. Pour ce faire, des sections de parapet ont été fabriquées, instrumentées et testées en laboratoire afin d'évaluer et d'analyser leur comportement.

En ce qui a trait à l'évaluation du retrait restreint, les déformations dans la couche de réparation et dans le centre du parapet ont été analysées. Le résultat de la caractérisation des bétons ainsi que le comportement déformationnel mesuré avec les capteurs pendant une période de 2 mois sera utilisée lors de la calibration des modèles par élément fini à la section 6.2.

Au niveau de l'analyse du comportement mécanique, les parapets fabriqués ont été chargés jusqu'à la rupture afin d'évaluer leur résistance mécanique. Pour évaluer adéquatement l'impact de la réparation sur le parapet, les résultats ont été comparés à un parapet de référence non réparé étudié

dans le cadre du projet d'Amadou Thiaw (2014). Pour ce faire, les dimensions de parapets sont identiques à celles du parapet de référence.

5.6.1 Essais de retrait restreint sur parapets

Les constatations suivantes découlent de l'évaluation de comportement déformationnel du parapet en condition de retrait restreint suite à l'application de la réparation :

- Les effets thermiques dus à l'hydratation du béton, le retrait endogène et l'application de la cure (apport d'eau et refroidissement associé) sont les principaux responsables des déformations au jeune âge (7 premiers jours). Le dégagement de chaleur dans le BFUP est au minimum 8% plus élevé que dans le BHP. Le retrait endogène du BFUP, discuté au prochain chapitre, est aussi plus élevé. Cela se traduit par des déformations légèrement plus élevées au jeune âge dans le BFUP;
- Les retraits endogène et de séchage sont les causes principales des déformations dans les spécimens à moyen terme, soit après l'application de la cure humide. Après 30 jours, la réparation en BFUP présente des déformations 11 % plus prononcées que dans la réparation en BHP;
- La cure humide avec écoulement d'eau pendant 7 jours a permis d'empêcher complètement le développement de fissures dans le parapet en réparé BHP, contrairement aux essais préliminaires où aucune cure n'a été réalisée. La cure humide utilisée est donc primordiale dans la durabilité à long terme de l'application d'une réparation en BHP;
- Des microfissures d'une ouverture inférieure à 0.05 mm ont été observées dans le parapet réparé en BFUP après 30 jours. Charron et al. (2008) ont démontré que les microfissures apparaissant sur le plateau d'écrouissage du BFUP ont un impact négligeable sur la perméabilité et donc la durabilité de la structure. En revanche, leur apparition indique qu'il serait conseillé d'utiliser un adjuvant réducteur de retrait lors de la réalisation de réparation mince.

Les deux bétons de réparation étudiés ont présenté un bon comportement en retrait restreint. Cependant, ces essais ne tiennent pas compte des effets du changement de température saisonnier observé sur les structures. Cet aspect sera analysé à l'aide de modélisation au Chapitre 6.

5.6.2 Essais mécaniques sur parapet

Les essais mécaniques sur les spécimens réparés en BFUP et en BHP ont menés aux observations suivantes :

- Le béton de réparation s'insérant jusque dans le trottoir (encoche) a permis de doubler la force requise pour générer la première fissure (condition de service) dans les parapets réparés par rapport au parapet de référence. Par contre, l'encoche n'a pas eu d'impact sur le comportement mécanique en condition ultime suite à la fissure initiale;
- Le comportement du parapet réparé en BHP est similaire à celui du parapet de référence. De son côté, le parapet réparé en BFUP démontre une résistance améliorée et une réduction d'environ 50% de la flèche en condition fissurée;
- Le réseau de fissures est moins important et plus localisé dans le parapet réparé en BFUP. De plus, celui-ci affiche des ouvertures de fissures généralement inférieures par rapport au parapet réparé en BHP et à la référence. De plus, la fissuration survient plus tard dans les essais du parapet réparé en BFUP par rapport aux autres;
- Les parapets réparés en BHP et en BFUP ont surpassé largement la force de conception à atteindre en condition ultime, soit de 78 % et de 84 % respectivement. À titre comparatif, le parapet de référence a surpassé la force de conception de 76 %.
- La préparation de l'interface de réparation choisie dans le projet a permis d'obtenir une adhérence adéquate entre les réparations et le substrat. Aucune délamination n'a été observée au niveau de l'interface lors des essais et dans les carottes prélevées.

Puisque le comportement mécanique des parapets réparés est supérieur ou identique au parapet de référence, il est raisonnable de penser que les parapets réparés en BHP et en BFUP devraient aussi bien performer que le parapet de référence sous des chargements d'impacts de véhicule. Le parapet réparé en BFUP se démarque de celui réparé en BHP par son comportement amélioré en condition ultime. De plus, les indices de durabilité du BFUP étant largement inférieurs à ceux du BHP (Tableau 2.3 et Tableau 2.4), il est attendu que le parapet en BFUP présentera une durabilité prolongée par rapport à celui réparé en BHP.

CHAPITRE 6 ÉTUDE NUMÉRIQUE

Le programme expérimental principal a permis la caractérisation des différents bétons utilisés dans la fabrication des parapets, l'évaluation des déformations de réparations en BHP et en BFUP en condition de retrait restreint, et l'évaluation de la résistance mécanique de parapets avec réparations. L'objectif général de l'étude numérique est de reproduire le comportement déformationnel des parapets réparés mesuré en laboratoire et d'en élargir la portée.

L'étude numérique a ainsi pour objectifs spécifiques :

- La reproduction des essais de caractérisation en laboratoire associés au comportement déformationnel des bétons (déformation non couplées);
- La reproduction des essais de retrait restreint sur parapets réparés (déformations couplées);
- L'évaluation par une étude paramétrique des changements thermiques saisonniers et journaliers sur les déformations et la fissuration de parapets réparés.

Les analyses numériques sont réalisées sur le logiciel DIANA de la compagnie TNO. Le logiciel offre un large éventail de modules permettant les calculs thermiques, mécaniques et hydriques ainsi qu'une grande souplesse quant à leur paramétrisation, ce qui en fait un choix adapté pour la présente étude.

En plus des bétons de réparation étudiés en laboratoire, soit un BHP et un BFUP, deux nouveaux matériaux seront considérés pour l'étude paramétrique ultérieure, soit un béton ordinaire (BO) ainsi qu'un béton renforcé de fibres (BRF). Les propriétés de ces bétons supplémentaires seront présentées tout au long du chapitre et proviennent d'études antérieures effectuées au laboratoire.

Le présent chapitre est divisé en plusieurs sections. La première section traite de la modélisation de la chaleur d'hydratation, du retrait, du fluage et du comportement en traction des bétons. Pour chacune de ces caractéristiques, les résultats expérimentaux sont présentés et ensuite leur modélisation. La seconde section décrit la modélisation du comportement en retrait restreint des parapets réparés. Finalement, la troisième section décrit l'étude paramétrique évaluant l'impact de la variation thermique saisonnière et journalière sur le comportement déformationnel des parapets réparés.

6.1 Modélisation du comportement déformationnel des bétons

La présente section traite de la modélisation de la chaleur d'hydratation, du retrait, du fluage et du comportement en traction des bétons. Différents modèles ont été créés pour calibrer et valider chaque phénomène indépendamment avant leur intégration dans le modèle du parapet réparé décrit à la section suivante.

Pour chaque phénomène, la caractérisation au laboratoire est décrite en premier lieu. En second lieu, le modèle d'élément fini est présenté. Finalement, les résultats en laboratoire et les simulations numériques sont comparés.

6.1.1 Bétons étudiés

Tel que discuté précédemment, un BO et un BRF seront évalués conjointement au BHP et au BFUP étudiés jusqu'ici afin de tracer un portrait général du comportement en retrait restreint d'une réparation mince. Cela permet de mieux quantifier les avantages d'un béton par rapport à un autre. Le Tableau 6.1 et le Tableau 6.2 présentent la composition et les propriétés mécaniques des différents bétons considérés dans l'étude numérique. Les caractéristiques du BHP et du BFUP ont été mesurées dans le présent projet, tandis que celles du BO et du BRF viennent respectivement des travaux de maîtrise de Bastien-Masse (2010) et de Beaurivage (2009). Les données non mesurées du BRF dans le mémoire de Beaurivage ont été combinées à celles mesurées dans le cadre du cours CIV1140 sur le même béton.

Tableau 6.1 Propriétés mécaniques des bétons étudiés

Propriétés	**Type de béton**			
	BO[1]	**BHP**	**BRF[2]**	**BFUP**
f_c 7 jours (MPa)	22	46.9	-	98.2
f_c 28 jours (MPa)	30	72.1	46.9	131.4
E_c 7 jours (MPa)	27000	33285	-	31532
E_c 28 jours (MPa)	30000	37120	30151	34433
ν 7 jours	0.13	0.199	-	0.219
ν 28 jours	0.2	0.22	0.219	0.195
f_t 28 jours (MPa)	2.0	3.6	2.5	10.4

[1]:MSc Bastien Masse Bastien-Masse (2010)

[2]:MSc Beaurivage (2009) et Charron et al. (2009)

Tableau 6.2 Composition des bétons étudiés

Constituants	**Quantités (kg/m^3)**			
	BO[1]	**BHP**	**BRF[2.3]**	**BFUP[4]**
Ciment	276	364	550	1004
Fumé de silice	24	36	-	251
Superplastifiant	2.5	16.8	7.3	60.0
Sable	875	1005	807	602
Roche	980	837	673	0
Fibres	-	-	80	312
Eau	184	151.6	232	251
Masse volumique (kg/m^3)	2480	2410	2400	2490
E/C	0.68	0.42	0.44	0.25
S/C	3.17	2.51	1.47	0.48
S/G	0.89	1.2	1.2	-
Fibres %	-	-	1	4

[1]:MSc Bastien-Masse (2010)

[2]:MSc Beaurivage (2009) et Charron et al. (2009)

[3]:Fibres métalliques de 35mm avec crochets

[4]:Fibres métalliques droites de 10mm

6.1.2 Chaleur d'hydratation

6.1.2.1 Caractérisation en laboratoire

Afin de caractériser le dégagement de la chaleur dû à l'hydratation du béton, un essai semi-adiabatique a été réalisé en laboratoire pour les bétons de réparation utilisés.

L'essai consiste à mesurer le dégagement de chaleur au cœur d'un cylindre de béton installé dans un calorimètre semi-adiabatique. La courbe de chaleur obtenue est dite semi-adiabatique, soit avec une perte de chaleur provenant de l'isolation imparfaite du calorimètre. À partir d'un système d'équations par différences finies, considérant les caractéristiques du béton et du calorimètre ainsi qu'un modèle d'hydratation basé sur la loi d'Arrhénius il est possible d'obtenir la courbe adiabatique du béton, soit sans perte thermique. La courbe adiabatique à l'avantage d'être universelle, c'est-à-dire qu'elle ne dépend pas de l'appareil de mesure utilisé pour la caractériser. De plus, cette courbe peut être directement utilisée dans le logiciel DIANA.

Afin de réaliser l'essai, un cylindre de béton de 150 mm de diamètre comprenant un thermocouple coulé en plein centre est préparé pour le béton le étudié. Tout juste après sa fabrication, le cylindre de béton est placé dans le calorimètre. Le calorimètre consiste en un grand cylindre en plastique muni d'une épaisse gaine isolante à l'intérieur et d'un espace central pour l'installation du cylindre en béton (Figure 6.1). La température au cœur du cylindre de béton ainsi que la température ambiante sont prélevées à intervalles réguliers jusqu'à ce que la température dans le béton converge vers la température ambiante.

Figure 6.1 Calorimètre

Afin d'estimer la courbe adiabatique, certains paramètres caractéristiques des bétons ainsi que du calorimètre sont requis, soit la capacité thermique du béton (C_v), la chaleur totale dégagée (H_T) ainsi que le coefficient de perte du calorimètre (π_t). La capacité thermique du béton est calculée à partir de la composition du béton. La chaleur totale dégagée est calculée à partir de la masse totale de ciment et autre pouzzolane dans le béton. Le coefficient H_T est aussi proportionnel au degré de réaction du béton attendu. Finalement, le coefficient de perte thermique du calorimètre est obtenu avec un essai de calibration.

La Figure 6.2 présente les courbes adiabatiques obtenues pour les bétons étudiés. Tel qu'attendu, la courbe adiabatique du BFUP est nettement supérieure aux autres bétons, soit un échauffement total de 118 °C à 75 heures. Ceci représente un échauffement 3.78 fois plus élevé que le BO, dû à la plus grande quantité de ciment utilisée dans le matériau (Tableau 5.1). Pour leur part, les courbes du BHP et de BRF affichent un échauffement total de 52.7 °C et 62.1 °C respectivement après 100 heures. Il est normal que ces valeurs soient sensiblement identiques, car la matrice cimentaire pour ces deux bétons est presque identique à l'exception de l'inclusion de fibre métallique dans le BRF. Finalement, le BO atteint un échauffement de 31.2 °C à 75 heures étant donné la masse inférieure de ciment utilisée dans ce béton. Il est aussi possible de noter que la phase dormante du béton est plus longue pour le BFUP, par rapport aux autres bétons, car le fort dosage en superplastifiant retarde le démarrage de l'hydratation.

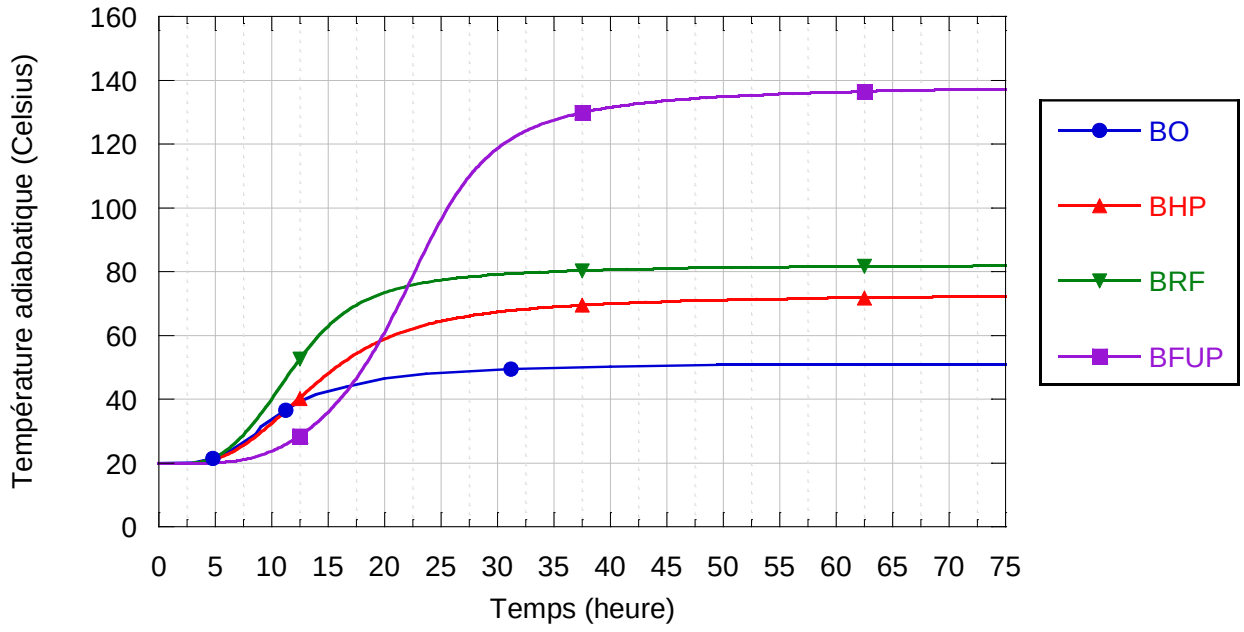


Figure 6.2 Courbes adiabatiques des bétons étudiés

6.1.2.2 Modélisation

En ce qui a trait à la modélisation de l'hydratation du béton, un modèle simplifié simulant l'essai en laboratoire a été réalisé. La Figure 6.3 suivante présente le maillage ainsi que les conditions

limites utilisées dans le modèle. Le modèle est formé entièrement d'éléments axisymétriques. Ainsi chaque élément est en fait un tore formé par la rotation de l'élément en deux dimensions autour de l'axe vertical (Y dans ce cas). Le premier élément, de couleur orange, est un élément à deux dimensions axisymétriques isoparamétrique à 8 nœuds. Chaque élément a une dimension de 15 x 15 mm et représente le béton du cylindre lui-même. Le second élément, de couleur rouge, est un élément linéaire cylindrique isoparamétrique à deux nœuds de 15 mm de long. Celui-ci est installé en périphérie pour reproduire les échanges thermiques entre le béton (orange) et l'air ambiant (rouge).

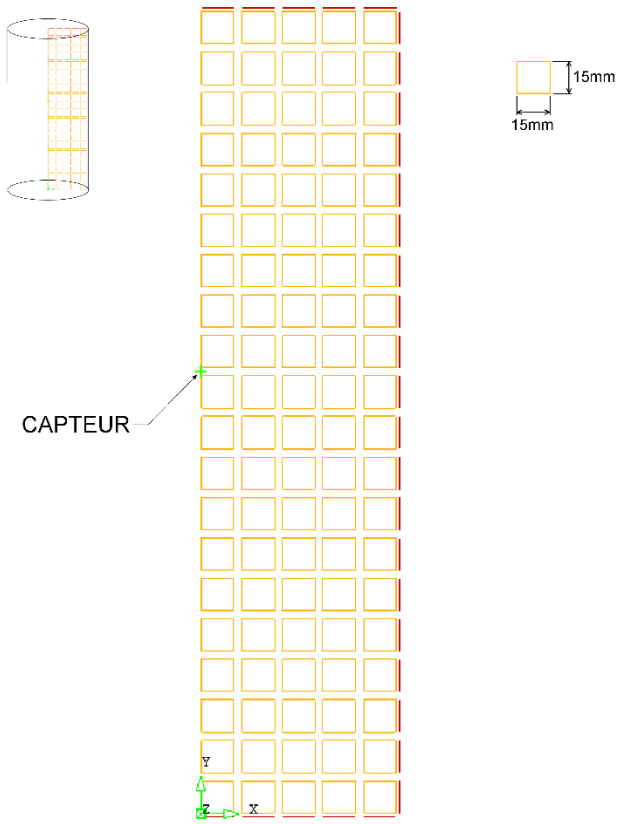


Figure 6.3 Modèle pour calibration de l'hydratation du béton

À ces éléments sont attribués des matériaux. Dans le cas des éléments en rouge, celui-ci est seulement défini par un facteur convectif, soit le coefficient de perte thermique du calorimètre en condition semi-adiabatique ou 0 en condition adiabatique. Pour le béton, la conductivité thermique

(λ_C) et la capacité thermique (C_V) sont introduites dans le modèle selon le béton étudié (Tableau 6.3). Finalement, la courbe adiabatique est introduite manuellement dans le modèle.

Tableau 6.3 Capacité et conductivité thermiques des bétons étudiés

Béton	**BO**	**BHP**	**BRF**	**BFUP**
λ_C (W/m/°K)	2	2	2	2
C_V (KJ/m^3/°K)	2600	2626	2700	2740

En ce qui a trait aux conditions de départ, une température initiale du béton ainsi qu'une température ambiante sont définies respectivement. Les valeurs sont identiques à ceux des essais en laboratoire.

Une analyse thermique non linéaire est effectuée afin de déterminer à différents intervalles de temps la température dans le cylindre de béton. Afin d'effectuer le calcul d'hydratation du béton, DIANA requiert un degré de réaction de départ non nul. Ainsi, le degré de réaction a été trouvé par la réalisation de plusieurs simulations jusqu'à ce que la courbe donnée par DIANA converge vers la courbe expérimentale. La mesure de température est effectuée ponctuellement au centre du cylindre à 165 mm par rapport au bas, tel que présenté sur la Figure 6.3 (point vert). Il s'agit de la position du thermocouple lors des essais en laboratoire.

La Figure 6.4 présente les courbes adiabatiques modélisées (*num*) ainsi que les courbes expérimentales (*exp*) à titre comparatif. Les courbes numériques sont identiques aux courbes expérimentales, ce qui vient valider le comportement thermique lié à l'hydratation du béton du modèle. Ces résultats ne sont pas surprenants, car les courbes adiabatiques expérimentales ont été directement introduites dans la définition des matériaux des modèles. Un calage presque identique a aussi été observé au niveau de la modélisation des essais semi-adiabatiques, c'est-à-dire avec une perte de chaleur dans l'environnement.

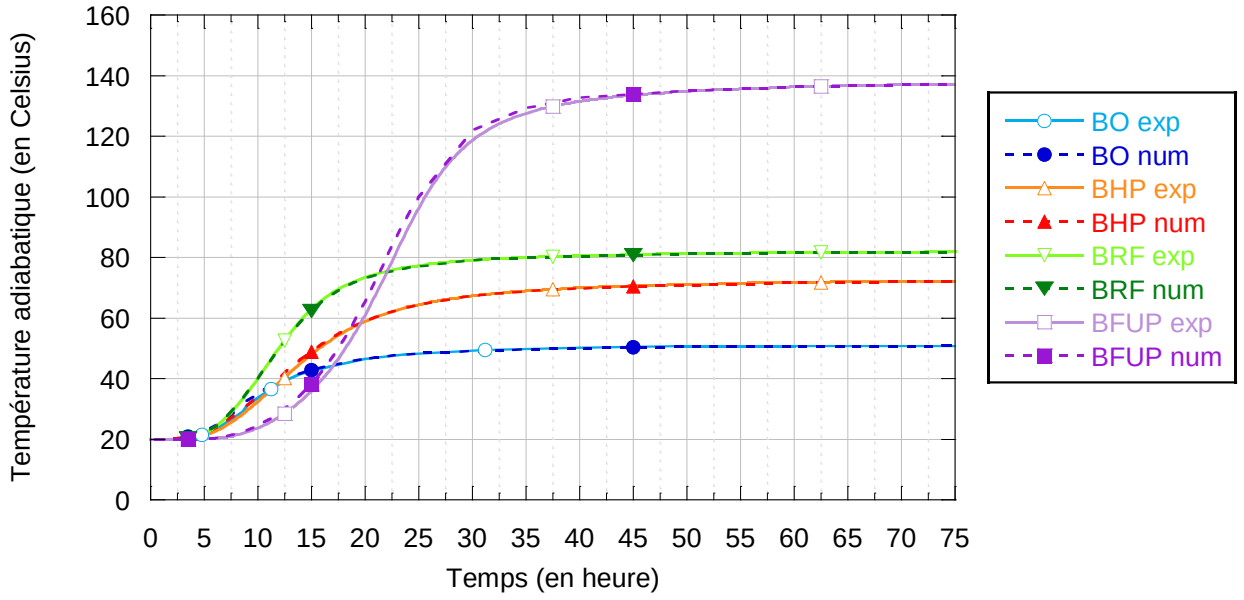


Figure 6.4 Validation de l'échauffement des bétons des modèles numériques

6.1.3 Retrait

6.1.3.1 Caractérisation en labo

Afin de quantifier le retrait des bétons étudiés, des moules en carton ont été instrumentés avant de les remplir de béton (Figure 6.5). Une jauge de déformation a été suspendue en plein centre par des fils d'acier. Une fois les cylindres coulés, ceux-ci sont transportés dans la chambre environnementale du laboratoire de structure à une température de 23±1 °C et à 50±5 % d'humidité relative. Le dessus des moules en carton est recouvert initialement d'une feuille de polyéthylène. 24 heures après la coulée, ou 48 heures dans le cas du BFUP, les cylindres ont été décoffrés et laissés à l'air libre dans le laboratoire. Ainsi, le retrait mesuré comprend le retrait endogène et de dessiccation.

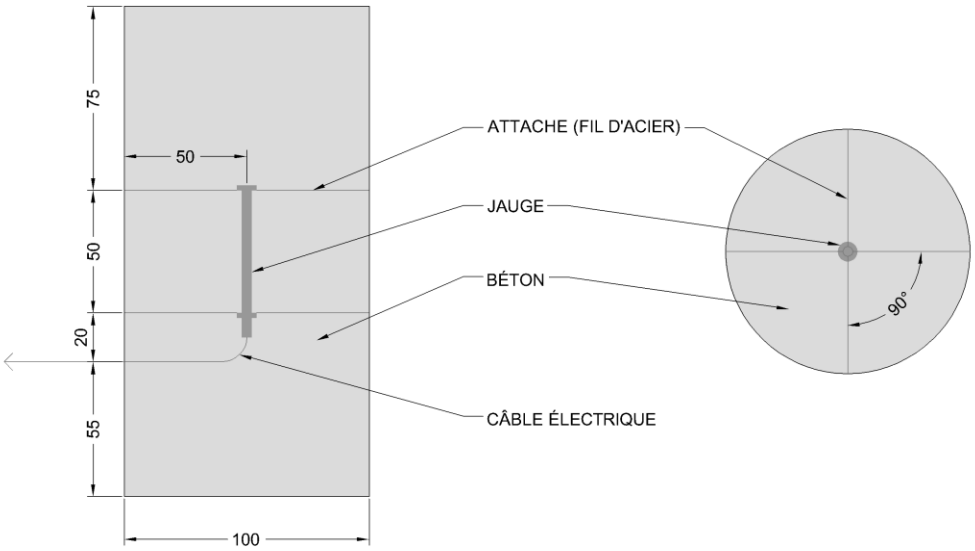


Figure 6.5 Position du capteur dans un cylindre de béton pour l'essai de retrait

Tout le long des essais, la mesure des déformations est effectuée automatiquement à chaque 15 minutes par le système d'acquisition de la chambre environnementale. Les essais se sont poursuivis pendant 200 jours.

Pour chaque type de béton, deux cylindres ont été préparés. En tout, trois bétons ont été testés dans ce projet, soit le BO du substrat (BO-sub), le BHP et le BFUP des réparations.

La Figure 6.6 présente les déformations moyennes mesurées lors des essais. Les bétons de réparation sont présentés pour une mise à zéro à 1 jour (2 jours pour le BFUP) et à 7 jours. Le béton du substrat y est présenté pour une mise à zéro à 7 jours et à 100 jours, soit le moment des essais. Les courbes de retrait ont été mises à zéro à 1 jour pour le BHP et à 2 jours pour le BFUP, afin de représenter les déformations subies par les bétons suite au démoulage. Dans ce cas, le BFUP affiche un retrait de -525 με à 28 jours et de -716 με à 200 jours, ce qui est largement supérieur au BHP avec des déformations de -331 με et de -513 με à pareille échéance.

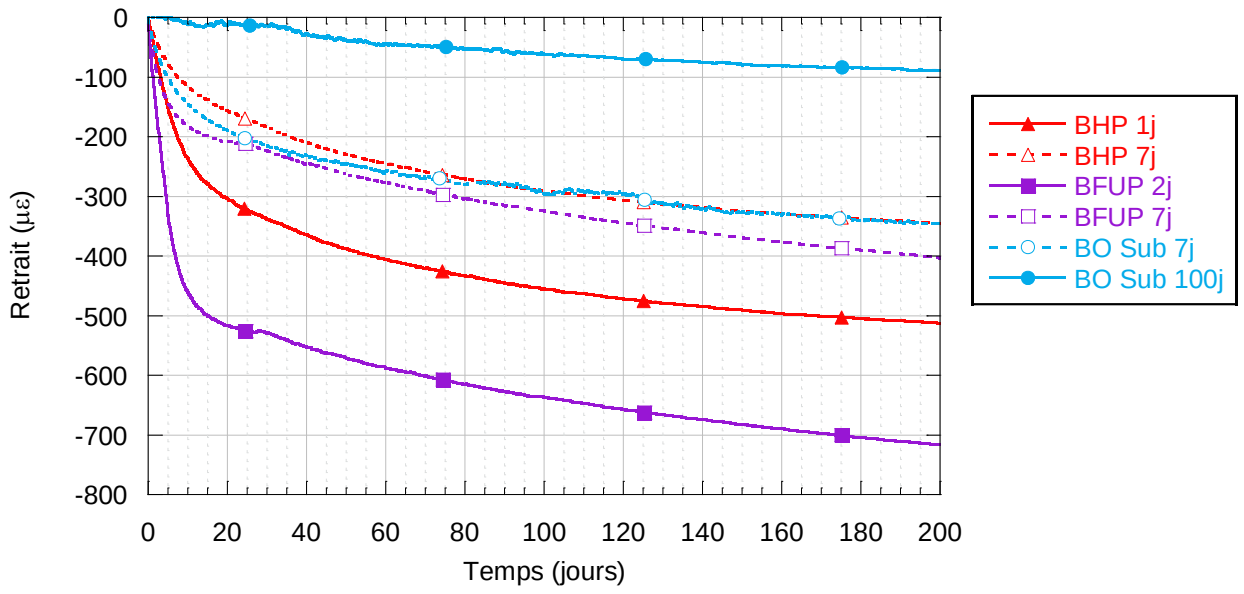


Figure 6.6 Retrait expérimental dans les bétons étudiés pour différentes mises à zéro

L'analyse des résultats démontre que le retrait total (combinant retrait endogène et retrait de séchage) augmente avec la réduction du rapport eau/liant du BO en passant par le BHP et en terminant avec le BFUP. La réduction du rapport eau/liant augmente le retrait endogène et réduit le retrait de dessiccation (Charron 2007). L'augmentation du retrait endogène est plus importante que la réduction du retrait de dessiccation pour ces bétons lorsque l'analyse du retrait est faite à partir de 7 jours.

Pour les fins de modélisation ultérieure pour les parapets, les courbes de retrait ont dû être ajustées. En effet, les résultats des essais de retrait sur cylindres de 100 mm de diamètre sont pour une cure à l'air, alors que les réparations de 30 mm des parapets ont été soumises à une cure à l'eau continue. Il s'est avéré que le retrait des réparations minces en contact continu avec l'eau a été extrêmement faible. Ainsi, pour la modélisation des réparations, les retraits du BHP et du BFUP ont été mis à zéro à 7 jours, soit à la fin de la cure à l'eau. Pour le BO représentant le béton de la dalle, du trottoir et du parapet, la courbe a été mise à zéro à 100 jours. Cette échéance correspond au moment de la mise en place de la réparation sur le parapet. La modélisation des parapets débute à ce moment. Les courbes expérimentales mises à zéro à 7 jours pour le BO, le BHP et le BFUP sont aussi présentées à la Figure 6.6.

6.1.3.2 Modélisation

DIANA offre deux options au niveau de la modélisation du retrait, soit par l'introduction d'une courbe manuellement, ou par l'utilisation de modèles réglementaires tels que le « *Model Code 1990* » (MC1990), le « *American Concrete Institue Code 209* » (ACI209) et le « *Dutch NEN 6720 code* » (NEN6720). Ces codes modélisent le retrait en fonction de différents paramètres, notamment la résistance à la compression (f'_c) et le degré d'humidité (*RH*). Après plusieurs tentatives infructueuses de modéliser le retrait du BFUP à l'aide de ces modèles, il a été décidé d'introduire les courbes de retrait manuellement dans le modèle. Les courbes introduites sont celles mises à jour à 7 jours pour le BHP et le BFUP et à 100 jours pour le BO.

Le maillage utilisé pour la calibration du retrait dans DIANA est présenté à la Figure 6.7.

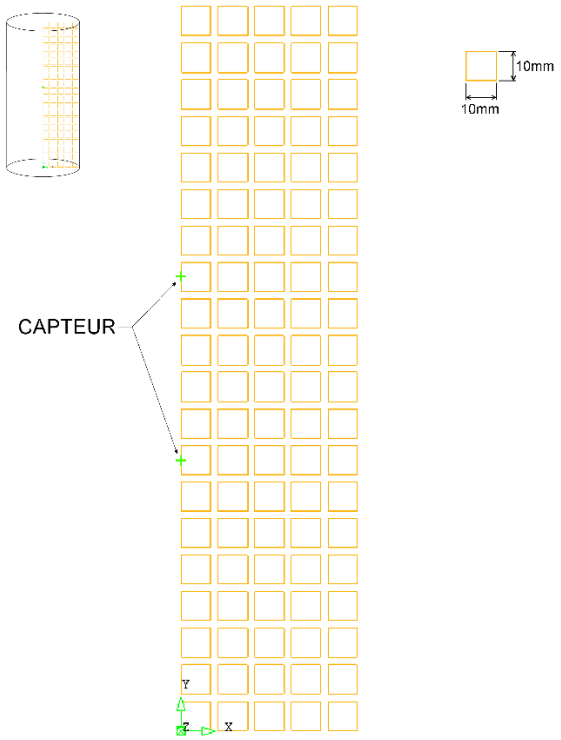


Figure 6.7 Maillage du modèle des essais de calibration du retrait

Le modèle utilise un élément isoparamétrique axisymétrique à 8 nœuds (orange), soit le même élément que pour la validation de la chaleur d'hydratation. Chaque élément a une dimension de 10

x 10 mm. Le calcul des déformations est effectué entre les deux points de mesure du maillage représentant les extrémités de la jauge en condition expérimentale.

La Figure 6.8 présente les courbes de retrait obtenues avec les modèles. Elles sont identiques aux courbes expérimentales. Les courbes de retrait du BO et du BRF sont tirées des travaux de Bastien-Masse (2010) et Beaurivage (2009) respectivement. Les résultats ont été calés à 7 jours comme tous les autres bétons de réparation.

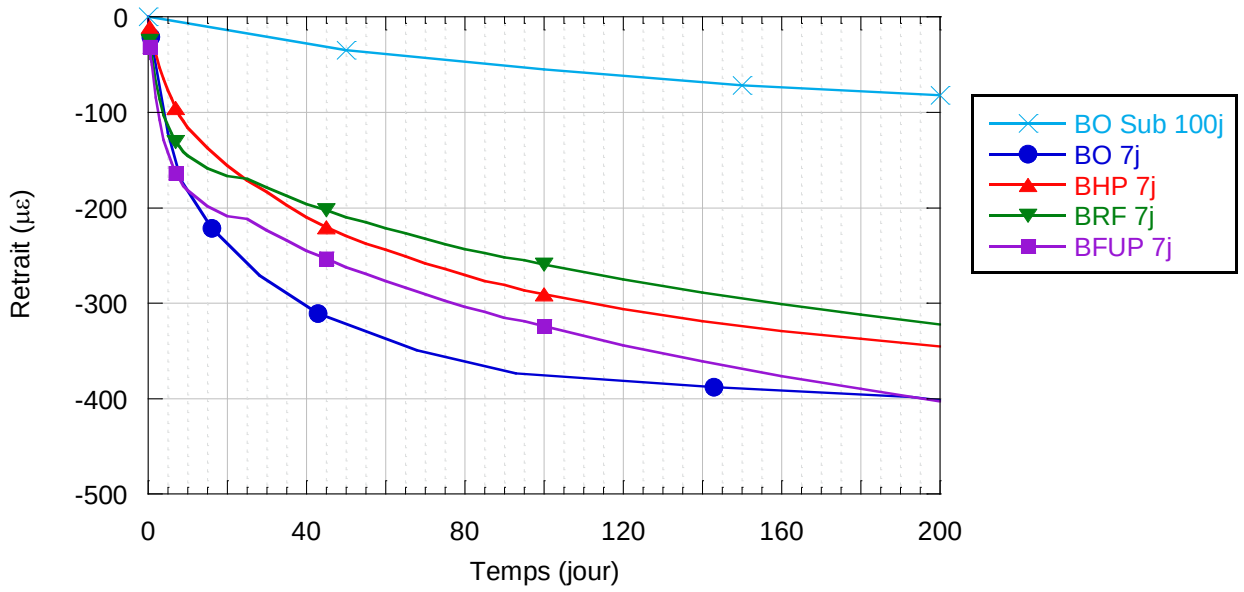


Figure 6.8 Retrait considéré pour l'étude paramétrique

6.1.4 Fluage

6.1.4.1 Caractérisation en laboratoire

Afin d'évaluer le fluage total (combinant le fluage propre et le fluage de dessiccation) en compression des bétons, des cylindres instrumentés identiques à ceux utilisés pour les essais de retrait ont été employés (Figure 6.5). Les essais de fluage ont débuté 7 jours après la coulée pour le BHP et le BFUP, soit à la fin de la cure de la réparation. Dans le cas du BO du substrat, l'essai a été amorcé à 100 jours, soit à la fin de la cure de la réparation afin d'obtenir le fluage représentatif du parapet. Tout comme pour les essais de retrait, deux cylindres instrumentés ont été fabriqués

afin d'obtenir une redondance au niveau des résultats. Les cylindres ont été installés dans le montage de fluage en compression situé dans la chambre environnementale (Figure 6.9). Le montage est composé de plaques avec rotule entre lesquelles les cylindres en béton sont placés l'un par-dessus l'autre. Des demi-cylindres sacrificiels non instrumentés sont utilisés aux extrémités de la colonne de cylindres afin d'assurer une bonne distribution des forces. Avant leur installation, les surfaces des cylindres sont rectifiées afin que les cylindres soient chargés uniformément et qu'il n'y ait pas d'excentricité accidentelle. Une force équivalente à 40% de la résistance à la compression au moment du début des essais est appliquée à l'aide d'un vérin plat hydraulique à la base du montage. La force est gardée constante grâce à un accumulateur branché sur le vérin plat.

Figure 6.9 Montage pour essais de fluage en compression

Deux montages ont été nécessaires pour les essais. Le premier montage a été utilisé pour les cylindres en BO du substrat et BHP et le second pour le BFUP. Il a été possible de combiner ces deux bétons, car leur résistance en compression à ce moment était similaire ($f_{c\,BHP}^{7j} \approx f_{c\,BO}^{100jj}$). Les jauges de déformation des cylindres ont été reliées au système d'acquisition et le relevé des déformations a été effectué automatiquement pendant 200 jours.

Le fluage total spécifique par béton est présenté à la Figure 6.10. Celui-ci est obtenu en soustrayant aux déformations mesurées, les déformations de retrait total afin d'isoler celle causée par le fluage. Par la suite, les déformations de fluage ont été divisées par la contrainte appliquée afin d'obtenir le fluage spécifique. Pour le BHP et le BFUP, les déformations progressent rapidement dans les 50 premiers jours et atteignent une valeur de -23 με/MPa pour le BHP et -34 με/MPa pour le BFUP. Par la suite, la cinétique de fluage est beaucoup plus lente et tend vers -28 et -41 με/MPa pour le BHP et le BFUP respectivement à 200 jours. Le fluage plus élevé dans le BFUP peut s'expliquer par le volume de pâte très élevée (environ 70 %) en comparaison aux autres bétons (environ 40 %). Le fluage d'un BO du substrat présente une progression plutôt constante par rapport aux autres bétons à 200 jours. Il est possible que la dessiccation plus importante de ce béton en soit responsable. Le fluage atteint une déformation de -18 με/MPa à 50 jours et de -34 με/MPa à 200.

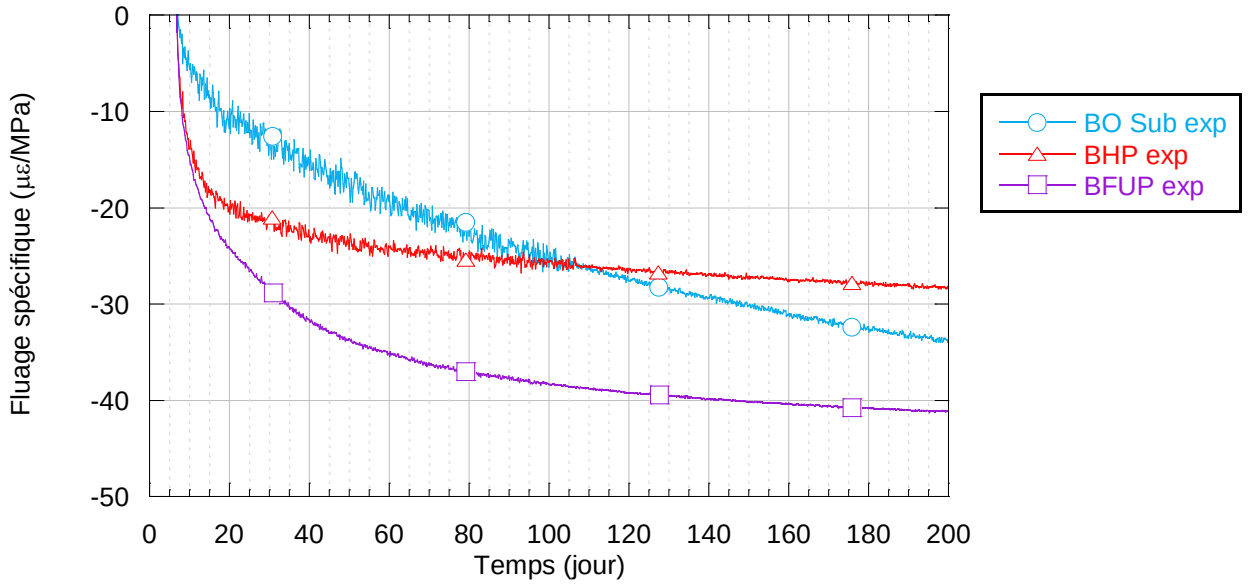


Figure 6.10 Résultat des essais de fluage en compression

6.1.4.2 Modélisation

En ce qui a trait à la modélisation par éléments finis, DIANA offre plusieurs modules pour simuler le fluage, soit la « *power law* », la chaîne de Maxwell, la chaîne de Kelvin et finalement une

approximation selon différents codes standardisés. Ces différentes approches ont toutes l'avantage de permettre l'estimation du fluage en fonction de l'âge d'application de la charge ainsi que la maturité du béton. À la suite d'une évaluation exploratoire des différentes méthodes, la chaîne de Kelvin a été sélectionnée. Elle s'est avérée la plus efficace, car elle permet l'intégration directe du fluage spécifique dans le module.

Le concept de la chaîne de Kelvin est d'estimer la rigidité des éléments comme une rigidité effective donnée par une chaîne de ressort en parallèle avec des amortisseurs visqueux (Figure 6.11). La rigidité est modifiée par la charge appliquée ainsi que sa durée dans le temps

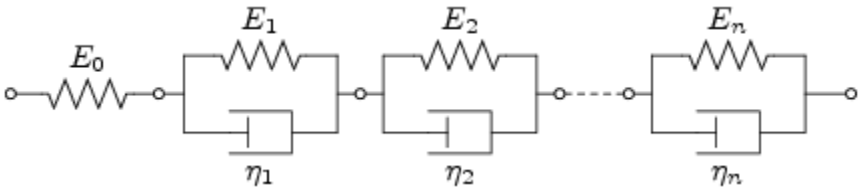


Figure 6.11 Comportement équivalent d'une chaîne de Kelvin

Le fluage spécifique de la chaîne de Kelvin est donné par l'équation de Dirichlet (TNO DIANA 2016).

$$J(t,\tau) = \sum_{i=0}^{n} \frac{1}{E_i(\tau)} \left(1 - e^{\frac{t-\tau}{n_i/E_i}}\right) \tag{6.1}$$

où J est le fluage spécifique en fonction du temps (t) et du temps où la charge est appliqué (τ), E_i le module élastique de la chaîne lors de l'application de la charge et η_i la viscosité pour la i-ème chaîne. Le module élastique de la première chaîne (E_0) est équivalent à celui mesuré en laboratoire.

Les composantes des chaînes sont estimées à l'aide d'un solveur Excel afin d'obtenir le meilleur calage possible par rapport aux courbes expérimentales. L'évolution des rigidités dans la chaîne en fonction du temps est donnée par les équations du « *Model Code 1990* » et propose un facteur pour E_0 et E_i respectivement. Ces facteurs sont fonction du type de béton utilisé (*NC* et *SL*) ainsi que l'âge équivalent donné par l'équation d'Arrhenius.

Le modèle d'éléments finis utilisé pour reproduire les essais de fluage est présenté à la Figure 5.12. Les dimensions générales, ainsi que le type d'élément de ce modèle sont identiques à celles du modèle utilisé pour la reproduction des essais de retrait. Par contre, afin d'évaluer le fluage, une contrainte a été appliquée sur le dessus du cylindre en conjonction avec un appui fixe sous le cylindre. La contrainte est générée à l'aide d'une charge linéaire appliquée sur le dessus du cylindre. La contrainte est appliquée après 7 jours de maturité du béton et d'amplitude identique à celle appliquée en laboratoire. Le matériau est défini par l'entrée manuelle des paramètres de la chaîne de Kelvin ainsi que le coefficient de Poisson. Dans le cas présent, le fluage est estimé avec 10 maillons, soit le maximum permis par DIANA.

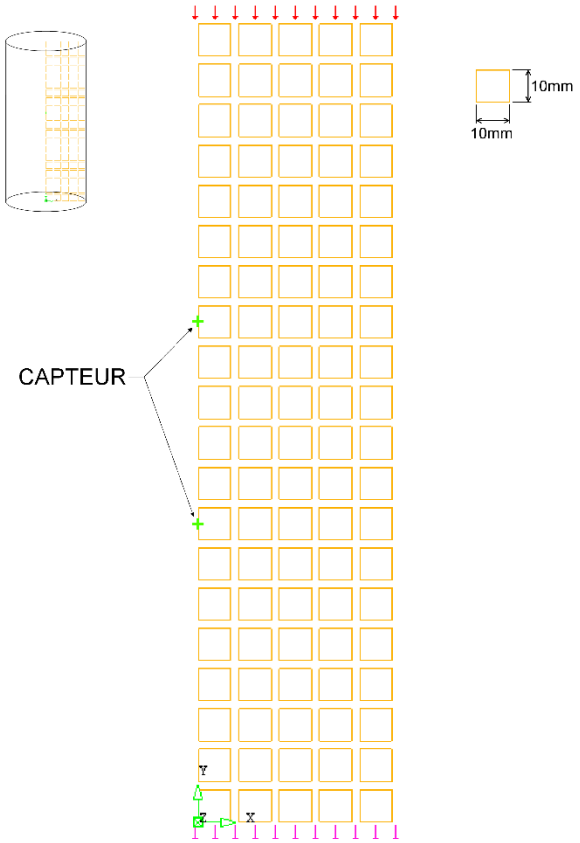


Figure 6.12 Maillage du modèle des essais de fluage en compression

Le calcul des déformations est réalisé à des intervalles de temps prédéfinis. Les déformations sont évaluées entre les deux capteurs situés dans le cylindre. La valeur obtenue est par la suite divisée par la contrainte appliquée, ce qui donne le fluage spécifique. Les courbes numériques ainsi que celles obtenues en laboratoire sont présentés à la Figure 6.13. La méthode de la chaîne de Kelvin permet une reproduction presque parfaite des données expérimentales. La similarité des courbes est normale, puisque le fluage spécifique de chaque béton a été utilisé afin de trouver les paramètres des modules élastiques de la chaîne de Kelvin (E_i). Par ailleurs, la chaîne permet aussi l'évaluation du fluage sous une contrainte donnée pour différents moments de mise en charge.

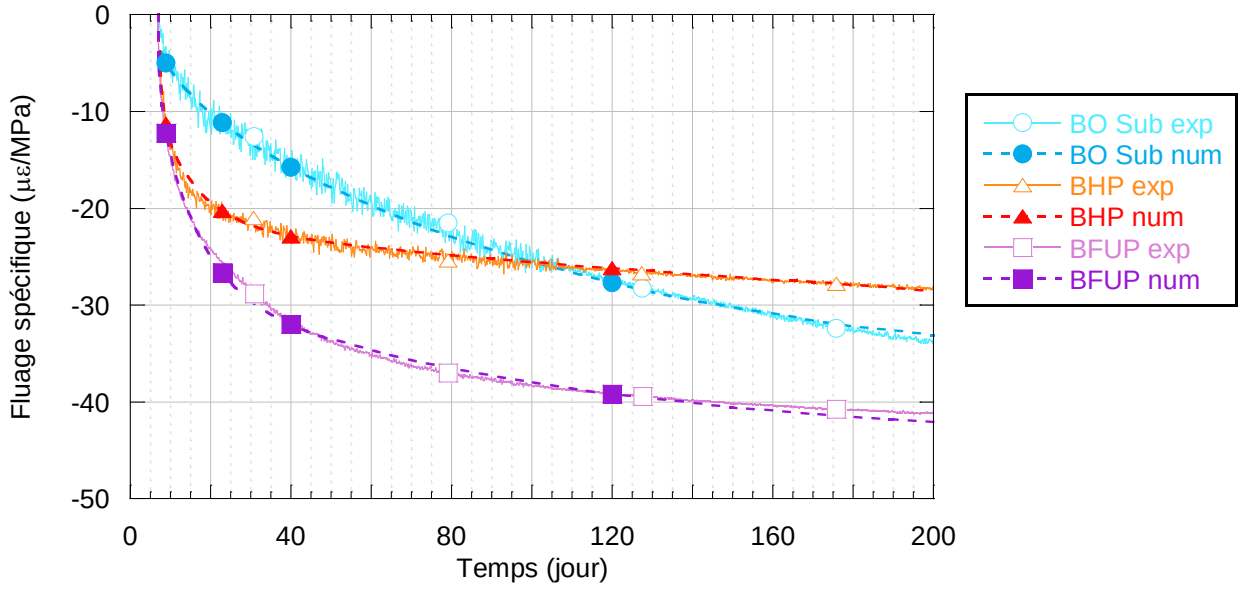


Figure 6.13 Comparaison du fluage spécifique numérique et expérimental

La Figure 6.14, présente les courbes de fluage spécifique des différents bétons étudiés de l'étude paramétrique. En ce qui a trait à la courbe de fluage spécifique du BO, elle est tirée des travaux de Bastien-Masse (2010). Pour sa part, la courbe de fluage spécifique du BRF est considérée équivalente à celle du BHP, car ces bétons ont une composition très similaire, à l'exception des fibres d'acier.

Il est à noter que l'ensemble des modélisations et essais ont été réalisés pour le fluage en compression et non pour le fluage en traction tel que retrouvé en condition de retrait restreint. Cela,

est dû, d'une part au fait que l'évaluation du fluage en traction est beaucoup plus difficile à évaluer et que l'équipement disponible au laboratoire ne permettait pas cette mesure. Dans le cas présent, le fluage total en traction est considéré équivalent à celui en compression. Il s'agit d'une hypothèse de modélisation assez fréquemment utilisée.

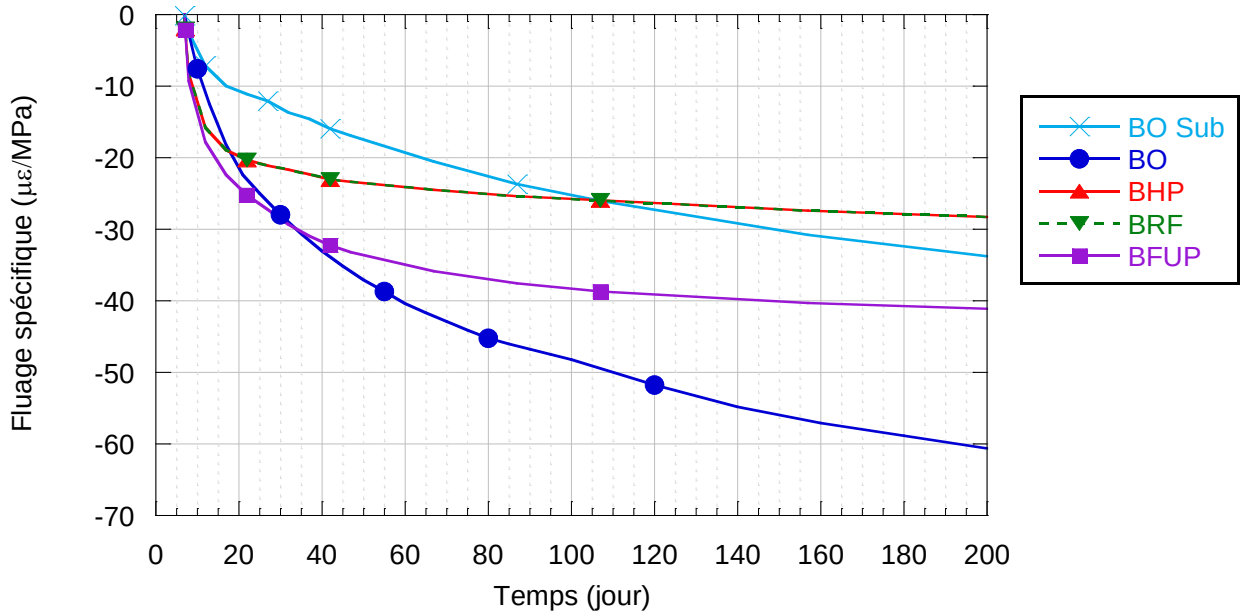


Figure 6.14 Fluage spécifique considéré pour les bétons étudiés

6.1.5 Comportement en traction

6.1.5.1 Caractérisation en laboratoire

La modélisation du comportement en traction est un aspect important pour l'étude du retrait restreint, car elle a un impact direct sur la cinétique et l'amplitude des ouvertures des fissures. Pour les bétons ordinaires (BO et BHP), il y a une rupture fragile en traction. Pour les bétons fibrés (BRF et BFUP), la courbe de traction est adoucissante après la localisation de la fissuration. Dans le cas du BFUP, celui-ci possède un plateau d'écrouissage avant la localisation de la fissuration qui procure une grande capacité de déformation, et ensuite une phase adoucissante.

L'évaluation expérimentale du comportement en traction a été expliquée en détail au chapitre précédent (Section 4.6). Brièvement, un essai brésilien a été réalisé sur le BO et afin de déterminer la résistance maximale du béton en traction et un essai de traction directe a été réalisé sur le BRF et le BFUP.

Pour le BO de la réparation, la résistance en traction et le module élastique découlent des résultats des essais en laboratoire de Bastien-Masse (2010), alors que les caractéristiques du BRF sont tirées des travaux de Beaurivage (2009).

Seules les résistances maximales en traction du BO et du BHP sont disponibles car l'essai brésilien n'apporte aucune information sur le comportement post-pic. Afin de remédier à ce manque d'information, il a été considéré que le comportement post-pic en traction de ces bétons suit la courbe proposée par Hordjick (TNO DIANA 2016). L'évolution de la résistance post-pic en fonction de la déformation à la rupture est donnée par l'équation (6.2).

$$\frac{\sigma_{nn}^{cr}}{f'_t} = \begin{cases} \left(1 + \left(c_1 \frac{\varepsilon_{nn}^{cr}}{\varepsilon_{nn.ult}^{cr}}\right)^3\right) \exp\left(-c_2 \frac{\varepsilon_{nn}^{cr}}{\varepsilon_{nn.ult}^{cr}}\right) - \frac{\varepsilon_{nn}^{cr}}{\varepsilon_{nn.ult}^{cr}}(1 + {c_1}^3)\exp(-c_2) & \text{if } 0 < \varepsilon_{nn}^{cr} < \varepsilon_{nn.ult}^{cr} \\ 0 & \text{if } \varepsilon_{nn.ult}^{cr} < \varepsilon_{nn}^{cr} < \infty \end{cases} \tag{6.2}$$

où f'_t est la résistance maximale du béton, ε_{nn}^{cr} est la déformation dans le béton depuis l'atteinte de f_t, σ_{nn}^{cr} est la contrainte résiduelle dans le béton pour une déformation de ε_{nn}^{cr}, les paramètres c_1 et c_2 représentent des coefficients de calibration donnés par le modèle. Ceux-ci sont définis à 3 et 6.93 respectivement. Finalement, $\varepsilon_{nn.ult}^{cr}$ représente la déformation maximale à laquelle la contrainte résiduelle devient nulle et est donnée par l'équation (6.3)

$$\varepsilon_{nn.ult}^{cr} = 5.136 \frac{G_f}{h \cdot f_t} \tag{6.3}$$

où G_f est l'énergie de fracturation du béton et h la longueur de fissuration type des éléments. Dans le cas présent, les valeurs de G_f pour le BO de réparation et le BHP sont de 116 et 65.4 N/m respectivement. Ces valeurs sont tirées des valeurs suggérées par logiciel d'éléments finis Atena. Finalement, le paramètre h est défini à 50 mm, soit la longueur caractéristique des éléments qui seront utilisés dans le modèle final. La courbe d'Hordjick est disponible directement dans DIANA, ce qui permet une intégration facile.

Le comportement en traction mesuré en laboratoire à 28 jours pour le BRF et le BFUP est présenté à la Figure 6.15. Les courbes du BO et du BHP considèrent la résistance maximale mesurée en laboratoire et le comportement post-pic calculé avec le modèle de Hordjick. La contrainte maximale en traction du BO et du BHP est de 2 et 3.6 MPa respectivement. Il est possible d'observer que le modèle d'Hordjick possède deux régimes distincts, soit une diminution rapide des contraintes pour une petite déformation suivie par une diminution lente de contrainte sur une plus longue déformation. Dans le cas du BRF, celui-ci atteint une résistance de 2.4 MPa et possède un comportement adoucissant. Finalement, le BFUP possède une résistance élastique de 8.9 MPa et une résistance à l'ultime en traction de 10.4 MPa. La résistance en traction du BFUP est nettement supérieure à celle des autres bétons et il possède un comportement écrouissant unique.

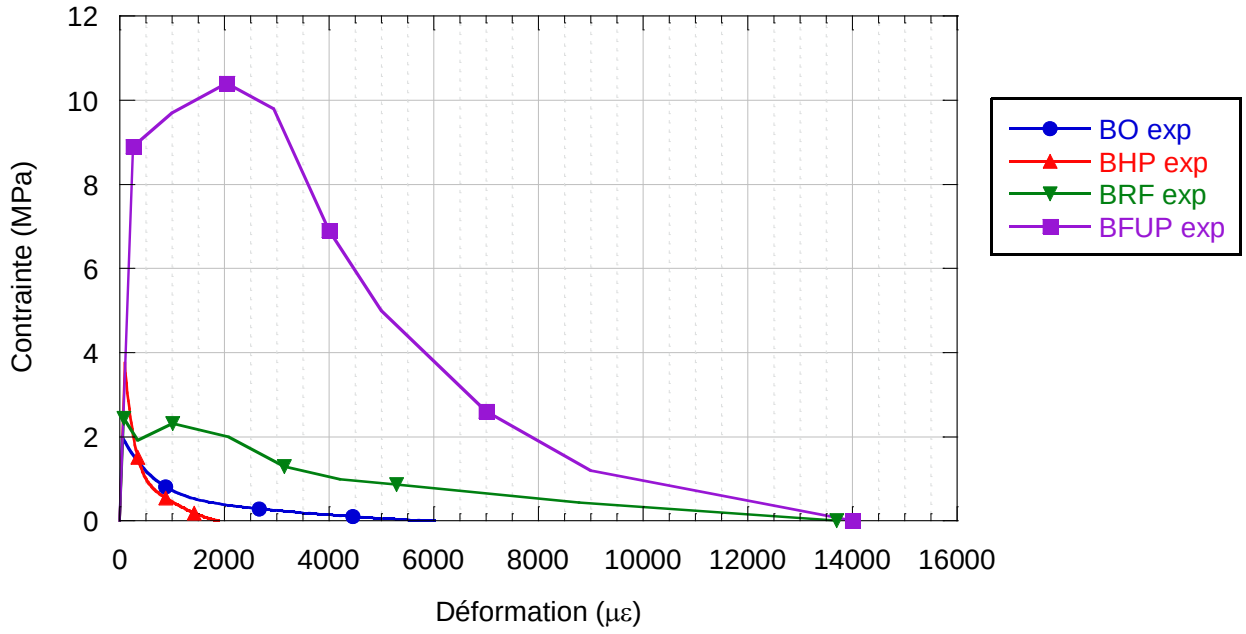


Figure 6.15 Comportement en traction simplifié des bétons étudiés

6.1.5.2 Modélisation

En ce qui a trait à la modélisation du comportement en traction dans DIANA, plusieurs modèles et paramètres sont disponibles. Le modèle de fissuration répartie (*smeared cracks*) sera utilisé. Cette

approche évalue les déformations liées à l'ouverture totale des fissures dans un élément. Elle permet d'obtenir le nombre de fissures attendu dans le maillage et leur ouverture propre.

DIANA offre deux modules pour le modèle de fissuration répartie, soit le « *multi-directional fixed crack model* » et le « *total strain crack model* ». Le premier module permettant la rotation des fissures a été sélectionné notamment pour sa compatibilité avec les modèles constitutifs liés à l'hydratation du béton.

Pour la réalisation d'analyse thermo-mécanique temporelle permettant de reproduire le comportement au jeune âge du béton en condition de déformation restreinte, il est requis de considérer l'évolution des résistances du béton en fonction du temps. DIANA permet de définir la courbe de résistance en compression et en traction en fonction de la maturité du béton. L'évolution de la maturité du béton est elle-même évaluée à l'aide d'un modèle d'hydratation du béton tel que ceux décrits à la section 6.1.2.

En ce qui a trait à la modélisation du comportement adoucissant en traction des bétons, DIANA offre plusieurs modèles. Dans le cas du BO et du BHP, le modèle de Hordjick est utilisé. Celui-ci nécessite simplement la définition du paramètre G_f et h. Les équations (6.2) et (6.3) démontrent que les déformations ainsi que les contraintes sont proportionnelles à f'_t. Ainsi, le modèle d'Hordjick tient compte de la maturité du béton et le comportement en traction évolue avec le temps.

Pour le BRF et le BFUP, DIANA offre la possibilité de rentrer manuellement la courbe adoucissante écrouissante (si applicable) et la courbe observée expérimentalement. L'évolution de la courbe adoucissante dans le temps est considérée de deux manières par DIANA. D'une part, les résistances évoluent proportionnellement à la résistance maximale telle que précédemment définie. D'autre part, les déformations associées évoluent selon une courbe discrète définie dans DIANA. Cette courbe représente l'évolution de la déformation maximale définie dans la courbe adoucissante en fonction de la maturité. Dans ce cas, la courbe a été trouvée de manière similaire à la résistance maximale en traction.

Finalement, DIANA nécessite un facteur de rétention des contraintes de cisaillements au droit d'une fissure pour tous les modèles. Dans le cas présent, il a été considéré que peu importe l'ouverture d'une fissure, celle-ci conservera sa rigidité en cisaillement.

Afin de valider la modélisation du comportement déformationnel en traction, un modèle simple a été mis au point. Celui-ci est composé de seulement 7 éléments. Le premier est un élément brique isoparamétrique à 8 nœuds et représente le béton étudié. Cet élément est cubique et possède une dimension de 50 mm sur chaque côté. Les 6 autres éléments sont des éléments plaques isoparamétriques à 4 nœuds et sont situés sur les six faces du cube. Ces éléments sont utilisés afin d'assurer le transfert de chaleur entre le cube de béton et l'environnement. L'aspect thermique est nécessaire afin d'évaluer la maturité dans le temps du béton. Au niveau des conditions limites, la température extérieure est considérée à 22 degrée Celsius pendant l'analyse. De plus, afin d'évaluer les déformations dans le cube, les nœuds inférieurs voient leur déplacement vertical empêché.

Les propriétés mécaniques définies dans le modèle pour le béton incluent la définition de la courbe adiabatique ainsi que les paramètres associés (Section 6.1.2). De plus, le coefficient de dilatation thermique a aussi été spécifié afin de quantifier l'impact de la chaleur sur les déformations au jeune âge. À cela ont été ajoutés les divers paramètres liés au comportement mécanique en traction décrit précédemment.

Afin d'évaluer les déformations du cube, la face supérieure du cube est déplacée vers le haut. Les déformations et contraintes sont enregistrées pour chaque nœud.

En plus de l'analyse mécanique, une analyse thermique est requise afin de calculer la maturité du béton dans le temps. Dans ce cas, DIANA offre la possibilité de faire un « *coupled flow-stress analysis* ». Dans un premier temps, une analyse thermique est effectuée sur la période complète de la modélisation. Cela permet de calculer la température en tout point liée aux phénomènes thermiques (hydratation). Par la suite, ces températures sont transformées en déformation équivalente selon le coefficient de dilatation thermique fournie. Ces déformations sont par la suite additionnées aux déformations calculées lors de l'analyse mécanique. Afin d'assurer une bonne cohésion entre les deux analyses, le pas de temps utilisé doit être similaire.

La Figure 6.16 présente les résultats expérimentaux et numériques pour le comportement en traction des bétons étudiés à 28 jours. En observant la figure précédente, il est possible d'affirmer que DIANA permet une représentation très satisfaisante du comportement en traction au niveau des bétons étudiés.

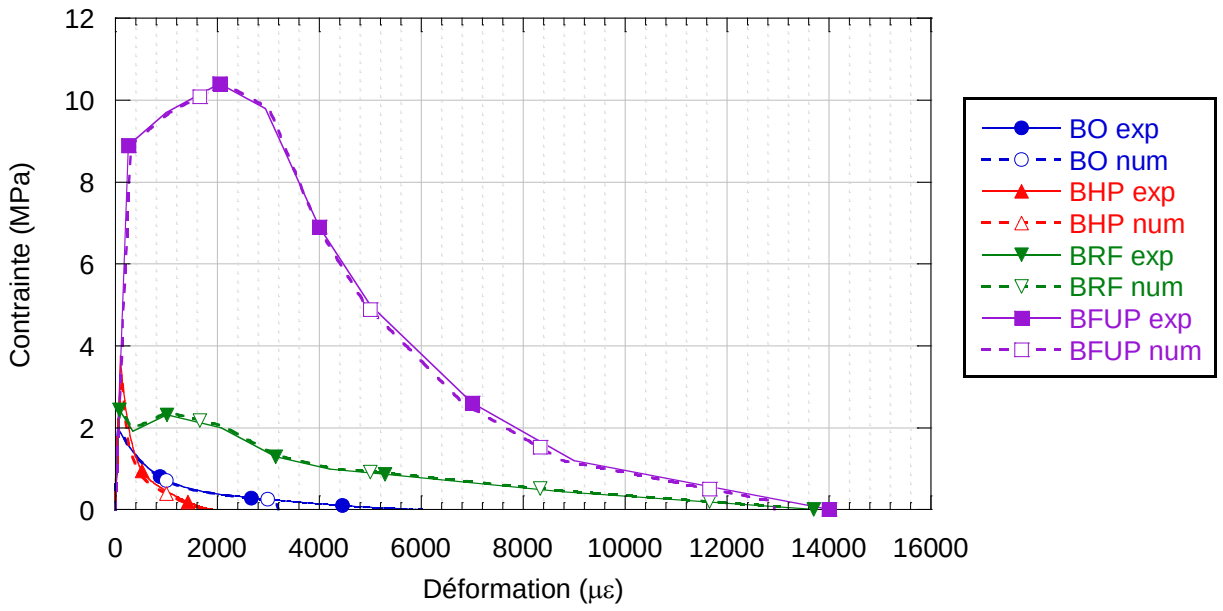


Figure 6.16 Comparaison du comportement en traction des bétons étudiés entre les valeurs expérimentales et modélisées

La Figure 6.17 présente l'évolution temporelle du comportement en traction pour 2 matériaux, soit le BO et le BRF. On constate l'impact de la maturité sur la résistance et la déformation des bétons. Logiquement, la résistance et la capacité de déformation sont réduites au jeune âge.

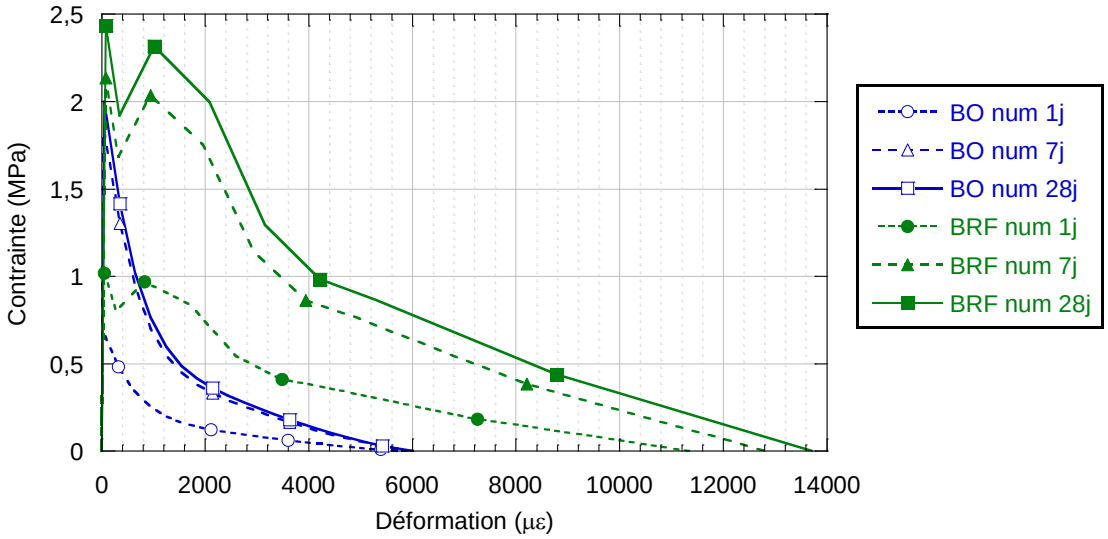


Figure 6.17 Évolution dans le temps du comportement mécanique du BHP et du BRF

6.2 Modélisation et calibration du parapet réparé

Afin d'analyser et d'évaluer le comportement des différents bétons de réparation en condition de retrait restreint, il est important de créer un modèle par éléments finis le plus fidèle possible aux conditions limites imposées en laboratoire et aux propriétés des matériaux mesurées. La présente section est divisée en deux parties. La première discute de la modélisation du parapet dans le logiciel d'éléments finis DIANA 3D et la seconde partie traite de la calibration du modèle par rapport aux résultats déformationnels obtenus expérimentalement en laboratoire.

6.2.1 Modélisation du parapet

Une considération importante lors du développement d'un modèle d'éléments finis est la taille requise des éléments utilisés. Jusqu'à un certain point, une augmentation de la finesse du maillage permettra une meilleure représentation des déformations et par conséquent des contraintes au niveau des éléments, et éventuellement du patron de fissuration causée par le retrait restreint. Cependant, l'utilisation d'un maillage trop fin augmente considérablement le nombre d'éléments et par le fait même le temps d'analyse requis par modèle. De plus, dans cette étude, une analyse non linéaire est requise pour reproduire les effets d'hydratation du béton, le fluage et le comportement mécanique, et requiert un temps de calcul déjà important. Suite à quelques optimisations de modèle, il a été décidé d'utiliser de manière générale, des éléments cubiques de 50 mm de côté. Cependant, dans des cas plus particuliers tels que la couche de réparation, d'autres dimensions ont été utilisées. Cet aspect sera présenté en plus amples détails à la Figure 6.18.

Une considération importante en ce qui a trait au temps de calcul est la réduction des éléments redondants et non importants. Dans le cas présent, le parapet ainsi que les conditions limites appliquées sont parfaitement symétriques par rapport à l'axe central. Ainsi, il est possible d'éliminer la moitié des éléments requis et d'appliquer des conditions limites de symétrie. Par ailleurs, puisque la majeure partie des déformations attendues sont observées dans la réparation et le parapet, l'extrémité de la dalle ainsi que celle du trottoir peuvent être négligées. Ainsi, le parapet a été coupé à 0.650 mètre par rapport à la surface avant du parapet. Ces modifications permettent de réduire d'environ de deux tiers le nombre d'éléments requis. Une diminution équivalente est

attendue en ce qui a trait au temps d'analyse. Une validation des déformations a été réalisée entre le modèle complet et le modèle réduit. Les résultats entre les deux modèles étaient quasi identiques.

La Figure 6.18 présente le maillage global utilisé ainsi que la position des différents matériaux utilisés.

Figure 6.18 Maillage et matériaux associés dans le modèle du parapet

Les éléments présentés à la Figure 6.18 sont entièrement composés d'éléments brique isoparamétrique à 8 nœuds. Chaque couleur représente un béton différent défini dans le modèle. Au niveau de la réparation (jaune), les éléments ont été réduits à 10 mm d'épaisseur afin d'évaluer adéquatement les déformations et contraintes. La réparation a été prolongée dans le trottoir (orange) afin de simuler l'encoche pratiquée. L'interface entre le parapet (vert) et le trottoir est considérée parfaite et le décollement n'est pas simulé. Au niveau de la dalle (rouge), la hauteur des éléments a été augmentée afin de réduire davantage la quantité d'éléments requis dans le modèle. De plus, aucune déformation importante n'est attendue à cet endroit.

Un autre aspect important qui n'est pas illustré à la Figure 6.18 est la modélisation des barres d'armature coulées dans le béton. DIANA 3D offre un module permettant la modélisation des

armatures. Les armatures sont modélisées à partir d'éléments barres placés aux endroit prévus dans le parapet (Annexe C). Lors de l'analyse, DIANA applique une rigidité modifiée aux nœuds des éléments traversés par les barres.

La Figure 6.19 présente les déplacements et rotations bloqués. Afin de simuler des déformations adéquates au niveau de l'axe de symétrie (zone hachurée à l'extrémité gauche), la rotation autour de l'axe des X et Z ainsi que le déplacement dans l'axe Z sont empêchés pour les nœuds situés sur cette face. En ce qui a trait à la condition d'appuis au sol (zone hachurée sous le parapet), les déplacements dans l'axe Z et X ont été empêchés. Cela sert à simuler les madriers en bois sur lesquels le parapet était déposé en laboratoire.

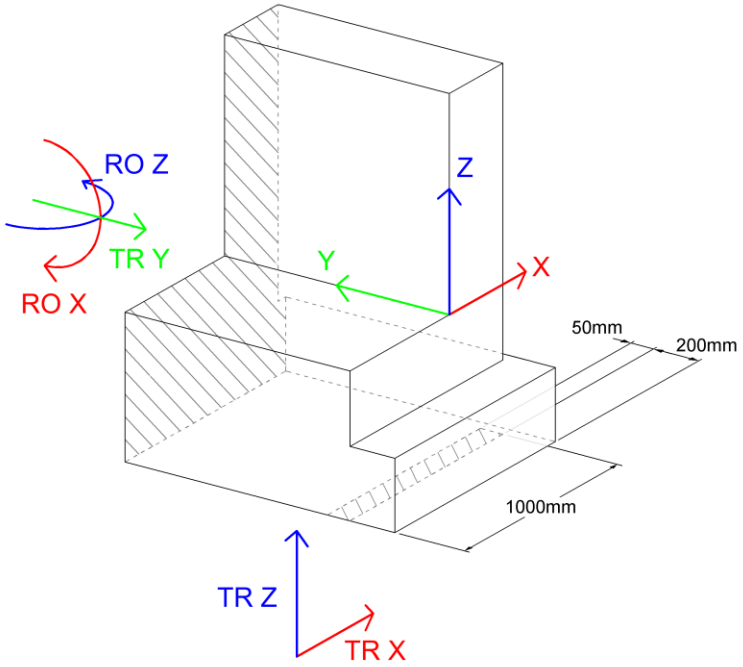


Figure 6.19 Déplacement et rotation bloqués dans le parapet modélisé

Des éléments plaques isoparamétriques à 4 nœuds ont été appliqués sur presque l'ensemble des surfaces du parapet afin d'assurer les échanges thermiques entre le béton et l'environnement. Le maillage de ces éléments est identique à celui de la surface sur laquelle ils sont appliqués. Les différentes surfaces convectives définies sont présentées à la Figure 6.20. Différents matériaux ont été utilisés afin de simuler les facteurs convectifs selon le temps et l'endroit. Le dessus du

parapet (vert) simule l'application d'une feuille de polyéthylène plastique durant la période de coffrage, suivie par la cure humide et se termine par une exposition à l'air après 7 jours. Dans le cas du pourtour du parapet (orange), celui-ci simule l'effet du coffrage, suivi par la cure humide et, pour terminer, l'exposition à l'air. Finalement, le reste du parapet (violet), incluant le dessous, est simplement considéré comme exposé à l'air durant l'ensemble de l'analyse. Il est à noter que la couleur bleue sur la Figure 6.20 ne représente pas un élément de peau, aucun échange thermique n'est possible à l'axe de symétrie.

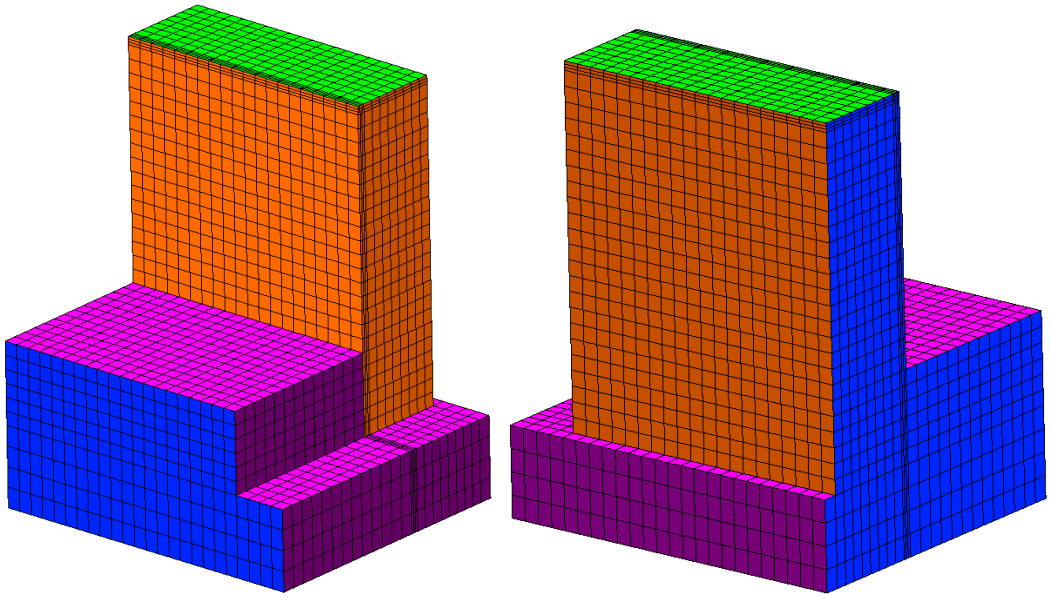


Figure 6.20 Surfaces convectives appliquées en surface des parapets.

Le Tableau 6.4 présente les facteurs convectifs en fonction du temps. Les différents facteurs convectifs utilisés sont tirés de Lee et al. (2009) ainsi que du projet de maîtrise de Bastien-Masse (2010). En ce qui a trait au facteur convectif durant la cure humide, celui-ci a été calculé pour une surface verticale avec une couche d'eau en écoulement permanent. Cette valeur est fonction de la différence de température entre l'eau et les matériaux. Dans ce cas, une différence moyenne a été utilisée.

Tableau 6.4 Facteurs convectifs en fonction du temps pour les différents matériaux de peau du modèle

Condition frontière	**Couleur**	**Facteur convectif (W/(m^2 K))**		
		0j-1j*	**1j-7j**	**7j-180j**
Air ambiant	Rose	10	10	10
Coffrage	Orange	3.6	25	10
Polythylène	Vert	2.4	25	10
Aucune	Bleu	-	-	-

*Coffrage appliqué jusqu'à 2 jours dans le cas du BFUP

En tout, 8 matériaux ont été définis dans le modèle, soit quatre bétons incluant celui de réparation, trois matériaux de peau et finalement, l'acier d'armature. Les bétons de la dalle, du trottoir et du parapet sont caractérisés par leurs modules de retrait et de fluage ainsi que par leurs propriétés thermiques. Pour les bétons du substrat, la maturité n'a pas influence, puisque les bétons ont été coulés depuis un certain temps et possèdent une maturité élevée. Les propriétés thermiques incluent la capacité thermique des bétons ainsi que leur conductivité. Au niveau du béton de réparation, celui-ci est défini par ses modules de retrait, de fluage (en fonction du temps), par ses propriétés thermiques, son comportement mécanique en traction et par son module d'hydratation. Les matériaux convectifs pour leur part sont définis seulement par le facteur convectif en fonction du temps tel que présenté au Tableau 6.4. Finalement, l'acier d'armature est simplement défini par ses propriétés thermiques et son module d'élasticité.

Il est important de noter que seul le béton de réparation possède un comportement mécanique non linéaire en traction pouvant mener à la fissuration. Logiquement, seul le béton de réparation devrait pouvoir atteindre un endommagement par les effets de retrait restreint. Cela permet une réduction du temps de calcul.

En ce qui a trait aux conditions ambiantes, la courbe de température mesurée en laboratoire pour les deux parapets testés a été insérée directement dans le modèle. Étant donné le nombre imposant de mesures prises, la moyenne à chaque heure a été utilisée durant le premier jour (2 jours dans le cas du BFUP) et aux 12 heures après la cure humide. Pendant la cure, la température des éléments orange et vert (Figure 6.20) considère la température de l'eau, soit une température moyenne de

18.5 degrés Celsius. La température dans le laboratoire est utilisée pour les éléments roses durant cette période.

La procédure d'analyse utilise la méthode du « *coupled flow-stress analysis* », soit une analyse thermique suivie par une analyse mécanique telle qu'expliquée à la section 6.1.5. Les calculs sont effectués à des intervalles prédéfinis, initialement courts dans le but de modéliser adéquatement l'hydratation dans le béton et les déformations au jeune âge et augmentent avec le temps. L'analyse est effectuée pour une période de 200 jours.

Les déformations sont enregistrées aux 50 mm entre l'axe de symétrie et la position des ancrages pour les capteurs SOFO installés dans la réparation et le parapet. Afin d'obtenir la position exacte, une interpolation linéaire des déformations a été effectuée sur les nœuds environnants. La température est aussi prélevée aux mêmes endroits que les thermocouples installés dans les spécimens. Cela permet la comparaison des résultats numériques et expérimentaux des déformations et de la température interne. Plusieurs modèles et itérations ont été réalisés afin de calibrer les modèles pour l'étude paramétrique subséquente avec les différents bétons étudiés.

6.2.2 Calibration des modèles de parapets réparés

La calibration des paramètres des modèles est réalisée en comparant les résultats numériques et expérimentaux de la température interne et des déformations dues au retrait et au fluage. Puisque les résultats numériques doivent être comparés aux résultats expérimentaux, seuls les spécimens réparés en BHP et BFUP seront évalués pour cette calibration. La calibration de ces modèles pourra par la suite être appliquée aux autres bétons étudiés, soit le BO et le BRF dans l'étude paramétrique.

Les résultats obtenus à la présente section sont l'aboutissement d'un programme exhaustif de calibration où l'influence de presque chaque paramètre a été évaluée individuellement afin de déterminer l'ensemble des paramètres constitutifs qui représentent le mieux les bétons étudiés.

6.2.2.1 Température

Puisque les variations thermiques importantes surviennent principalement à cause de la réaction d'hydratation, les résultats pour les 10 premiers jours suivant l'installation de la réparation seront discutés. Après cette période, seules les variations de température à l'intérieur du laboratoire de structure affectent le parapet.

La Figure 6.21 présente les résultats numériques et expérimentaux de la température dans le parapet (substrat) et la réparation en BHP. En ce qui a trait à l'échauffement du béton de réparation dû à la réaction d'hydratation, le modèle numérique atteint une température de 26.2 °C, ce qui est légèrement inférieur à la valeur expérimentale de 27.2 °C. Cependant, la température maximale enregistrée dans le parapet dans l'essai et le modèle sont presque identiques, soit environ 25 °C. Pendant la cure à l'eau qui s'est déroulée du 2ième au 7ième jour, les résultats numériques représentent assez fidèlement les résultats expérimentaux. Les courbes plus lisses observées dans le modèle sont dues au fait que le changement journalier de température est négligé durant cette période. Suite à la cure humide, les résultats numériques convergent plus lentement vers la température journalière, mais deviennent presque identiques après 10 jours.

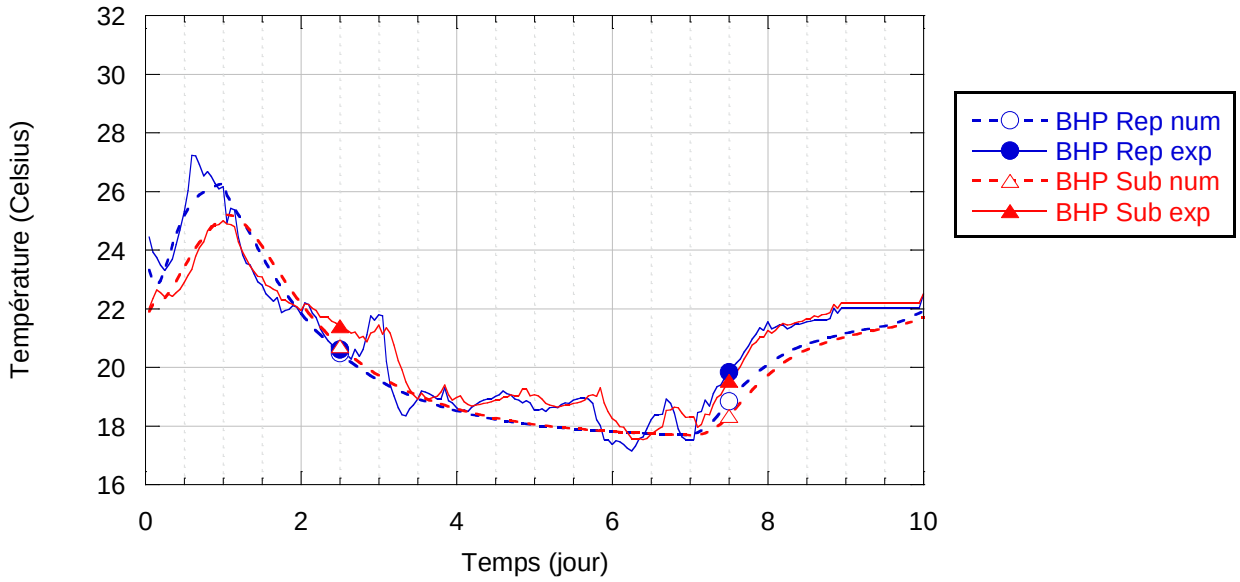


Figure 6.21 Calibration des résultats de température du parapet réparé en BHP

La Figure 6.22 présente les résultats thermiques numériques et expérimentaux du parapet réparé en BFUP. À nouveau, les températures obtenues dans le parapet (substrat) et la réparation sont illustrés. On observe que la phase d'échauffement de la réparation en BFUP est moins bien reproduite que celle de la réparation en BHP. La température maximale observée numériquement

est inférieure à celle expérimentale, et ce, malgré la perte de données expérimentales illustrée par le plafonnement brusque de la courbe. De plus, afin de favoriser l'échauffement supérieur dans le béton, la conductivité dans le BFUP a été diminuée à la valeur limite observée dans la littérature, soit 0.94 (Corinaldesi et al. 2012). Malgré tout, cela est insuffisant pour obtenir un échauffement similaire à la mesure expérimentale. La température mesurée dans le parapet est bien reproduite par le modèle en supposant une évolution réaliste de la courbe expérimentale plutôt que le plafonnement brusque illustrée. Pendant la cure à l'eau, s'échelonnant entre le 2ième et le 7ième jour, les courbes numériques et expérimentales présentent un comportement très similaire.

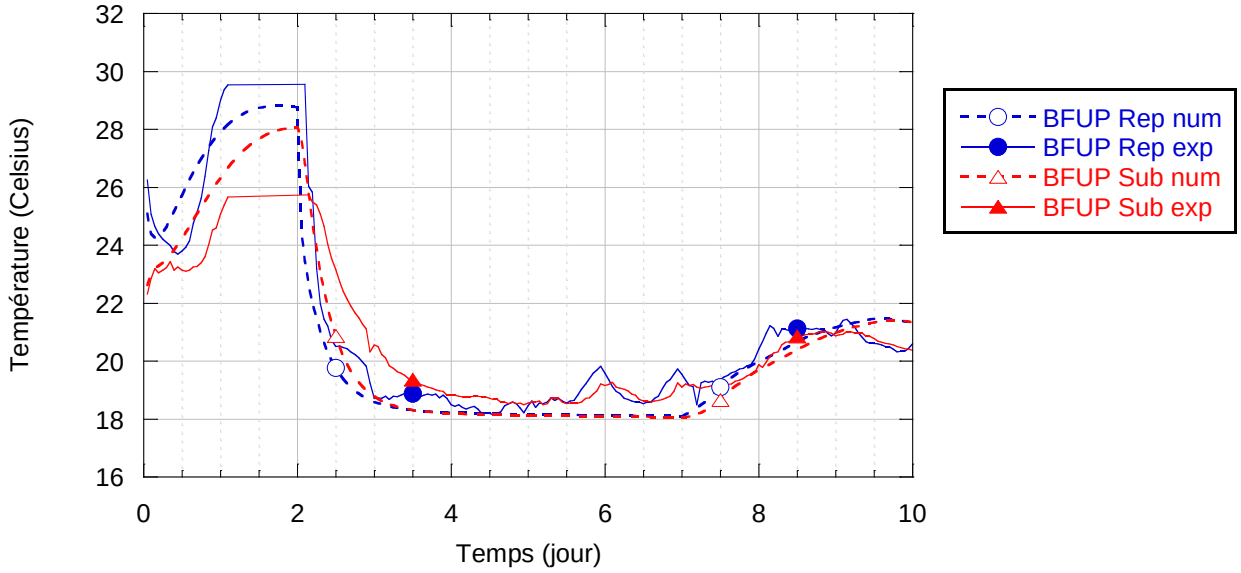


Figure 6.22 Calibration des résultats thermiques du parapet réparé en BFUP

Mise à part une sous-estimation de l'échauffement de la réparation en BFUP, l'évolution des températures dans le substrat et la réparation sont bien reproduites par les modèles jusqu'à la fin de la cure.

6.2.2.2 Déformations

Il a été décidé de comparer les déformations dans les parapets après une échéance de 10 jours pour 2 raisons. La première raison est que l'utilisation d'un coefficient de dilatation constant au jeune âge du béton (tel que considéré) introduit une erreur importante. Le coefficient de dilatation est très

élevé au jeune âge et ensuite se stabilise (Bjøntegaard 1999). Or, aucune donnée n'était disponible pour les bétons étudiés. La deuxième raison est que pendant la cure à l'eau, l'absorption d'eau a causé un gonflement du béton. Par contre, ce phénomène ne pouvait pas être considéré dans la présente étude numérique et a eu un impact important sur les déformations mesurées pendant la cure.

La Figure 6.23 présente les déformations numériques et expérimentales dans le parapet (substrat) et la réparation en BHP. Les valeurs ont été mises égales à zéro à 10 jours. Globalement, les variations de déformations dues aux gradients de température sont bien reproduites par le modèle. Une analyse plus détaillée permet de constater qu'une contraction de 44 με et de -81 με a été observée dans la réparation à 40 jours dans le modèle numérique et expérimental respectivement. Cela représente une différence relative de -45% par rapport à la donnée expérimentale. Dans le cas des déformations mesurées dans le parapet (substrat), une valeur numérique de -38 με et une valeur expérimentale de -50 με ont été mesurées à pareille échéance. Cela se traduit par une différence relative de -25 %. Ainsi, les déformations numériques sont plus faibles pour le substrat que pour la réparation elle-même.

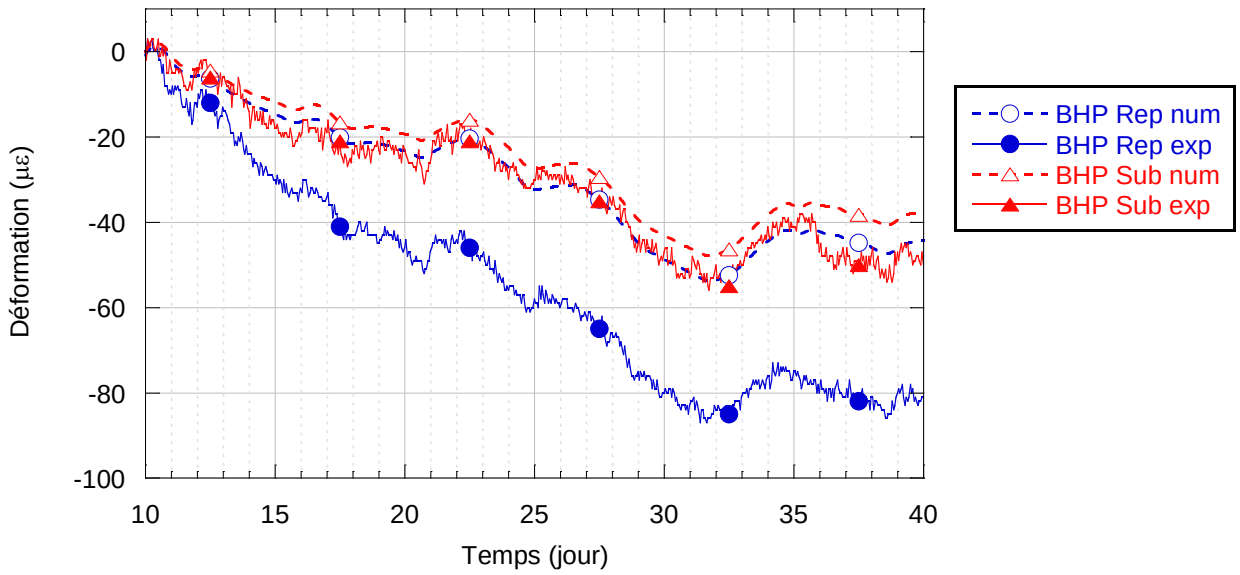


Figure 6.23 Calibration du comportement déformationnel du parapet réparé en BHP

Pour sa part, la Figure 6.24 présente les déformations numériques et expérimentales dans le parapet réparé en BFUP. Les déformations expérimentales observées dans la réparation sont de -47 με et de -32 με numériquement. Cela représente une différence relative de -32%. Au niveau du substrat, les déformations expérimentales mesurées sont de -31 με et numériquement de -28 με, ce qui donne une différence relative de -10 %. Encore une fois, les déformations numériques sont plus proches des résultats expérimentaux pour le substrat que pour la réparation.

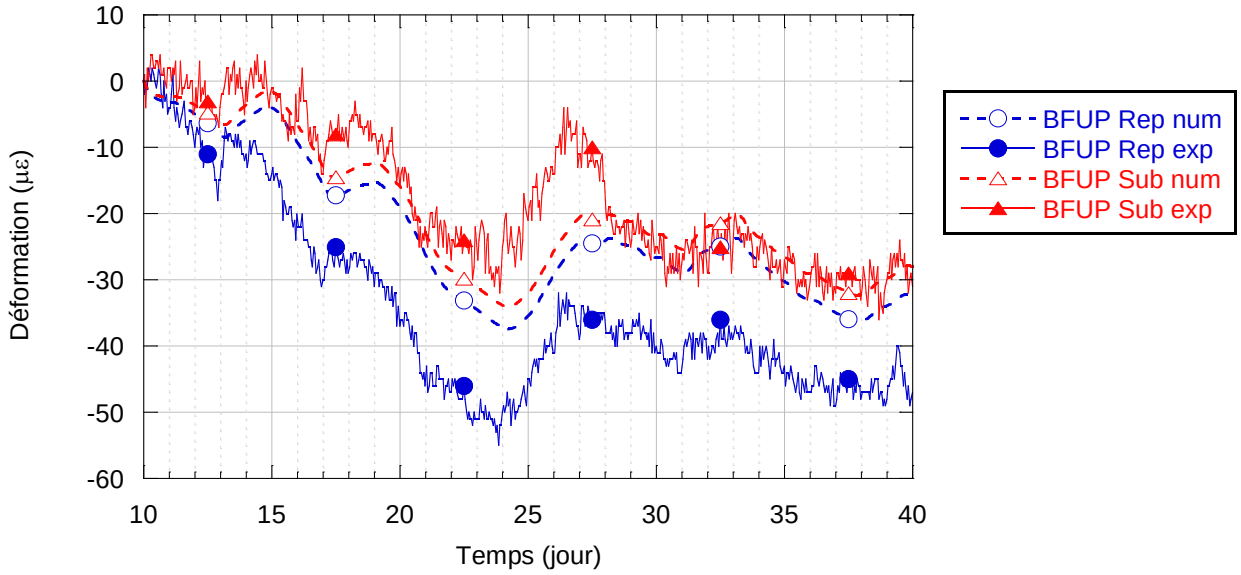


Figure 6.24 Calibration du comportement déformationnel du parapet réparé en BFUP

Dans les deux parapets étudiés, il est possible d'observer que l'évolution des déformations dans les réparations est inférieure à ce qui était attendu. Cette imprécision des modèles devra donc être considérée lors de l'analyse des résultats de l'étude paramétrique. Ceux-ci devront être évalués plus pour les tendances générales observées plutôt que pour la précision des résultats obtenues par rapport aux résultats mesurés en laboratoire.

6.3 Étude paramétrique

Les essais en laboratoire ont permis de caractériser le comportement d'une réparation mince en condition de retrait restreint sur des parapets de pont de taille réelle pour deux types de béton de

réparation, soit le BHP et le BFUP. Cependant, les essais en laboratoire n'ont pas permis de quantifier les déformations dues au changement thermique saisonnier. De plus, vu la complexité des essais et la logistique requise, seuls deux bétons de réparation ont pu être testés en laboratoire.

L'objectif de cette étude est d'évaluer le comportement d'une réparation mince sur parapet de pont réalisée avec divers bétons (BO, BHP, BRF et BFUP) pour deux conditions environnementales différentes (température ambiante constante et variable) et déterminer le potentiel de fissuration de la réparation. La température constante est similaire à la condition étudiée en laboratoire. La température variable représente les cycles de température journaliers de même que l'évolution de la température saisonnière de juillet à janvier (6 mois). L'abaissement de température cause un retrait thermique qui s'ajoute au retrait du béton et peut éventuellement augmenter les dommages observés à court et moyen termes dans les réparations.

6.3.1 Béton de réparation étudiés

Tel que décrit à la section 6.1.1, le comportement de 5 bétons de réparations est étudié, soit les BO, BHP, BRF et BFUP. Les modèles numériques permettant de reproduire leur comportement ont été décrits et validés précédemment (Section 6.2).

6.3.2 Description des modèles numériques

Les modèles numériques de l'étude paramétrique à la section 6.2 sont identiques à ceux définis à l'exception de l'évolution de la température ambiante dans le temps. Afin de reproduire adéquatement le comportement de la réparation en condition thermique saisonnière et journalière, les données météorologique de la station de l'aéroport de Pierre-Elliott Trudeau ont été utilisées (Gouvernement du Canada 2016).

Les courbes de température imposées dans les modèles sont présentées à la Figure 6.25. La courbe de température variable varie linéairement entre 20.9 °C à -10.2 °C (réduction de 30. 2 °C) sur une durée de 180 jours (6 mois). Cela représente la moyenne de température mensuelle maximale et minimale pour les mois de juillet et de janvier. La courbe possède aussi une demi-amplitude journalière de 4.5 °C, soit la variation moyenne le long de l'année entre les maximums et minimums moyens mensuels. Pour la condition thermique constante, une température de 22 °C a été considérée. Pour évaluer l'impact saisonnier (*Tvariable*), les résultats sont comparés à ceux d'une température sans variation journalière et saisonnière (*Tconstante*). Ces gradients thermiques

simulent seulement la température de l'air ambiante et ne considèrent pas l'apport thermique additionnel dû à la radiation solaire sur les surfaces exposées. Ainsi les températures considérées sont conservatrices par rapport à la réalité des parapets de ponts.

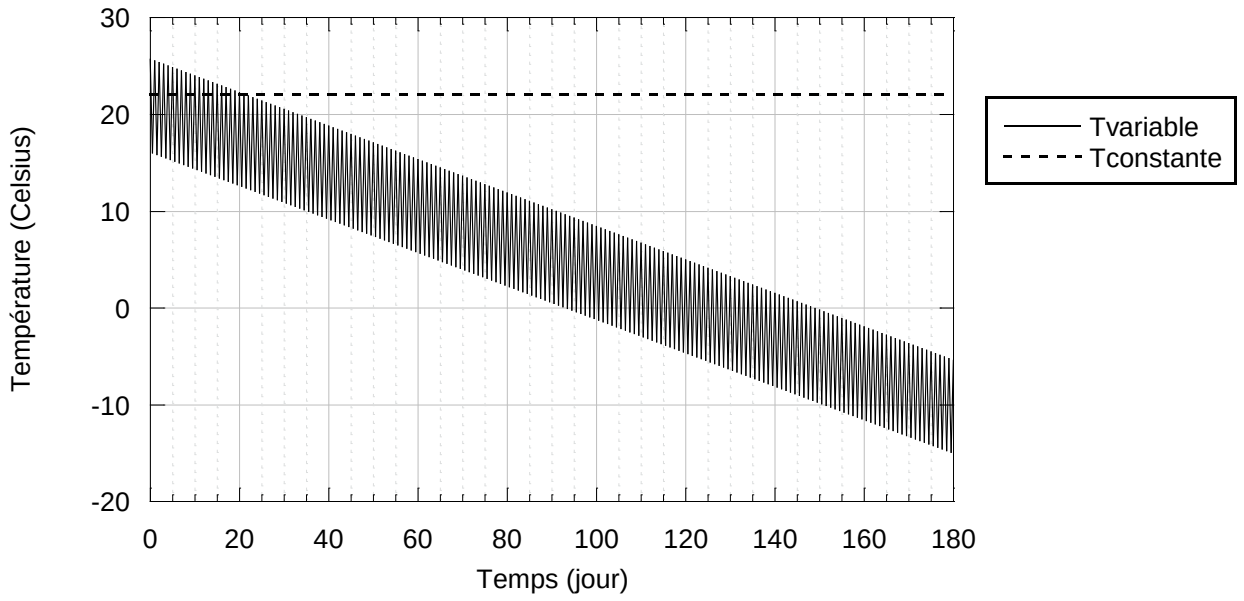


Figure 6.25 Évolution de la température dans le temps pour les études paramétriques

Les analyses sont réalisées sur une période totale de 6 mois après la mise en place du béton de réparation. Il a été considéré que la température moyenne est maximale au début des essais et diminue par la suite. Cela représente le cas le plus critique puisque la diminution de la température devrait induire une contraction supplémentaire des bétons.

6.3.3 Résultat de l'étude paramétrique

L'étude paramétrique permet une analyse plus globale des déformations encourues dans l'ensemble du parapet. Quatre aspects seront évalués dans l'étude, soit l'évolution de la température, des déformations, des contraintes et finalement des patrons de fissuration.

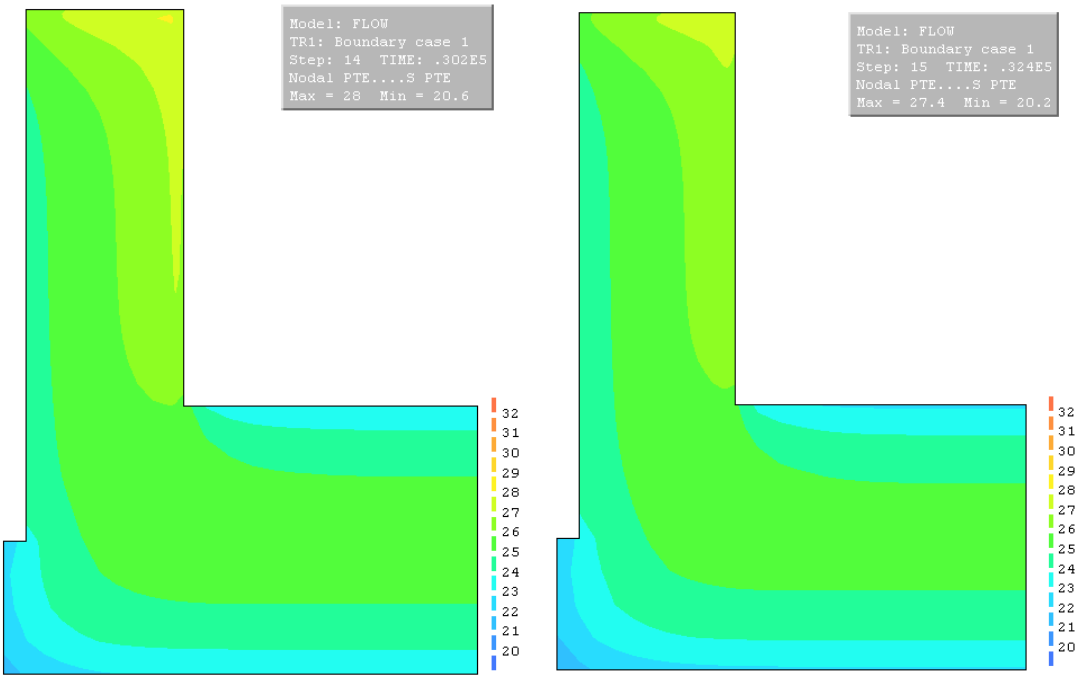
6.3.3.1 Évolution de la température

Bien qu'un changement de température journalier et saisonnier soit appliqué aux parapets, le profil thermique le plus intéressant à analyser reste néanmoins la chaleur dégagée par la réaction d'hydratation suite à l'installation de la réparation. La Figure 6.26 présente la température au niveau de l'axe de symétrie des parapets tout juste avant l'application de la cure humide pour la condition de température ambiante variable avec les 4 bétons de réparation étudiés. Pour sa part, la Figure 6.27 présente les mêmes profils thermiques en condition ambiante.

Selon la Figure 6.26, la température maximale enregistrée dans les parapets est de 28.0 °C dans le BO, 27.4 °C pour le BHP, 30.2 °C pour le BRF et de 32.3 °C pour le BFUP. Ces résultats sont cohérents avec les courbes adiabatiques définies à la Figure 6.2. Cependant, la température similaire mesurée dans le BO et le BHP est due au fait que les courbes adiabatiques sont très similaires pour ces bétons durant les premières heures. En ce qui a trait à la température minimale mesurée, celle-ci est similaire pour tous les bétons, soit en moyenne une valeur de 20.5 °C.

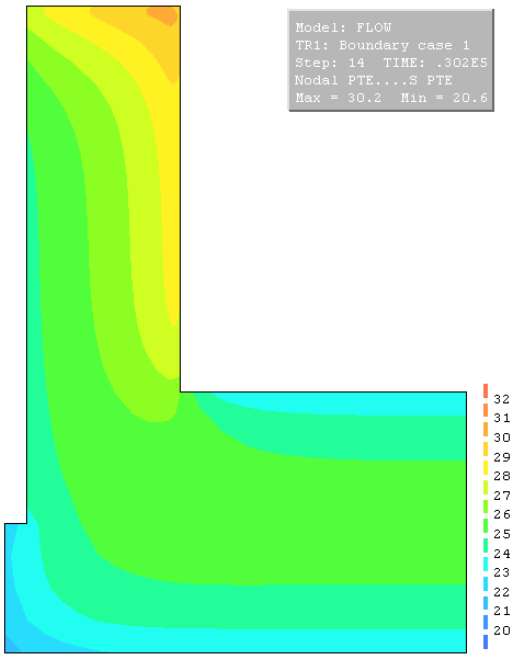
En condition thermique ambiante constante (Figure 6.27), la température maximale mesurée est de 28.3 °C pour le BO, 28.4 °C pour le BHP, 30.7 °C pour le BRF et de 32.5 °C dans le cas du BFUP. Ces valeurs sont très comparables aux valeurs maximales obtenues à la Figure 6.26, soit avec condition ambiante variable. Ainsi, il est possible d'affirmer que la variation de température journalière n'a pas un impact majeur au jeune âge sur la température mesurée dans la réparation. De plus, le coffrage et la feuille de polyéthylène appliqués aux surfaces de la réparation isolent partiellement le béton de réparation des conditions thermiques environnantes.

La propagation de la chaleur est très similaire dans les 8 modèles analysés. En effet, la température maximale survient logiquement sur la fibre supérieure-avant du parapet, soit à l'intersection de la couche supérieure et avant de la réparation. Par la suite, la température diminue linéairement vers l'arrière du parapet, sauf sur la partie supérieure due à la présence de la couche de réparation. Dans le cas du BFUP, cet effet est beaucoup plus prononcé et cause un gradient de température plus important sur toute la hauteur arrière du parapet. Il est aussi possible d'observer une augmentation appréciable de la température interne du trottoir et de la dalle due à l'hydratation du béton de réparation. Cependant, puisque les surfaces extérieures de ces sections sont exposées à l'air libre, celles-ci sont plus froides contrairement aux surfaces du parapet qui sont recouvertes par le coffrage.

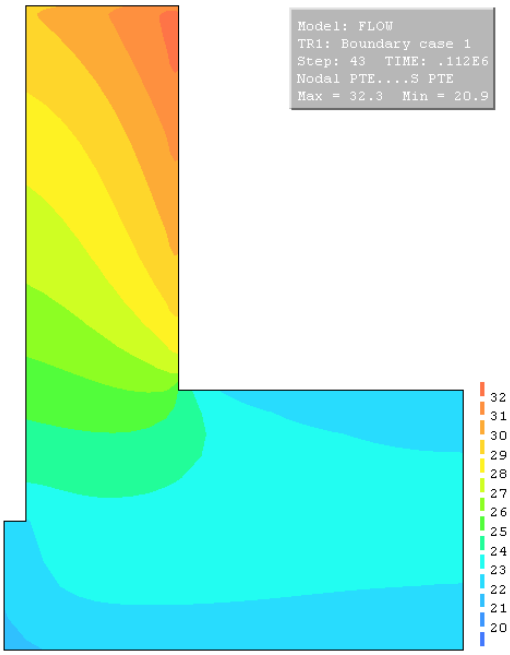


a) BO

b) BHP

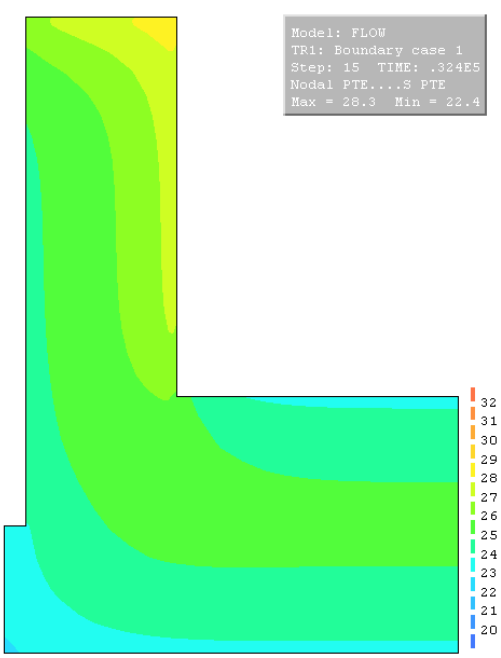


a) BRF

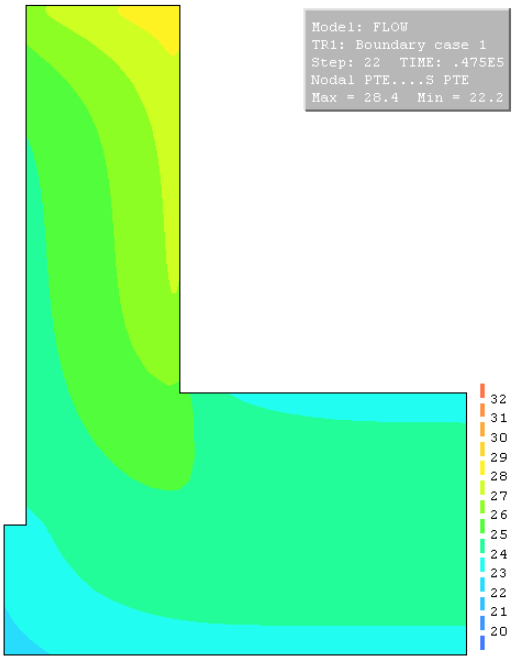


b) BFUP

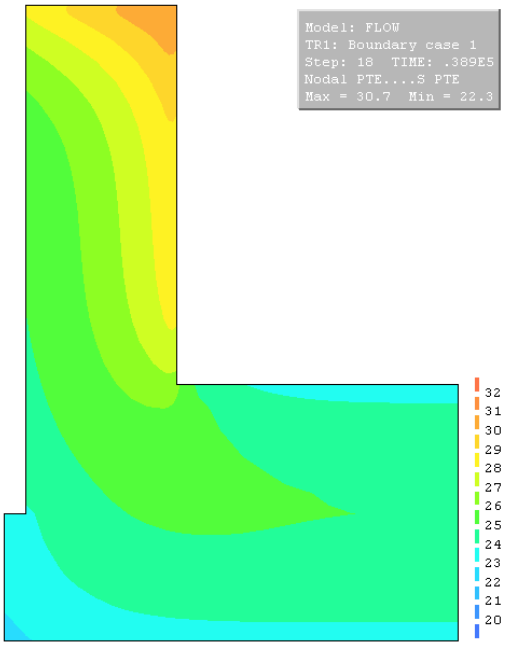
Figure 6.26 Profils thermiques causés par l'hydratation du béton en condition de *Tvariable*



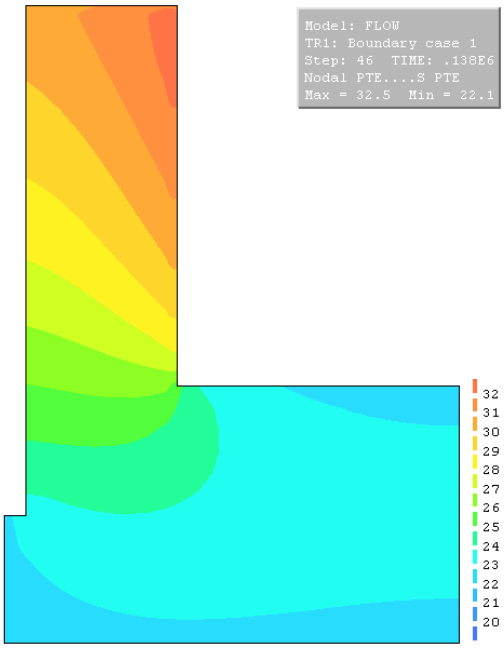
a) BO



b) BHP



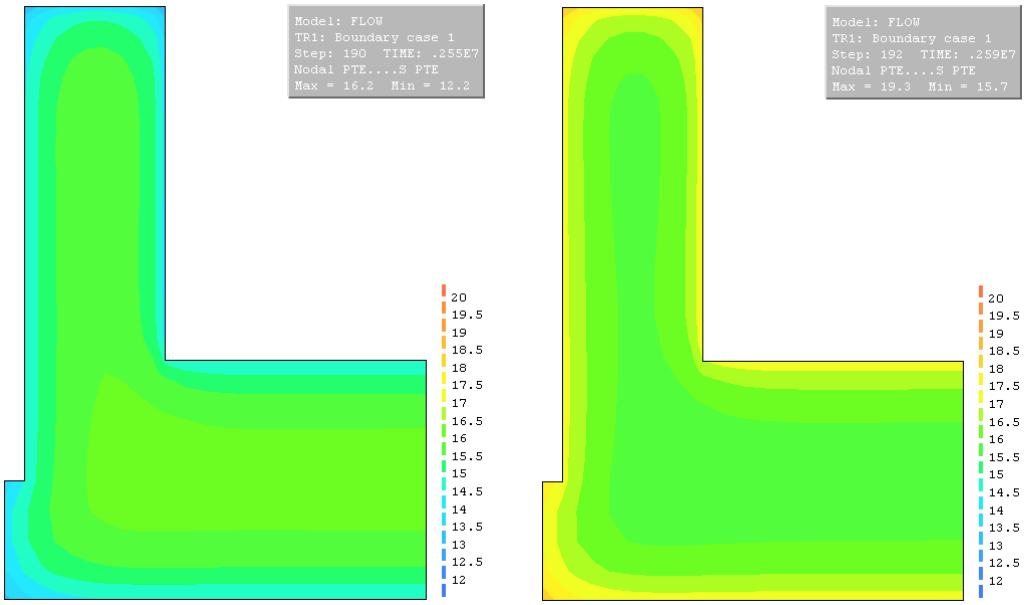
a) BRF



b) BFUP

Figure 6.27 Profils thermiques causés par l'hydratation du béton en condition de *Tconstante*

En ce qui a trait au comportement thermique à long terme, la Figure 6.28 présente la température interne dans le parapet réparé en BFUP à 30 jours, et ce, pour la température ambiante maximale et minimale de la journée. Tel qu'attendu, la température en surface est davantage influencée par le changement de température journalier lorsque les coffrages sont absents et varie de manière beaucoup plus importante par rapport au cœur du parapet, de la dalle et du trottoir. En effet, la température en surface varie entre 12.2 à 19.3 °C pour cette période. Pour sa part, la température au cœur du béton varie légèrement entre 15.7 à 16.2 °C, ce qui est très proche de la température moyenne saisonnière pour cette période, soit une moyenne de 15.6 °C. La variation de température journalière induit donc des cycles de contraction et de gonflement thermiques de la réparation par rapport au parapet et peut potentiellement mener à une fissuration prématurée de la couche de réparation, ou à une augmentation des ouvertures des fissures présentes. Le comportement observé pour la réparation en BFUP est presque identique pour tous les bétons étudiés.



a) Condition journalière froide b) Condition journalière chaude

Figure 6.28 Profil thermique dans le BFUP à 30 jours aux conditions thermiques maximales

En ce qui a trait au profil de température en condition ambiante constante, le béton de réparation libère lentement sa chaleur d'hydratation jusqu'à atteindre la chaleur ambiante. Ensuite, le béton de réparation est en équilibre thermique avec son environnement.

6.3.3.2 Évolution des déformations

La Figure 6.29 présente la déformation dans la couche de réparation aux mêmes positions que celles décrites pour les capteurs SOFO dans les essais au laboratoire (Figure 5.22). La température est analysée à mi-hauteur du béton de réparation mis en place sur l'avant du parapet. Tout d'abord, il est possible d'observer que les déformations sont supérieures dans le BFUP en conditions de température variable et constante par rapport aux autres bétons jusqu'à 40 jours. Cela est causé principalement par un retrait plus élevé de ce béton. Pour leur part, les BO, BHP et BRF affichent une déformation similaire. Dans le cas du BHP, la courbe de déformation se sépare des autres à 40 jours en condition variable et à 32 jours en condition constante. Cela est le résultat de l'initiation d'une fissuration verticale par les effets du retrait du béton de réparation qui relâche la déformation à proximité des points d'analyse.

Au niveau du BFUP, la déformation à 180 jours est de -478 εμ en condition variable et de -158 εμ en condition constante. Cela représente une déformation 3 fois plus grande lorsque les effets thermiques saisonniers sont pris en compte. Au niveau des autres bétons, le BO, BHP et BRF possèdent une déformation en condition variable de -451, -421 et -454 με respectivement et de -137, -119 et -132 με en condition constante. Cela équivaut à une augmentation minimale de 3.3 fois si les effets thermiques saisonniers sont considérés. Il importe de mentionner que l'augmentation des déformations dues aux effets thermiques saisonniers ne va pas nécessairement augmenter les contraintes internes dans le béton de la même proportion, car l'ensemble de la structure béton sous-jacente se contracte sous les effets thermiques. Tout de même, les variations de températures saisonnières peuvent réellement induire un endommagement supplémentaire dans les réparations en béton

Par ailleurs, les effets thermiques journaliers ont aussi un impact notable sur les déformations. Dans le cas du BFUP, cela se traduit par une demi-amplitude moyenne d'environ 7.7 εμ. Au niveau des BO, BHP et BRF, ceux-ci affichent une demi-amplitude similaire de 8.1 εμ. La différence entre le

BFUP et les autres bétons est causée par son coefficient de conductivité plus faible utilisé tel qu'expliqué à la section 6.2.2.1.

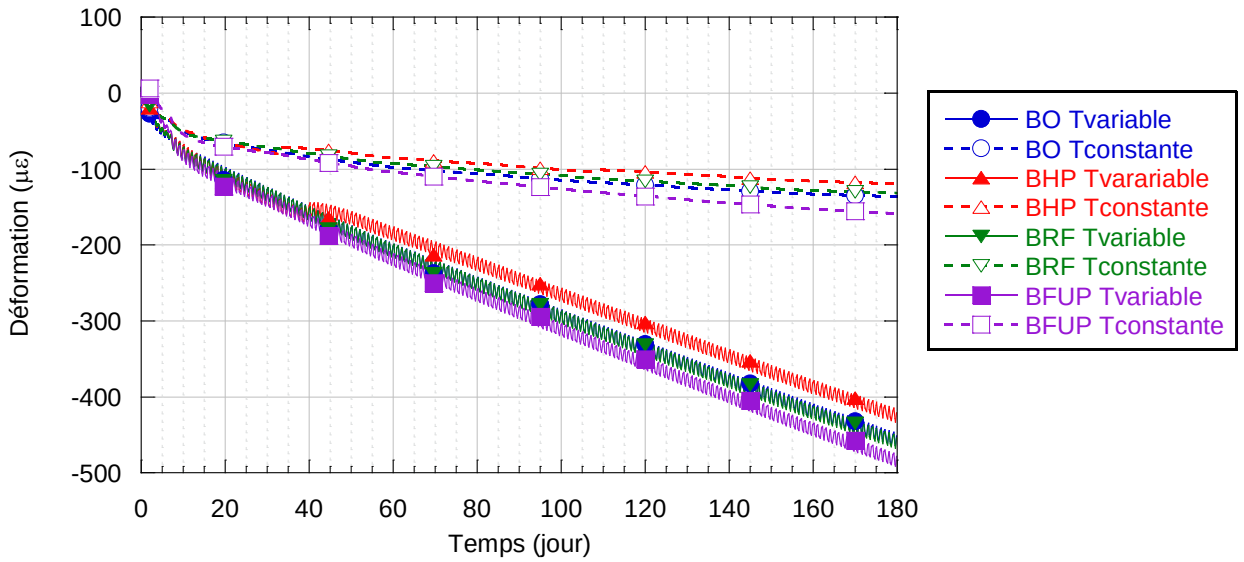


Figure 6.29 Déformation dans la réparation pour les bétons étudiés

6.3.3.3 Évolution des contraintes

L'analyse de l'évolution des contraintes dans les bétons étudiés permet d'évaluer le potentiel de fissuration et le moment où celle-ci s'initie. La Figure 6.30 à la Figure 6.33 présentent les contraintes horizontales (*Hor*) et verticales (*Ver*) dans la réparation au centre du parapet, et ce, pour les deux conditions environnementales étudiées. De plus, pour mieux apprécier le risque de fissuration du béton de réparation, sa résistance en traction dans le temps est aussi illustrée. Lorsque les courbes de contraintes atteignent la courbe de résistance, il y a fissuration localement et la courbe de contraintes diminue selon le comportement post-fissuration introduit dans le modèle. La chute de contraintes se poursuit avec le temps car les effets de retrait du béton et des variations thermiques se poursuivent.

Pour la réparation en BO (Figure 6.30), il est possible d'observer que les contraintes évoluent rapidement après la fin de la cure humide et causent une fissuration à environ 12 jours après la

mise en place du béton. De plus, la fissuration survient pour les deux conditions environnementales considérées. Suite à la fissuration, il est possible d'observer le comportement adoucissant du BO apportée par l'équation d'Hordijk. En ce qui a trait à la résistance post-fissuration plus élevée dans l'axe horizontal en condition constante, celle-ci s'explique par la fissuration additionnelle d'un élément adjacent au point d'analyse, causant ainsi un relâchement des contraintes au point d'analyse et une réduction de l'endommagement.

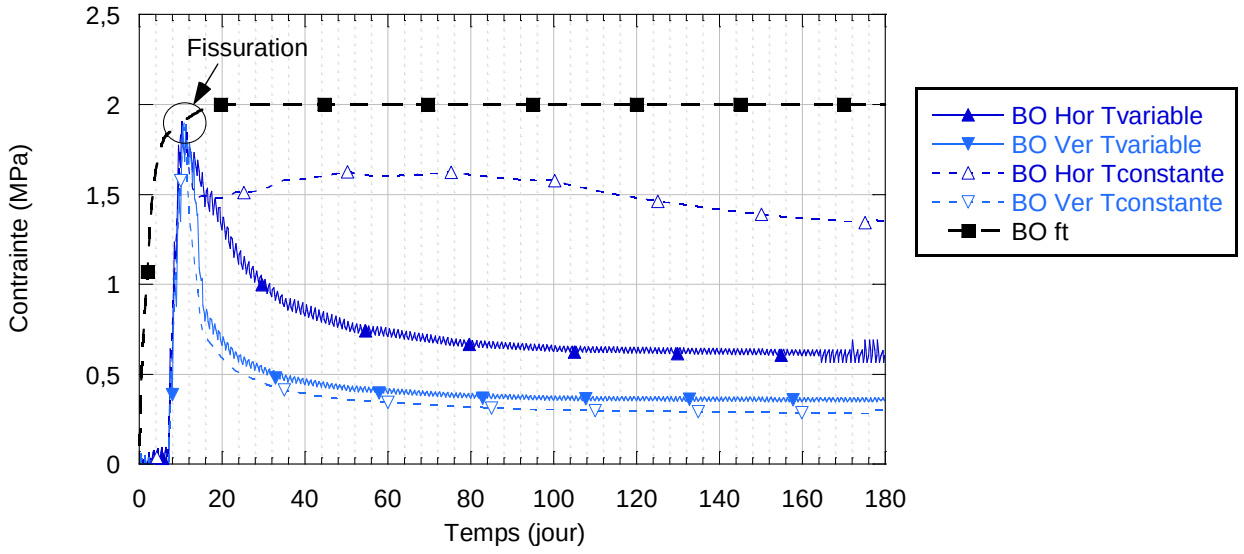


Figure 6.30 Contraintes au centre du parapet réparé en BO en fonction du temps

Dans le cas du BHP (Figure 6.31), la résistance en traction plus élevée du matériau fait en sorte que la première fissuration survient à environ 30 jours lorsque la contrainte horizontale en condition ambiante variable dépasse la résistance en traction. En condition de *Tconstante*, la fissuration survient plus tard à environ 80 jours, ce qui démontre l'impact important du changement thermique saisonnier dans l'initiation de la fissuration du béton de réparation. De plus, les contraintes résiduelles post-fissuration dans les deux cas sont supérieures à celle du BO.

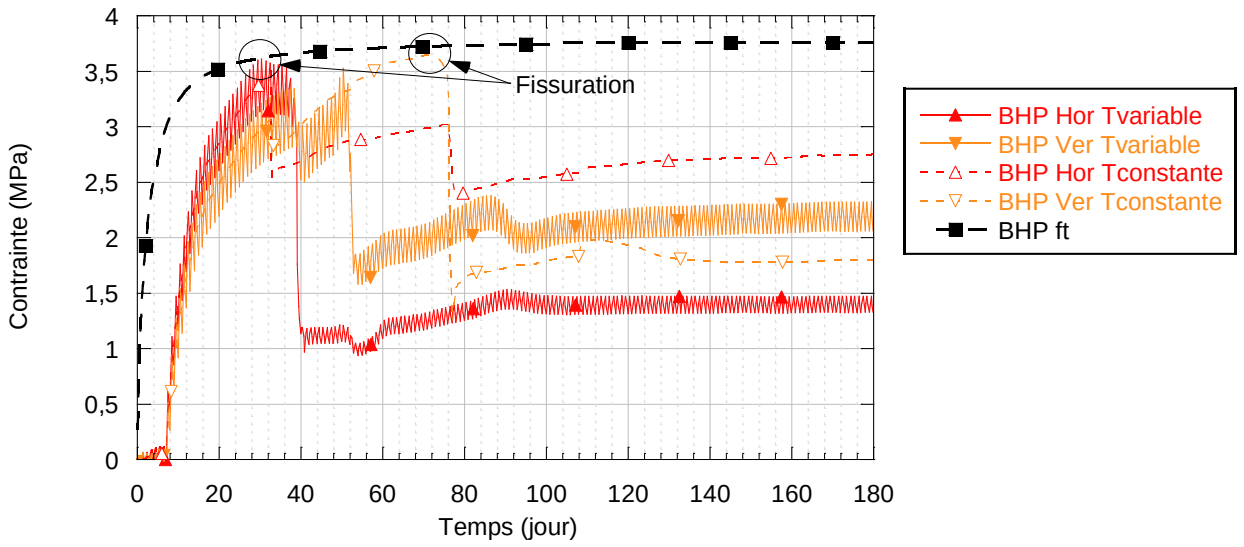


Figure 6.31 Contraintes au centre du parapet réparé en BHP en fonction du temps

La résistance en traction du BRF étant plus faible que le BHP réalisé en laboratoire, le comportement pré-fissuration (Figure 6.32) est similaire à celui de la réparation en BO (Figure 6.30), soit une augmentation rapide des contraintes après la cure humide pour atteindre la fissuration à environ 12 jours.

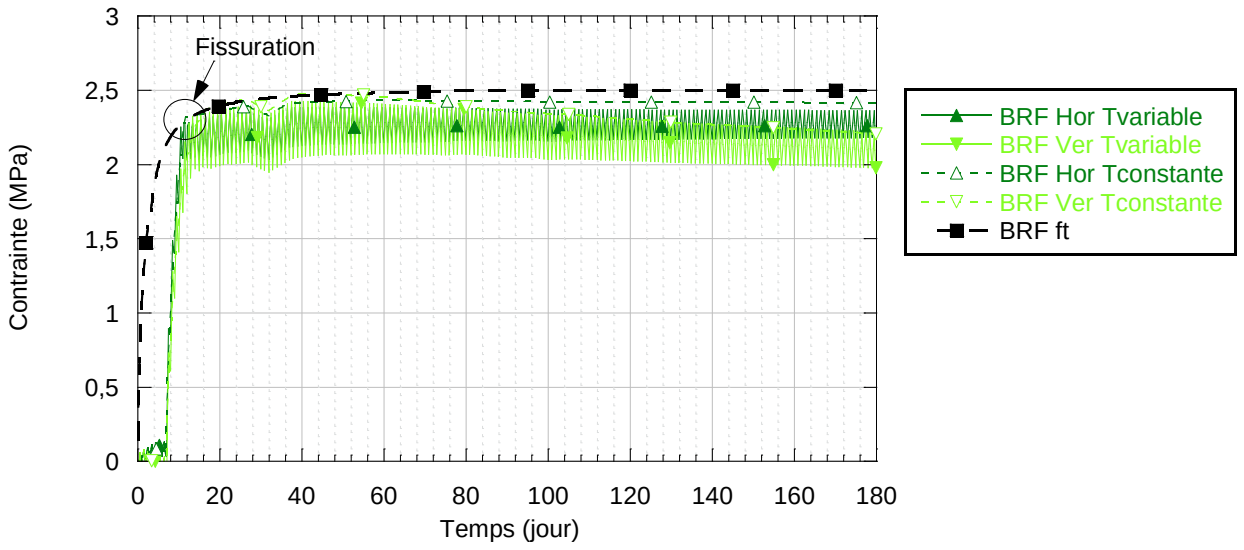


Figure 6.32 Contraintes au centre du parapet réparé en BRF en fonction du temps

Cependant, le comportement post-fissuration est différent. L'action des fibres présentes dans le béton permet de conserver une résistance en traction résiduelle beaucoup plus élevée dans les deux conditions thermiques analysées. La section d'analyse sur les patrons de fissuration permettra de confirmer ultérieurement que les fissures présentes dans le BRF sont d'une ouverture moindre que celles observées dans le BO et le BHP.

Finalement, le comportement de la réparation en BFUP est illustré à la Figure 6.33. Malgré le retrait plus important du BFUP lié à son rapport eau/liant très faible, les contraintes générées dans le béton n'atteignent pas la résistance en traction très élevée du matériau. La contrainte en traction maximale appliquée après 180 jours atteint en moyenne 4.8 MPa dans l'axe horizontal. Pour sa part, la résistance ultime du BFUP à ce moment atteint un peu plus de 11 MPa. Cela présente une réserve de résistance de l'ordre de 2.3. Ainsi, le BFUP devrait garantir une réparation sans fissure avec une excellente perspective de durabilité en comparaison aux autres bétons.

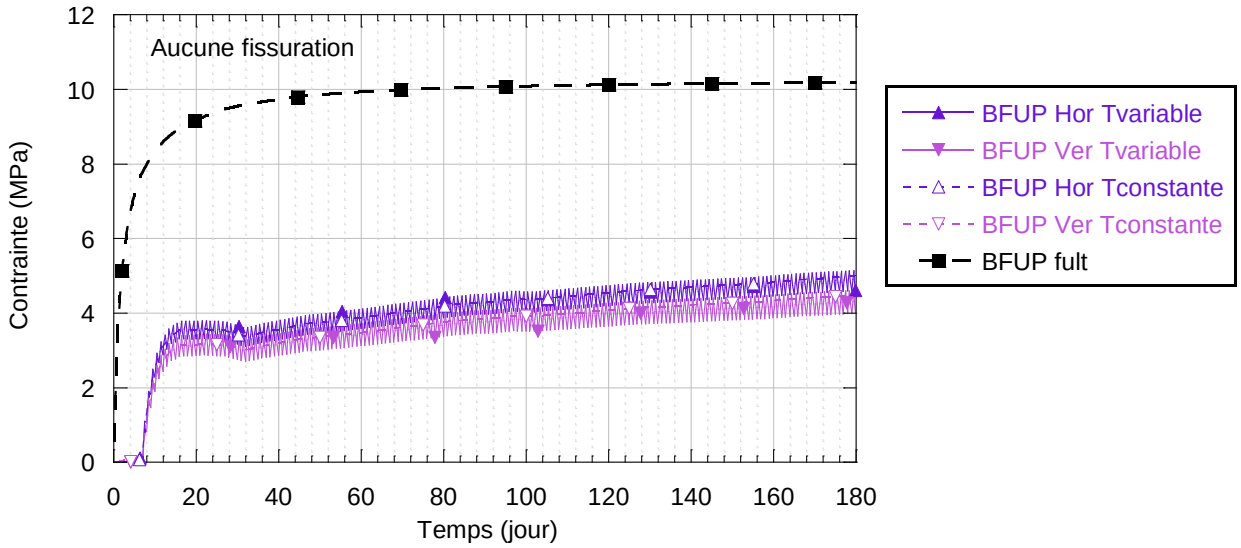


Figure 6.33 Contraintes au centre du parapet réparé en BFUP en fonction du temps

La Figure 6.34 jusqu'à la Figure 6.37, présentent la distribution des contraintes horizontales sur la section transversale du parapet, mesuré à mi-hauteur du parapet, pour chaque type de bétons. Les contraintes sont données à 30 jours pour le maximum (*Tchaude*) et minimum (*Tfroide*) journalier

ainsi que le cas de référence sans cycle de température. Les contraintes en traction sont positives et négatives en compression. On observe dans tous les cas que la réparation se retrouve toujours en traction sous l'effet du retrait et des variations de température. Le béton du parapet à l'arrière de la réparation se retrouve presque toujours en compression.

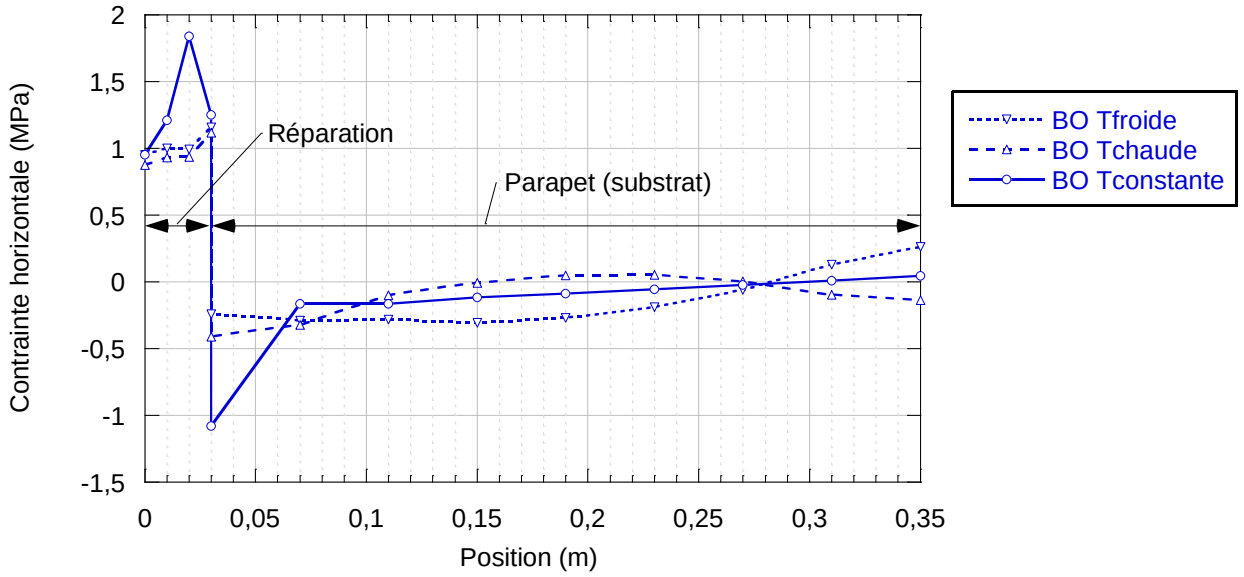


Figure 6.34 Contraintes horizontales dans le parapet réparé en BO à 30 jours

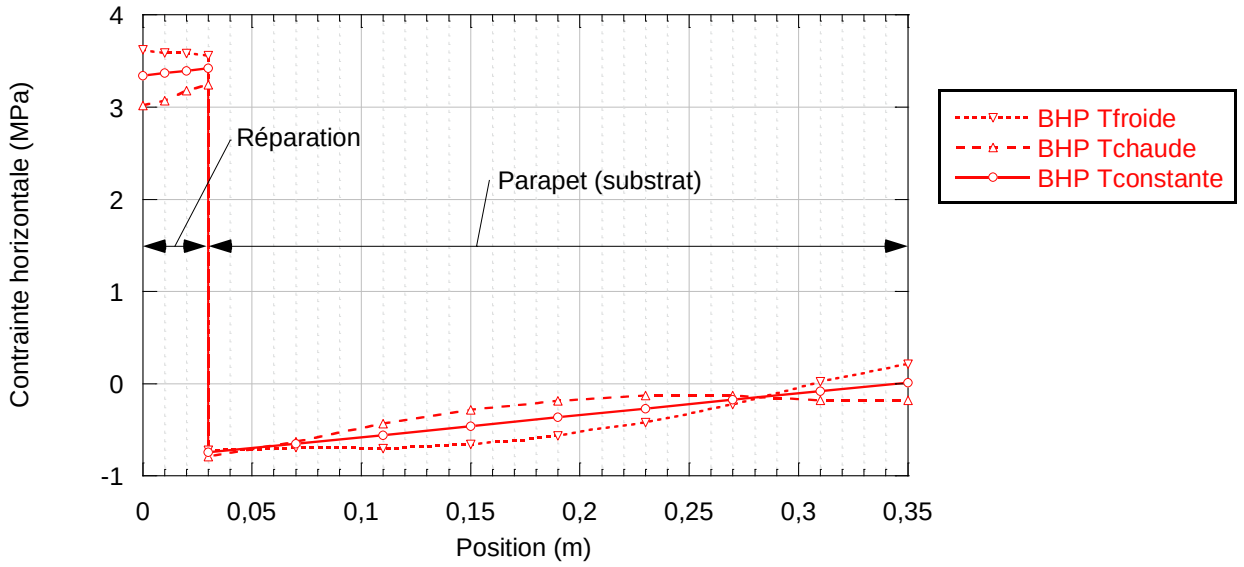


Figure 6.35 Contraintes horizontales dans le parapet réparé en BHP à 30 jours

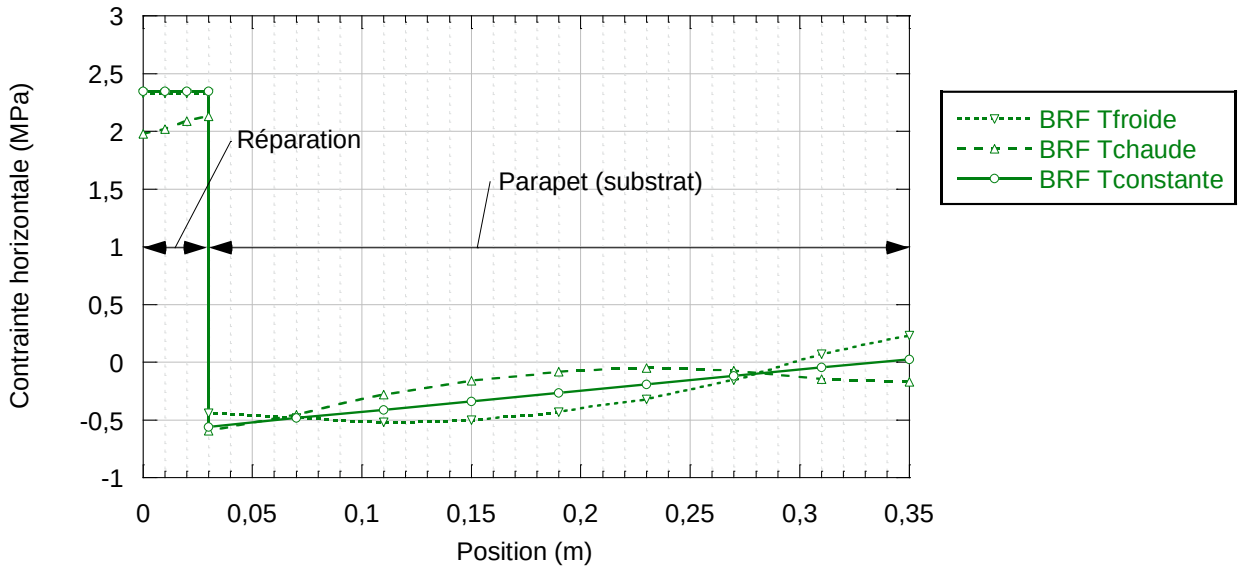


Figure 6.36 Contraintes horizontales dans le parapet réparé en BRF à 30 jours

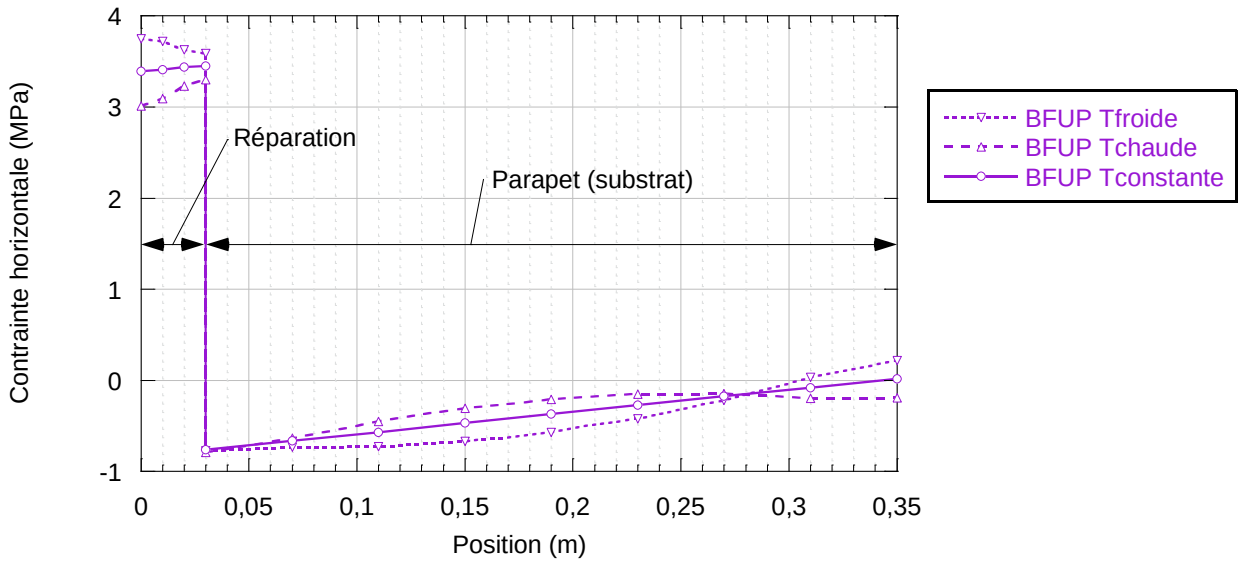


Figure 6.37 Contraintes horizontales dans le parapet réparé en BFUP à 30 jours

Pour les quatre bétons étudiés, l'évolution des contraintes en fonction de l'épaisseur est conséquente avec celle anticipée lors des essais préliminaires (Section 4.1.1.), soit : une contrainte

de traction dans la réparation, une contrainte de compression dans le parapet et une évolution linéaire des contraintes selon l'épaisseur (*Tconstante*) causée par le retrait dans la réparation. Cette distribution des contraintes dans la coupe transversale du parapet est conforme à ce qui est relevé dans la littérature (Habel 2004).

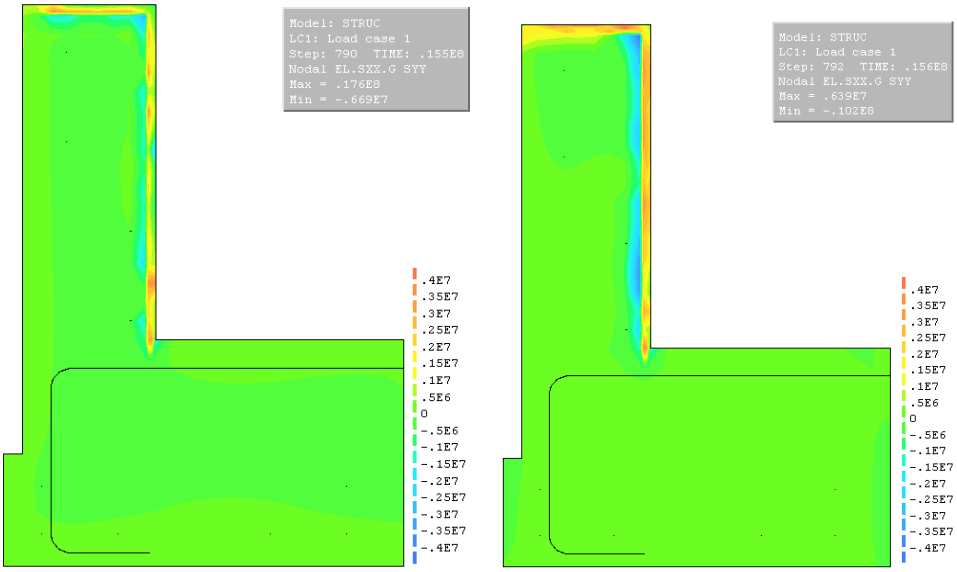
Comme discuté précédemment à la section 6.3.3.1, les cycles de température journaliers affectent principalement le béton en surface. Cela se traduit par l'augmentation des contraintes en périphérie et une réduction au centre en condition de température froide (*Tfroide*) et l'inverse en condition de température chaude (*Tchaude*).

Cependant, la fissuration dans le BO et le BRF a affecté la distribution de la contrainte dans la réparation. Dans le cas de la réparation en BO (Figure 6.34), il est possible d'observer un pic singulier pour *Tconstante* et une évolution inverse des contraintes dans la réparation pour le cas *Tfroide*. Pour le BRF (Figure 6.36), il est possible d'observer un plafonnement des contraintes pour le cas *Tconstante* et *Tfroide*. Le plafonnement des contraintes plutôt qu'un pic singulier comme dans le BO, est causé par la présence de fibres qui assurent une contrainte post-fissuration résiduelle très élevée et beaucoup plus uniforme.

Aussi, il est possible d'observer l'apparition d'une contrainte en traction au dos du parapet. Cependant, dans les quatre cas, celle-ci est négligeable. De plus, les contraintes en traction sont seulement observables en condition froide, ce qui implique que la contrainte à la face arrière est négligeable et est principalement causée par les changements de température.

Pour leur part, le BHP et le BFUP présentent des contraintes horizontales presque identiques, bien que le BFUP possède un retrait total plus élevé que le BHP. Ce phénomène est attribuable au fluage plus élevé du BFUP qui contient un volume de pâte plus élevé qu'un béton conventionnel.

Finalement, la Figure 6.38 présente les contraintes horizontales sur la section centrale complète du parapet réparé en BHP en condition thermique constante et en condition froide à 180 jours. Dans ce cas, il est possible d'observer que le BHP a fissuré dû aux variations et discontinuités locales observées dans la réparation et le béton du substrat. Comparativement, la Figure 6.39 présente la contrainte horizontale pour le parapet réparé en BFUP à pareille échéance. Dans ce cas, les contraintes sont uniformes et varient seulement légèrement selon la hauteur ce qui démontre une réparation saine (sans fissure).



a) Condition froide b) Condition constante

Figure 6.38 Contraintes horizontales dans la coupe transversale du parapet réparé en BHP à 180 jours

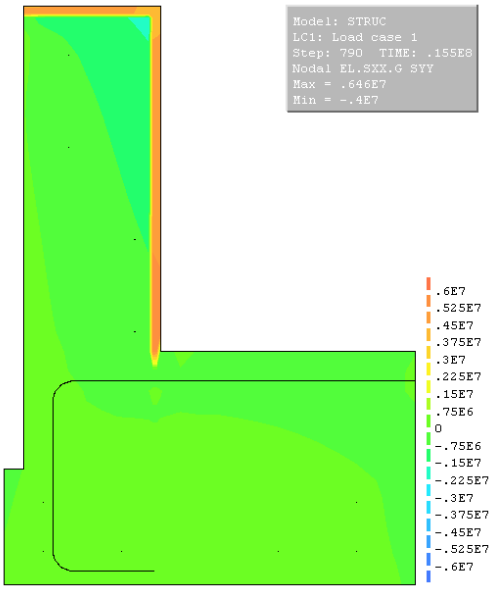


Figure 6.39 Contrainte horizontale dans la coupe transversale du parapet réparé en BFUP à 180 jours en condition froide.

6.3.3.4 Évolution de la fissuration

La Figure 6.40 présente l'ouverture maximale des fissures observée à la surface des parapets en fonction du temps pour les différents bétons et les conditions thermiques étudiées. Les ouvertures de fissure ont été calculées en considérant une longueur caractéristique de 50 mm égale à la taille des éléments du maillage.

Tout d'abord, il est possible d'observer que le BO fissure en premier à 5.5 jours. Le BRF fissure en second à 7 jours, suivi du BHP à environ 30 jours. Pour sa part, le BFUP ne fissure jamais tel qu'observé à la Figure 6.37. Ceci vient préciser les observations faites à la section 6.3.3.3 présentant les contraintes dans les bétons de réparations.

Au niveau de l'ouverture des fissures, elles sont de 0.154 mm et 0.133 mm avec et sans variation de température respectivement à 180 jours pour le BO. Pour sa part, le BHP atteint une ouverture de 0.386 mm et 0.221 mm avec et sans variation de température respectivement à pareille échéance. Cela représente une augmentation relative de 15.8 % de l'ouverture des fissures maximales avec variation saisonnière pour le BO et de 74.5 % pour le BHP.

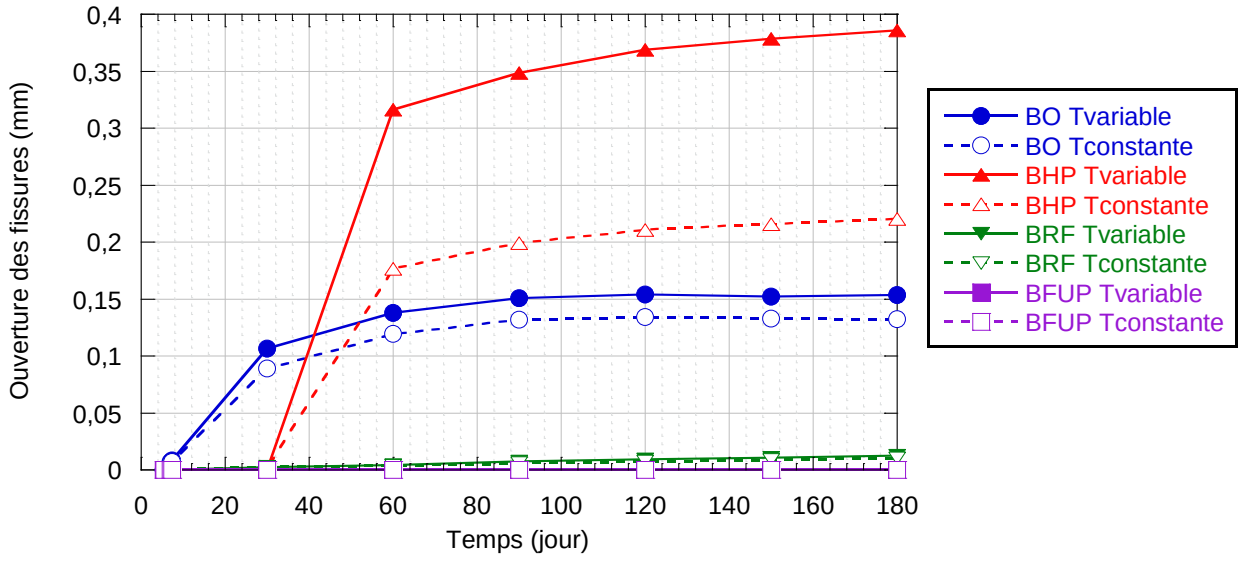
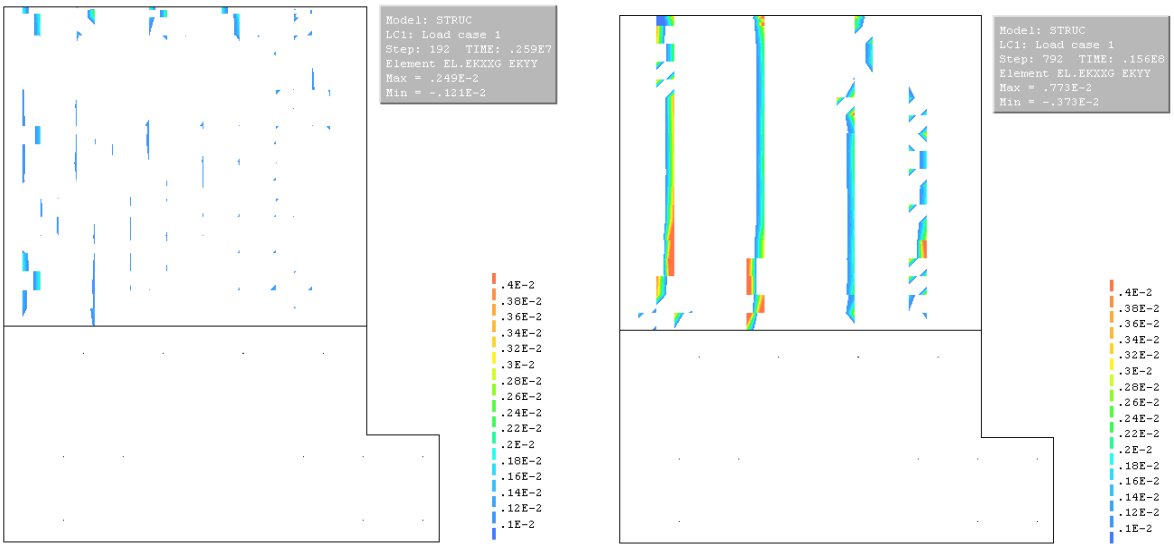


Figure 6.40 Ouverture des fissures en fonctions du temps

Tel que présenté à la Figure 6.8, le retrait dans le BHP est inférieur à celui en BO considéré dans cette étude exploratoire. Ceci aurait pu conduire logiquement à des fissures plus ouvertes pour le BO, cependant le patron de fissuration distinct relié au temps d'initiation de la fissuration différent a mené au présent résultat. La Figure 6.41 présente les patrons de fissurations pour le BO et le BHP à 180 jours à température ambiante constante

Dans le cas de la réparation en BO, la fissuration verticale est apparue tôt et de manière plus diffuse sur le parapet. Les fissures sont demeurées plus fines. Dans le cas de la réparation en BHP, le nombre de fissures observées est plus faible, mais d'une ouverture plus grande. Les fissures sont également apparues plus tardivement.



a) BO b) BHP

Figure 6.41 Patron de fissuration à 180 jours à température ambiante constante

Il est intéressant de noter que l'espacement des fissures observées sur la réparation en BHP est d'environ 200 mm. Ceci correspond assez bien avec les observations faites sur les parapets en BHP coulés en place en chantier qui présentent fréquemment un espacement de fissures verticales de 250 à 300mm à moyen terme

En ce qui a trait au BRF, l'ouverture des fissures avec variations de température saisonnières est de 0.01 mm, et de 0.01 mm à température constante. La faible ouverture de fissure observée est

attribuable au contrôle de la fissuration apporté par les fibres en condition fissurée et concorde avec la contrainte post-fissuration élevée présentée à la Figure 6.32 à la section 6.3.3.3. Dans ce cas, davantage de microfissures surviennent sur la surface entière, ce qui explique l'ouverture très faible observée. De plus, l'ouverture maximale est inférieure à l'ouverture critique de 0.05mm requise pour une augmentation notable du transport de l'eau au droit de la fissure (Charron et al. 2013). Ainsi la durabilité du BRF n'est pas négativement affectée.

Aucun patron de fissuration n'est disponible pour le parapet réparé en BFUP car les contraintes de traction générées dans la réparation sont demeurées inférieures à la résistance à la traction du BFUP (Figure 6.33).

6.4 Conclusions

Les études numériques ont été effectuées en complément aux essais en laboratoire afin d'étendre la portée de l'analyse du comportement en retrait restreint de réparation en béton de parapets de pont. Plus précisément, celles-ci avaient pour objectifs de valider le comportement en déformation des parapets réparés en laboratoire pour en confirmer la validité, et ensuite d'étudier le comportement d'une réparation pour un plus large éventail de matériaux et finalement, la validation d'une réparation sous des conditions de température ambiantes variables (cycles journaliers et saisonniers). Les modélisations ont été réalisées avec le logiciel DIANA 3D.

6.4.1 Reproduction des essais en laboratoire

La calibration des différents modèles de comportements simplifiés (chaleur d'hydratation, retrait, fluage, comportement en traction) a permis de reproduire fidèlement chacun d'entre eux. Cependant, la calibration du modèle complet de parapet incluant tous les phénomènes simultanément s'est révélée plus difficile. Le modèle du parapet permet d'obtenir des tendances adéquates (température, déformation), mais avec parfois une différence appréciable par rapport aux résultats en laboratoire. Il est important de mentionner que les résultats présentés sont l'aboutissement d'un programme exhaustif de simulations ayant permis calibrer les modèles et de déterminer l'impact des différents paramètres constitutifs.

6.4.2 Limites des modélisations

La modélisation de la réaction d'hydratation du béton ainsi que les déformations subséquentes est un exercice difficile, car les différents phénomènes impliqués ont presque tous un effet les uns sur les autres. Ainsi, une grande partie des comportements des matériaux a dû être programmée manuellement dans le modèle afin de tenir compte de ces interactions, notamment dans le cas de la maturité du béton. DIANA propose l'évaluation d'une grande partie des comportements déformationnels en fonction de différents codes de construction. Par contre, ceux-ci ne sont pas adaptés dans le cas du BFUP.

Au niveau de la simulation des comportements déformationnels, certaines hypothèses ont été avancées. Premièrement, il a été considéré que le fluage en compression est similaire à celui en traction. Cela est une approximation généralement adéquate, mais l'amplitude et l'évolution dans le temps n'est pas identique. Par contre, l'évaluation du fluage en traction est difficile et nécessite un équipement spécialisé.

Aussi, les valeurs de retrait utilisées dans le parapet ont été obtenues dans des conditions environnementales complètement différentes de celles auxquelles le parapet serait réellement exposé. Une meilleure analyse de ces déformations en conditions réelles, notamment au niveau du retrait de séchage et endogène, aurait potentiellement permis de suivre les déformations depuis le début de l'application de la réparation. Cependant, cela aurait nécessité une plus grande quantité de béton, d'équipement de mesure et d'espace en laboratoire.

Par ailleurs, l'échauffement des surfaces de béton causé par la radiation du soleil a été négligé dans l'étude paramétrique. Ainsi, les résultats de déformation et contraintes obtenus dans cette analyse sont conservateurs.

Enfin, le décollement de l'interface entre la réparation et le substrat a pu être négligée, car une bonne préparation de surface a été réalisée en laboratoire et a permis d'éviter le phénomène.

6.4.3 Étude paramétrique sur l'impact des bétons de réparation et des conditions thermique

Malgré les difficultés de modélisation rencontrées, les études paramétriques permettent néanmoins d'extraire des tendances générales intéressantes permettant de distinguer le comportement des

bétons de réparation l'un par rapport à l'autre ainsi que l'impact des effets thermiques journaliers et saisonniers sur le retrait restreint. Les observations suivantes ont été faites :

- La réaction d'hydratation est la source principale de chaleur dans le béton au jeune âge. Le coffrage et la jute agissent comme isolant et permettent aux différents bétons de réparation de s'échauffer quelques jours. Les résultats obtenus pour une température ambiante constante ou avec des cycles de température journaliers et saisonniers sont similaires;
- Les cycles de température journaliers affectent principalement la température de la couche externe du béton; la température du cœur de béton varie très peu;
- Les cycles de température saisonniers ont un effet majeur sur les déformations des bétons de réparation du parapet, soit une augmentation des déformations d'environ 1.75 fois à 30 jours et d'un peu plus de 3 fois à 180 jours;
- La susceptibilité à la fissuration des différents bétons de réparation dans le parapet varie selon le type de béton. Le BO ainsi que le BRF fissurent tôt, soit à moins de 10 jours suivant leur fabrication. Le BHP fissure à environ 30 jours alors que le BFUP ne fissure tout simplement pas, quel que soit la condition thermique imposée, à cause de sa résistance élevée en traction;
- Les contraintes de traction à l'endos des parapets sont négligeables pour des réparations minces effectuées sur la face avant de ces derniers;
- Le patron de fissuration des bétons de réparation est fonction du moment de l'initiation de la fissuration du béton. Une fissuration au jeune âge a généré dans les modèles plusieurs petites fissures diffuses, tandis qu'une fissuration tardive a mené à des fissures de plus grande ouverture et plus distancées;
- L'ouverture maximale des fissures observées à 180 jours dans le BO et le BHP ont été respectivement de 0.15 et 0.39 mm respectivement. Les fissures dans le BRF et le BFUP affichent une ouverture inférieure à la limite de 0.05mm requise pour avoir un impact sur le transport de l'eau au droit de la fissure. Ainsi, le BRF et le BFUP offrent un meilleur potentiel de réparation de parapet de pont durable.

CHAPITRE 7 CONCLUSION

7.1 Rappel des objectifs

Le présent projet avait pour but d'évaluer la performance de réparations minces en bétons fibrés à ultra haute performance pour les parapets de pont. De manière plus précise, le projet a été divisé en trois objectifs spécifiques :

1. Tester et analyser en laboratoire le comportement en déformation et le comportement mécanique de parapets réparés en BFUP;
2. Modéliser numériquement le comportement en déformation de parapets réparés en laboratoire;
3. Proposer des recommandations pour la réparation de parapets avec du BFUP.

Le premier objectif a été réalisé avec succès durant le programme expérimental principal. Le comportement déformationnel des parapets réparés a été évalué à l'aide de jauges coulées dans le béton de réparation et dans le béton réparé (substrat). Le comportement mécanique des parapets réparés a été évalué à l'aide d'un vérin hydraulique, de capteurs de déplacement en surface et de capteurs de déformation sur des armatures.

Le second objectif a également été atteint pour l'étude numérique. La modélisation du comportement au jeune âge des différents bétons caractérisés en laboratoire (retrait, fluage et comportement en traction) a été réalisée. La calibration du modèle numérique a montré un comportement similaire aux essais en laboratoire, cependant l'amplitude des déformations numériques présentait parfois des écarts importants par rapport aux résultats expérimentaux.

Finalement, l'analyse des résultats du programme expérimental principal et de l'étude numérique a permis de proposer des recommandations quant à l'utilisation du BFUP pour la réparation de parapets de pont.

Il est important de noter aussi que les résultats, conclusions et recommandations présentés ici sont applicables pour des bétons partageant des propriétés mécaniques et déformationnelles semblables aux bétons étudiés durant ce projet.

7.2 Rétrospective

7.2.1 Comportement déformationnel des parapets

La section de parapet utilisée pour les essais en laboratoire était identique à celle utilisée dans le projet de Thiaw (2014). Cela a permis d'utiliser les données mesurées dans le cadre de son projet en ce qui concerne le comportement du parapet non réparé. Deux parapets ont été fabriqués et réparés. Le premier avec 30 mm de BHP et le second avec 30 mm de BFUP. Une encoche de 50 mm de profondeur a été pratiquée dans le trottoir, sous la réparation mince, afin d'encastrer la réparation à la base. Une cure avec un écoulement d'eau en permanence a été appliquée pendant 7 jours.

Des jauges de déformation et de température ont été coulées dans le substrat et dans la réparation afin d'évaluer les effets thermiques ainsi que les déformations dues au retrait restreint causé par l'application de la réparation.

Les déformations observées dans les réparations à court terme (7 jours et moins) sont principalement attribuables, d'une part, aux effets thermiques engendrés par l'hydratation du béton et le refroidissement apporté par la cure à l'eau et, d'autre part, par les déformations causées par le retrait endogène, le comportement viscoélastique et l'absorption d'eau de cure par le béton. Les déformations à moyen terme sont principalement provoquées par le retrait endogène et de séchage, ainsi que par le comportement viscoélastique du béton.

Après 30 jours, le parapet avec une réparation en BFUP affichait une déformation 11 % plus élevée que celui réparé en BHP à pareille échéance. Cette déformation est attribuée au dégagement de chaleur plus élevé dans le BFUP (environ 8 %) et à un retrait plus élevé (environ 59 % à 28 jours).

La cure humide avec écoulement d'eau a permis d'éviter la formation de fissures localisées dans le BHP et le BFUP à court terme. Par contre, des microfissures ont été observées à moyen terme sur la surface avant du parapet réparé en BFUP. L'ouverture de ces microfissures était inférieure à 0.05 mm. Il a déjà été démontré que de telles microfissures avaient un impact négligeable sur la durabilité du BFUP (Charron et al. 2008).

7.2.2 Comportement mécanique des parapets

Le comportement mécanique des parapets a été testé à l'aide d'un vérin hydraulique horizontal installé à 700 mm au-dessus du trottoir. Le comportement des parapets réparés a été évalué à l'aide de capteurs de déplacement installés en surface et de jauges de déformation installées sur des armatures. La résistance maximale obtenue dans les parapets a été comparée à la charge de conception pondérée donnée par la norme canadienne des ponts (CSA S6-14) pour un parapet de type TL-4.

Lors des essais mécaniques, il a été noté que la réparation de béton (en BHP et en BFUP) encastrée dans le trottoir, grâce à l'encoche, a permis de doubler la force requise pour amorcer une fissuration à la base du parapet par rapport au parapet de référence. La présence de l'encoche semble ainsi utile pour augmenter la durabilité de la réparation en retardant l'ouverture d'une fissure à la jonction entre le parapet et le trottoir. Cependant, une fois la fissuration de l'encoche initiée, l'encoche n'a pas eu d'effet sur la résistance ultime des parapets réparés.

Le parapet réparé en BHP a affiché un comportement à l'ultime similaire au parapet de référence sans réparation. Pour sa part, le parapet réparé en BFUP a présenté une résistance de 71 % plus élevée en condition de service par rapport au parapet de référence et de 4.6 % en condition ultime. Globalement, le parapet réparé en BFUP a démontré une plus grande rigidité en condition fissurée avant d'atteindre la résistance maximale. Le parapet réparé en BFUP a dépassé de 84 % la charge de conception à l'ultime et le parapet réparé en BHP de 78 %. Comparativement, le parapet de référence a dépassé la charge de 76 %. Par ailleurs, aucune délamination des réparations n'a été observée pendant le chargement à l'ultime. Cela permet ainsi d'affirmer que les réparations testées en laboratoire devraient se comporter adéquatement en service.

Tout au long des essais, le patron de fissuration a été relevé à différents intervalles de chargement. Il a été observé que la fissuration s'est initiée plus tard dans la réparation en BFUP par rapport à celle en BHP. Le réseau de fissures qui s'est développé était généralement moins important et plus localisé. L'ouverture des fissures dans la réparation en BFUP était aussi généralement inférieure à celle observée dans la réparation en BHP.

Un carottage à la base de la réparation ainsi qu'un capteur installé pour mesurer le décollement de l'interface de réparation ont confirmé que la préparation en granulats exposés permet d'obtenir un comportement monolithique de la réparation avec le parapet.

7.2.3 Essais numériques

La modélisation numérique des essais a été réalisée avec le logiciel d'éléments finis DIANA 3D. En plus des réparations en BHP et en BFUP évaluées en laboratoire, des réparations en BO et BRF ont aussi été étudiées durant les essais numériques afin d'évaluer leur comportement en retrait restreint et leur potentiel de fissuration à court et moyen termes.

Afin de modéliser adéquatement le dégagement de chaleur causé par l'hydratation, le retrait, le fluage et le comportement mécanique en traction des bétons, des modèles simplifiés ont été développés afin de calibrer ces différents phénomènes par rapport aux essais de caractérisation en laboratoire. Dans de nombreux cas, le comportement mesuré en laboratoire a été inséré manuellement dans les modèles pour maximiser leur précision. Cela a été nécessaire, car le comportement déformationnel du BFUP, notamment en ce qui a trait au retrait et au fluage, ne peut être adéquatement modélisé par les lois de comportements proposés par DIANA. Les modèles numériques ainsi obtenus ont permis de reproduire parfaitement les comportements mesurés en laboratoire.

Par la suite, un modèle simplifié des parapets a été développé. Les éléments redondants ou très faiblement sollicités du parapet testés au laboratoire ont été éliminés afin de réduire le temps d'analyse requis. Les conditions thermiques réelles auxquelles les parapets ont été exposés (température ambiante et température de l'eau de cure) ont été reproduites afin de calibrer le modèle numérique des parapets réparés par rapport aux essais déformationnels effectués en laboratoire.

L'évolution de la température pour les premiers 10 jours a bien été reproduite par les modèles malgré un échauffement plus faible au niveau du BFUP. La prédiction du comportement déformationnel après 10 jours présente les mêmes tendances que celui mesuré en laboratoire, mais les déformations numériques sont de moindres amplitudes. Ainsi, seul le comportement global des parapets réparés a été considéré pour l'étude paramétrique subséquente.

Les essais paramétriques ont permis d'évaluer le comportement d'une réparation pour les 4 bétons étudiés sous des cycles de température journaliers (±4.5 °C) et saisonniers (réduction de 30.2 °C en 6 mois pour la période hivernale) représentatifs de la région de Montréal.

Les essais paramétriques ont permis d'observer que la réaction d'hydratation du béton est la principale source de chaleur au jeune âge dans le béton. Les effets de la température ambiante sont

négligeables, dû à la propriété isolante du coffrage et de l'utilisation de la jute imbibée d'eau durant cette période.

Il a été observé que les cycles de température saisonniers augmentent d'un peu plus que 3 fois les déformations dans tout le volume du parapet. Pour leur part, les cycles de température journaliers affectent principalement la couche externe du béton. Les résultats des modèles indiquent que les cycles de température contribuent significativement au développement des contraintes dans les parapets réparés et de leur fissuration à court et moyen termes.

Le développement de la fissuration dans les parapets réparés a été évalué. Le BO, BHP et le BRF ont présenté des fissures localisées en 30 jours ou moins. La formation d'un patron de fissuration rapproché avec des ouvertures fines s'est développé en 10 jours dans le BO. Le BHP a fissuré à environ 30 jours et formé un réseau de fissures plus distancées (environ 200 mm), mais avec une ouverture de fissure plus grande. La plus grande période de temps requise pour la fissuration est attribuable au développement d'une résistance mécanique en traction plus élevée dans le BHP. Pour sa part, le BRF a fissuré à environ 12 jours, mais dû à la résistance post-fissuration en traction apportée par les fibres, un réseau de microfissures rapprochées s'est développé dans la réparation. Finalement, étant donné sa résistance élevée et sa capacité de déformation écrouissante en traction, le BFUP n'a jamais fissuré.

Puisque les ouvertures des fissures obtenues dans les réparations en BRF et en BFUP étaient inférieures à la limite de 0.05 mm, la pénétration d'eau et d'agent agressifs au droit de ces fissures sera très limitée. Ainsi, ces bétons offrent un excellent potentiel pour réaliser des réparations minces et durables pour un parapet de pont.

7.3 Recommandations

7.3.1 Évaluation en laboratoire et modélisation associée

- Puisque les lois de comportement des analyses numériques ne peuvent adéquatement simuler le comportement du BFUP, il est conseillé pour des analyses futures d'évaluer le comportement déformationnel du BFUP en condition réelle (sous cure humide ou à l'eau) afin de réduire le potentiel d'erreur lors de la calibration des modèles.

- De manière similaire, il serait intéressant d'évaluer le coefficient de dilatation thermique du BFUP utilisé pour augmenter la fidélité des modèles numériques au jeune âge.
- Un autre aspect qui pourrait être analysé dans le futur serait la modélisation de l'absorption de l'eau de cure durant l'essai de retrait restreint. Puisque ce phénomène n'a pas été adéquatement évalué en laboratoire, il a été décidé de faire une mise à zéro des valeurs de retrait à 7 jours. Une calibration de l'absorption permettrait d'améliorer la calibration des modèles. Sinon, il serait aussi possible de faire une analyse avec une cure classique, soit un phénomène pour lequel le comportement déformationel est mieux connu.
- Les réparations de béton ont été évaluées sur des éléments jeunes et exempts de dégradation causée par le temps. Ainsi, il serait intéressant dans le cadre d'un projet futur d'évaluer le comportement mécanique et déformationnelle d'une réparation mince en BFUP appliquée sur un parapet endommagé.

7.3.2 Réparation en béton

L'analyse des résultats du programme expérimental principal et l'étude numérique paramétrique permettent la proposition des recommandations suivantes pour la réalisation de réparations minces en béton.

- L'utilisation d'une cure avec écoulement d'eau (cure de type 3 selon la norme CSA A23.1-14) est nécessaire afin de réduire considérablement l'ouverture de fissures au jeune âge dans le béton de réparation. La durabilité de la réparation est donc fortement liée à la qualité d'application de cette cure en chantier.
- L'utilisation d'un adjuvant réducteur de retrait est conseillée dans le BFUP afin de réduire la microfissuration de surface observée sur le parapet réparé causé par le retrait restreint.
- L'utilisation de BRF et de BFUP est recommandée pour la réalisation de réparations minces sur parapet étant donné le meilleur contrôle de la fissuration offert en condition de retrait restreint. Évidemment, la perspective de durabilité associée à l'utilisation du BFUP sera davantage prolongée avec les indices de durabilité beaucoup plus favorable.
- La résistance mécanique des parapets post-réparation est au minimum équivalente ou supérieur à celle du parapet d'origine pour le BRF et le BFUP respectivement.

- L'utilisation de BFUP comme béton de réparation mince permet d'obtenir un comportement plus rigide en conditions fissurée et une très légère hausse de résistance à l'ultime. La réparation mince en BHP ne modifie pas le comportement mécanique du parapet d'origine.
- L'encastrement de la réparation du parapet dans le trottoir, si elle est envisageable, offre une protection contre l'infiltration d'eau à travers l'interface de réparation entre le parapet et le trottoir. De plus, l'encastrement de la réparation augmente la force qui doit être appliquée sur le parapet pour causer la première fissuration mécanique.

7.4 Conclusion générale

Les essais en laboratoire ont confirmé l'intérêt d'utiliser un BFUP, tels qu'étudiés dans le présent projet, pour la réalisation de réparations minces sur parapet. Le BFUP autoplaçant s'installe facilement dans le coffrage et n'exige pas de traitement particulier par rapport à la réparation traditionnelle. Il est recommandé d'utiliser un adjuvant réducteur de retrait pour éviter la microfissuration de la réparation. Il importe cependant de mentionner que même sans adjuvant réducteur de retrait, aucune macrofissure localisée n'a été observée sur le parapet réparé avant le chargement mécanique. Le comportement mécanique du parapet réparé en BFUP s'est révélé excellent. La force requise pour créer une fissuration localisée dans le parapet a été augmentée et le parapet a eu un comportement plus rigide en condition fissurée. La résistance à l'ultime pour le parapet réparée en BFUP est 78 % plus grande que la force de conception pondérée (227 kN) et 4.6 % plus élevée que la résistance ultime du parapet de référence. La résistance à l'interface du BFUP a été excellente, car aucune fissuration n'a été observée à cet endroit.

Les études numériques ont démontré que malgré l'augmentation significative des déformations dans les parapets réparés par les cycles de température journaliers et saisonniers, la capacité de déformation et la résistance en traction très élevé du BFUP permet d'éviter la formation de fissures localisées dans la réparation.

L'ensemble de ces résultats démontrent la pertinence d'effectuer des réparations minces de parapet avec du BFUP.

RÉFÉRENCES

ACI 209.2R-08 (2008). Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete, ACI Committee 209**:** 45.

Acker, P. and F.-J. Ulm (2001). "Creep and shrinkage of concrete: physical origins and practical measurements." Nuclear Engineering and Design **203**(2–3): 143-158.

ASTM International (2014). Standart Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. Unites Stats, ASTM International. **C157/C157M-08**.

ASTM International (2015). Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression. United States, ASTM International. **C514/C512M-15:** 5.

Austin, S., et al. (1999). "Shear bond testing of concrete repairs." Cement and Concrete Research **29**(7): 1067-1076.

Bastien-Masse, M. (2010). Étude du comportement déformationnel de des bétons de réparation. Département des Génies Civil, Géologique et des Mines. Montréal, École Polytechnique de Montréal. **Maîtrise:** 196.

Beaurivage, F. (2009). Étude de l'influence des paramètres structuraux sur les lois de comportement des bétons fibrés pour la conception de structures. Département des génies civil, géologique et des mines. École Polytechnique de Montréal, École Polytechnique de Montréal. **Maîtrise:** 266.

Bernard, O. (2000). Comportement à long terme des éléments de structure formés de bétons d'âges différents. Département de génie civil. Laussane, École Polytechnique Fédéral de Laussane. **Doctorat:** 189.

Bissonnette, B., et al. (2006). "Concrete Removal Techniques: Influence on residual cracking and bond strength." Concrete International **December 2006**: 49-55.

Bissonnette, B. and M. Pigeon (1995). "Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes." Cement and Concrete Research **25**(5): 1075-1085.

Bissonnette, B. and M. Pigeon (2000). "Le comportement viscoélastique du béton en traction et la compatibilité déformationnelle des réparations." Materials and Structures **33**(March 2000): 108-118.

Bissonnette, B., et al. (2007). "Tensile Creep of Concrete: Study of Its Sensitivity to Basic Parameters." ACI Matérials Journal(July-August 2007): 360-368.

Bjøntegaard, Ø. (1999). Thermal dilation and autogenous deformation as driving forces to self-induced stresses in high performance concrete, Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet.

Charron, J.-P. (2003). Contribution à l'étude du comportement au jeune âge des matériaux cimentaires en conditions de déformations libre et restreinte. Département de génie civil, faculté des Sciences et de Génie. Québec, Université Laval. **Doctorat:** 332.

Charron, J.-P. (2007). Technique du béton. École Polytechnique de Montréal, Presse internationales Polytechnique.

Charron, J.-P. and J. Beaulieu (2009). Matériaux de génie civil: Béton, Maçonnerie, Ciment. École Polytechnique de Montréal, Presse internationales Polytechniques.

Charron, J.-P., et al. (2008). "Transport properties of water and glycol in an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under high tensile deformation." Cement and Concrete Research **38**(5): 689-698.

Charron, J.-P. and C. Desmettre (2013). Intérêt de l'utilisation des bétons renforcés de fibres pour la construction d'ouvrage d'art durables. SR13-01. Montréal, École Polytechnique de Montréal**:** 40.

Conseil du trésor Québec (2015). Les infrastructures publique du Québec

Plan québécois des infrastructure 2015-2015

Plan annuels de gestion des inverstissements publics en infrastructures 2015-2016. C. d. trésor. Québec, Gouvernement du Québec**:** 127.

Corinaldesi, V. and G. Moriconi (2012). "Mechanical and thermal evaluation of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concretes for engineering applications." Construction and Building Materials **26**(1): 289-294.

Courard, L., et al. (2014). "Near-to-surface properties affecting bond strength in concrete repair." Cement and Concrete Composites **46**: 73-80.

CSA A23.1-14/CSA A23.2-14 (2014). Concrete Materials and Methods of Concrete Construction/Test methods and Standard Practices for Concrete, CSA.

CSA S6-14 (2014). Code canadien sur le calcul des ponts routiers, CSA**:** 1730.

De Schutter, G. and L. Taerwe (1996). "Degree of hydration-based description of mechanical properties of early age concrete." Materials and Structures **29**(6): 335.

Emmons, P. H. and A. M. Vaysburd (1996). "System concept in design and construction of durable concrete repairs." Construction and Building Materials **10**(1): 69-75.

Garbacz, A., et al. (2006). "Characterization of concrete surface roughness and its relation to adhesion in repair systems." Materials Characterization **56**(4–5): 281-289.

Gouvernement du Canada (2016). "Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1971 à 2000." 2016, from http://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/results_f.html?stnID=5415.

Grigoriadis, K. (2016). "Use of laser interferometry for measuring concrete substrate roughness in patch repairs." Automation in Construction **64**: 27-35.

Habel, K. (2004). Structural behaviour of elements combining ultra-high performance fibre reinforced conretes (UHPFRC) and reinforced concrete. Faculté de l'environnement Natural, Architectural et Construit. Lausanne, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. **Doctorat:** 195.

Habel, K., et al. (2006). "Autogenous deformations and viscoelasticity of UHPFRC in structures. Part I: experimental results." Magazine of Conrete Research **58**(3): 135-145.

Habel, K., et al. (2006). "Autogenous deformations and viscoelasticity of UHPFRC in structures. Part II: numerical modelling." Magazine of Conrete Research **58**(3): 147-156.

Habel, K., et al. (2006). "Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC)." Cement and Concrete Research **36**(7): 1362-1370.

Habert, G., et al. (2013). "Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes." Cement and Concrete Composites **38**: 1-11.

Hilaire, A., et al. (2014). "Modeling basic creep in concrete at early-age under compressive and tensile loading." Nuclear Engineering and Design **269**: 222-230.

Holt, E. E. (2001). Early Age Autogenouts Shrinkage of Concrete. V. B. a. Transport, VTT Publication.

Iskhakov, I., et al. (2013). "High performance repairing of reinforced concrete structures." Materials & Design **44**: 216-222.

Kamal, A., et al. (2008). "Evaluation of crack opening performance of a repair material with strain hardening behavior." Cement and Concrete Composites **30**(10): 863-871.

Kamal, M. M., et al. (2014). "Behavior and strength of beams cast with ultra high strength concrete containing different types of fibers." HBRC Journal **10**(1): 55-63.

Lee, Y., et al. (2009). "Experimental study on the convective heat transfer coefficient of early-age concrete." Cement and Concrete Composites **31**(1): 60-71.

Loukili, A. (1996). Etude du retrait et du fluage de Bétons à Ultra-Hautes Performances.

Makita, T. and E. Brühwiler (2015). "Damage models for UHPFRC and R-UHPFRC tensile fatigue behaviour." Engineering Structures **90**: 61-70.

Mohammadi, M., et al. (2014). "Influence of silica fume and metakaolin with two different types of interfacial adhesives on the bond strength of repaired concrete." Construction and Building Materials **51**: 141-150.

Momayez, A., et al. (2005). "Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials." Cement and Concrete Research **35**(4): 748-757.

Morgan, D. R. (1996). "Compatibility of concrete repair materials and systems." Construction and Building Materials **10**(1): 57-67.

Naaman, A. (2003). "Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites." High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 4 (HPFRCC 4): 95-113.

Namy, M. (2012). Structural behavior of cast-in-place and precast concrete barriers anchored to bridge deck overhangs and subjected to transverse static loading. Département des génie Civil, Goélogique, et des Mines. Montréal, École Polytechnique de Montréal. **Master:** 226.

Richard, P. and M. Cheyrezy (1995). "Composition of reactive powder concretes." Cement and Concrete Research **25**(7): 1501-1511.

Rossi, P., et al. (2013). "Comparison of concrete creep in tension and in compression: Influence of concrete age at loading and drying conditions." Cement and Concrete Research **51**: 78-84.

Tayeh, B. A., et al. (2013). "Utilization of Ultra-high Performance Fibre Concrete (UHPFC) for Rehabilitation – A Review." Procedia Engineering **54**: 525-538.

Thiaw, A. (2014). Conception et optimisation de parapets préfabriqués avec trottoir intégré en béton renforcé de fibres pour les ponts. Département des Génies Civil, Géologique, et des Mines. Montréal, École Polytechnique de Montréal. **Maîtrise:** 152.

TNO DIANA (2016, 2010). "User's Manual." 2016, from https://dianafea.com/manuals/d94/Diana.html.

Transport Québec (2017). "Transport Québec - Infrastructure de recherche." Retrieved 21 août 2017, 2017.

Vaysburd, A. M. (2006). "Holistic system approach to design and implementation of concrete repair." Cement and Concrete Composites **28**(8): 671-678.

Vaysburd, A. M. and P. H. Emmons (2000). "How to make today's repairs durable for tomorrow — corrosion protection in concrete repair." Construction and Building Materials **14**(4): 189-197.

Ville de Montréal (2017). "Bilan 2016 des actifs des ponts et tunnels." Retrieved 21 août, 2017, from http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/transports_fr/media/documents/bilan2016_ponts_tunnels_juil2017.pdf.

Yang, S. L., et al. (2009). "Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)." Construction and Building Materials **23**(6): 2291-2298.

Yu, R., et al. (2014). "Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)." Cement and Concrete Research **56**: 29-39.

Zhao, Q., et al. (2016). "Effect of fiber types on creep behavior of concrete." Construction and Building Materials **105**: 416-422.

ANNEXE A DIMENSIONNEMENT DES GOUJONS EN BÉTON POUR ESSAI PRÉLIMINAIRE

La Figure A.1 présente les forces appliquées sur un goujon et les cas de résistance à valider.

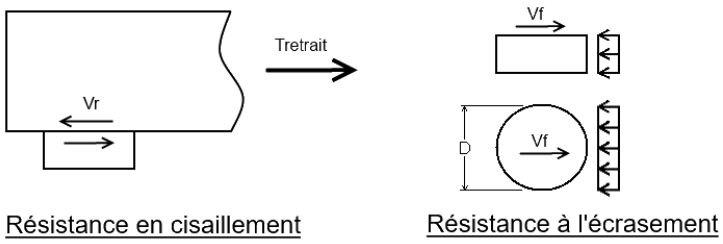


Figure A.1 Cas de chargement à valider pour la conception des goujons

Selon la figure précédente, les goujons doivent être validés en cisaillement et à l'écrasement. Afin de valider la résistance à l'écrasement du béton et de l'acier, une aire équivalente est utilisée. Celle-ci est donnée par l'équation (A.1)

$$A_{eq} = d \cdot t_w \tag{A.1}$$

où d et t_w sont le diamètre et l'épaisseur du goujon respectivement. Dans ce cas, l'épaisseur est celle de l'âme de la section d'acier, soit une épaisseur de 6.86 mm.

Selon les équations données à la section 4.1.1, la déformation due au retrait est obtenue par l'équation (A.2)

$$\Delta_s = (\mu \cdot \varepsilon) \cdot s \tag{A.2}$$

où Δs est l'allongement entre deux goujons, μ le degré d'entrave de la section et s la distance centre à centre entre deux goujons. Par ailleurs, la force équivalente appliquée pour allonger le béton d'une valeur Δs similaire est donnée par l'équation (A.3).

$$\Delta_s = \frac{s \cdot T_{retrait} \cdot \varphi_{new}}{E_{new} \cdot A_{new}} \tag{A.3}$$

En substituant l'équation (A.2) dans (A.3), l'équation définissant la valeur de T_{retrait} en fonction des déformations prend la forme suivante.

$$T_{retrait} = (\mu \cdot \varepsilon) \cdot E_{new} \cdot A_{new} \cdot \varphi_{new} \tag{A.4}$$

L'utilisation du degré d'entrave dans l'équation précédente permet de considérer la réduction des efforts causés par le retrait restreint. Par contre, les équations admettent un effort constant maximal sur toute la surface de la section de béton, contrairement au patron de contrainte illustré à la Figure 4.1, soit une contrainte variable de $\sigma_{\text{new.1}}$ à $\sigma_{\text{new.2}}$. Aussi, en observant l'équation (A.4), la contrainte appliquée sur les goujons est indépendante de la distance entre ceux-ci. Une hypothèse de calcul supplémentaire est donc requise pour trouver la force de conception par goujon.

Une approche inspirée du dimensionnement des goujons dans un système de dalles mixtes est considérée. Celle-ci est illustrée à la Figure A.2.

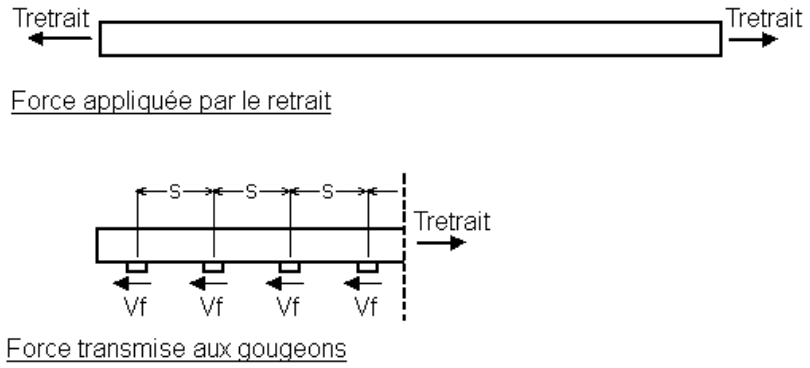


Figure A.2 Hypothèse de calcul de la distribution des efforts dans les goujons

Ainsi, la moitié des goujons reprennent de manière équivalente les efforts de traction causés par le retrait restreint. Cette hypothèse admet une certaine plasticité au niveau des goujons, ce qui permet d'atteindre un V_r similaire pour tous les goujons. Puisque le BFUP possède une phase d'écrouissage en traction, cette hypothèse est donc acceptable.

La résistance à l'écrasement de l'acier est donnée par l'équation (A.5)

$$Br_{acier} = 3 \cdot \varphi_{Br} \cdot A_{eq} \cdot F_u \tag{A.5}$$

où φ_{Br} est égal à 1 en condition de laboratoire et F_u est égale à 450 MPa pour un acier standard de type W350. L'équation (A.6) présente la résistance à l'écrasement du béton

$$Br_{béton} = 0.85 \cdot \varphi_c \cdot f_c(t) \cdot A_{eq} \tag{A.6}$$

où φ_C est égal à 1 en condition de laboratoire et f_c la résistance à la compression en fonction du temps. Ici, f_c est estimée à 115.8 MPa à 28 jours pour le BFUP, telle que discutée à la section 4.1.2.3. En comparant les équations (A.5) et (A.6), il est possible de déterminer que l'équation de l'écrasement du béton contrôle. Finalement, la résistance au cisaillement est estimée avec l'équation 22-2 du *Concrete Design Handbook* (CDH) pour un béton sans armature.

$$V_r = \frac{2}{3} \cdot \left(0.18 \cdot \Delta \cdot \varphi_c \cdot \sqrt{f'_c(t)} \cdot \frac{D^2 \cdot \pi}{4}\right) \tag{A.7}$$

où λ est égal à 1 pour un béton de densité normal et Φ_C est égal à 1 en conditions de laboratoire.

Finalement le nombre de goujons requis ainsi que l'espacement maximal entre ceux-ci est donné par les équations suivantes.

$$Nb_{goujons} = Plafond\left(2 \cdot max\left(\frac{T_{retrait}}{min(Br_{acier}; Br_{béton}; V_r)}; 1\right)\right) \tag{A.8}$$

$$S_{max} = \frac{L_{essai}}{(Nb_{gougeon} - 1)} \tag{A.9}$$

où L_{essai} est de 4000 mm, soit la longueur des poutres d'acier utilisées.

À l'aide des équations (A.8) à (A.9), le Tableau A.1 présente la distance requise entre les goujons en fonction du diamètre de ceux-ci.

Tableau A.1 Espacement minimal entre les goujons en béton en fonction de leur diamètre

D **(pouce)**	**Temps (jour)**	$T_{retrait}$ **(kN)**	**Résistance**				**Position goujon**	
			Br_{Acier} **(kN)**	Br_{Beton} **(kN)**	V_r **(kN)**	**Min (kN)**	**Nombre**	S_{max} **(mm)**
0.25	3.0	2.5	58.8	2.0	27.6	2.0	3.0	2000.0
0.25	7.0	20.4	58.8	3.0	34.2	3.0	14.0	307.7
0.25	28.0	39.5	58.8	4.3	40.9	4.3	19.0	222.2
0.50	3.0	2.5	117.6	3.9	110.3	3.9	2.0	4000.0
0.50	7.0	20.4	117.6	6.0	136.7	6.0	7.0	666.7
0.50	28.0	39.5	117.6	8.6	163.6	8.6	10.0	444.4
0.75	3.0	2.5	176.4	5.9	248.2	5.9	2.0	4000.0
0.75	7.0	20.4	176.4	9.0	307.6	9.0	5.0	1000.0
0.75	28.0	39.5	176.4	12.9	368.1	12.9	7.0	666.7
1.00	3.0	2.5	235.2	7.8	441.3	7.8	2.0	4000.0
1.00	7.0	20.4	235.2	12.0	546.9	12.0	4.0	1333.3
1.00	28.0	39.5	235.2	17.2	654.4	17.2	5.0	1000.0
1.25	3.0	2.5	294.0	9.8	689.5	9.8	2.0	4000.0
1.25	7.0	20.4	294.0	15.0	854.6	15.0	3.0	2000.0
1.25	28.0	39.5	294.0	21.4	1022.5	21.4	4.0	1333.3
1.50	3.0	2.5	352.8	11.7	992.9	11.7	2.0	4000.0
1.50	7.0	20.4	352.8	18.0	1230.6	18.0	3.0	2000.0
1.50	28.0	39.5	352.8	25.7	1472.4	25.7	4.0	1333.3

À partir du tableau précédent, il est possible de constater que la résistance à l'écrasement du béton au niveau du goujon est le facteur limitatif de la résistance. De plus, avec l'évolution du temps, les forces appliquées sur les goujons ont tendance à augmenter, ce qui nécessite plus de goujons. Par ailleurs, l'utilisation de goujons de plus grandes tailles vient évidemment réduire le nombre requis.

Avant d'effectuer un choix quant à la quantité et la taille des trous à perforer dans l'âme de la section d'acier, il est important de comparer le système proposé à la structure simplifiée. Dans le cas d'une faible quantité de goujons utilisés, si une fissuration complète de la section de béton survient, les deux parties seront libres de se déformer entre les goujons. Cela est dû au fait que l'adhérence est localisée au niveau des goujons seulement, contrairement à l'interface rugueuse continue entre deux bétons. Il devient alors intéressant d'augmenter le plus possible le nombre de goujons pour se rapprocher d'un comportement de retrait restreint le plus représentatif possible.

Il a été décidé d'usiner 33 trous de 1 pouce de diamètre à 125mm c/c. Ce diamètre offre une bonne résistance sans trop réduire la quantité d'acier à la section et le faible espacement est nettement inférieur à l'espacement moyen entre les fissures normalement rencontrées en chantier selon la Ville de Montréal.

ANNEXE B PRÉPARATION DES ESSAIS DE CARACTÉRISATION DES BÉTONS POUR ESSAIS PRÉLIMINAIRES

Le Tableau B.1 présente les essais de caractérisation réalisés sur le béton durci pour les trois bétons étudiés.

Tableau B.1 Essais de caractérisation réalisés à différents intervalles

Essais	**Quantité à réaliser**		
	BFUP sans ARR	**BFUP avec ARR**	**BHP**
Compression (à 7 jours)	3	3	3
Module élastique (à 7 jours)	1	1	1
Compression (à 28 jours)	3	3	3
Module élastique (à 28 jours)	1	1	1
Traction directe (à 28 jours)	3	3	-
Traction indirecte (à 28 jours)	-	-	3

Les essais de compression et de module élastique sont effectués sur des cylindres de 100 mm. Ainsi quatre cylindres par échéance par béton sont nécessaires. De plus, pour assurer d'avoir une quantité suffisante de cylindre en cas de problème lors de la réalisation des essais, une quantité supérieure à celle requise présentée au Tableau B.1 a été utilisée. En moyenne, 6 cylindres ont été préparés par échéance. Pour les essais en traction indirecte, ce test utilise des cylindres de béton de 150 mm de diamètre. Dans ce cas, à cause de la quantité élevée de béton par éprouvette, seuls les trois cylindres requis ont été fabriqués. La préparation des moules de plastique pour la coulée du cylindre a débuté la veille. Ceux-ci ont été nettoyés et lubrifiés.

Finalement, les essais en traction directe effectués sur les BFUP sont réalisés sur des éprouvettes de béton en forme d'os développées par l'École Polytechnique. Ces prismes sont coulés dans un moule en métal qui peut être désassemblé pour le nettoyage et le décoffrage. Tout comme les cylindres, les moules ont été lubrifiés la veille, mais une attention particulière a été apportée pour éviter une accumulation d'huile sur les parois et le fond du coffrage.

Pour ce qui est de la fabrication des bétons, le malaxage a été effectué dans un malaxeur de type planétaire de la marque Eirich R09T d'une capacité totale de 150 litres. Le malaxage a été effectué selon la norme de référence CSA A23.2-2C. Pour commencer, les matériaux solides, à l'exception des fibres métalliques, ont été insérés dans le malaxeur et mélangés pour assurer une bonne distribution des différents éléments. Par la suite, les liquides ont été ajoutés et mélangés jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène. Les fibres ont été incorporées dans le mélange à la toute fin dans le cas des BFUP. Une attention particulière a été apportée au malaxage final pour s'assurer qu'il n'y ait pas de matériaux secs non hydratés dans le fond de la cuve du malaxeur ou encore une agglomération des fibres en boule dans le mélange.

Les propriétés à l'état frais, telles que présentées au Tableau 4.6, ont été mesurées tout juste après le malaxage des bétons. La masse volumique ainsi que la teneur en air ont été mesurées avec un air mètre. L'affaissement a été mesuré avec un cône d'Abram et, l'étalement, sur une plaque de plastique propre et humidifiée. Si le résultat de ces tests n'était pas concluant, notamment au niveau de l'affaissement recherché, une certaine quantité de superplastifiant était ajoutée au mélange par le technicien en laboratoire jusqu'à l'obtention du mélange désiré. Les valeurs présentées au Tableau 4.6 représentent les quantités finales utilisées.

En ce qui a trait à la coulée elle-même, le BFUP présentait un cas particulier. En effet, le béton a été coulé de façon à favoriser l'orientation des fibres de manière longitudinale le long des poutres d'acier en déversant le béton à une des extrémités. L'écoulement naturel du béton le long de la poutre vient favoriser l'orientation des fibres dans la direction de l'écoulement. Par contre, à cause de la longueur des poutres en acier, l'écoulement du béton n'était pas toujours suffisant pour remplir rapidement la poutre. Dans ces cas, une méthode alternative a été utilisée où le béton est déversé en couches minces successives le long de la poutre. Les fibres auront ainsi tendance à vouloir s'orienter dans la même direction dans laquelle le béton a été déversé et la couche mince assure une orientation longitudinale. Cette méthode a aussi été utilisée au niveau des prismes en formes d'os de béton pour les essais de traction directe. Puisque le BHP ne possède pas de fibre, celui-ci a été coulé de manière conventionnelle.

Les cylindres de caractérisation ont été coulés en deux couches égales et ont été frappés légèrement de 10 à 15 fois avec une tige pour permettre l'évacuation des bulles d'air dans le mélange tel que recommandé par la norme CSA A23.2-3C. Ce procédé diffère de celui normalement utilisé, soit 3

couches successives et pillées avec une tige d'acier, mais est adéquat pour le béton autoplaçant tel qu'utilisé dans les trois cas selon la norme.

Pour assurer une épaisseur suffisante de béton, une tige de référence a été fabriquée et marquée à 30 mm du bas. Cette méthode s'est avérée peu efficace et difficile d'utilisation, car le béton recouvrait la tige et masquait la marque. La tige devait donc être constamment nettoyée pour assurer une bonne épaisseur de béton à chaque mesure. Cette méthode a seulement été employée pour les coulées des BFUP. Dans le cas du BHP, une méthode alternative a été utilisée. Un bloc en forme de T a été fabriqué. Celui-ci venait s'appuyer sur le dessus des ailes de la section et le dessous du bloc a été coupé de manière à ce qu'il soit exactement à 30mm au-dessus de l'âme de la section d'acier. Cette méthode avait pour avantage de valider rapidement l'épaisseur de béton sur toute la longueur en glissant simplement le bloc le long de la poutre. De plus, celui-ci ne pénétrait pas le béton, ce qui diminuait l'impact sur l'orientation des fibres localement.

À cause de sa rapidité de prise initiale, le temps de travail du BFUP est très court. Il est donc recommandé d'effectuer les coulées dans les 30 premières minutes après le contact eau/ciment. Après 45 minutes, le béton commence à durcir de manière importante. Cela nécessite une planification plus minutieuse de la main d'œuvre et des éléments à couler. La contribution de plusieurs personnes a été nécessaire pour assurer un déroulement rapide lors des essais.

Les surfaces de béton exposé ont été lissées à l'aide de truelles d'aluminium. Par la suite, toute surface exposée du BFUP a été recouverte d'une feuille de polyéthylène. Le polyéthylène a été appliqué de manière à être en contact direct avec le béton pour empêcher la dessiccation de surface, phénomène très important principalement dans le cas du BFUP, à cause de son faible rapport E/C.

Le tableau suivant présente la cure appliquée en fonction des bétons.

Tableau B.2 Cure appliquée pour les essais préliminaires en fonction des bétons

Béton	**BFUP sans ARR**	**BFUP avec ARR**	**BHP réparation**
Cure	-Air ambiant dans laboratoire de béton -Polyéthylène pendant 48h	-Air ambiant dans laboratoire de béton - Polyéthylène pendant 48h	-Air ambiant dans laboratoire de béton - Polyéthylène pendant 48h

ANNEXE C PLANS DE PARAPETS

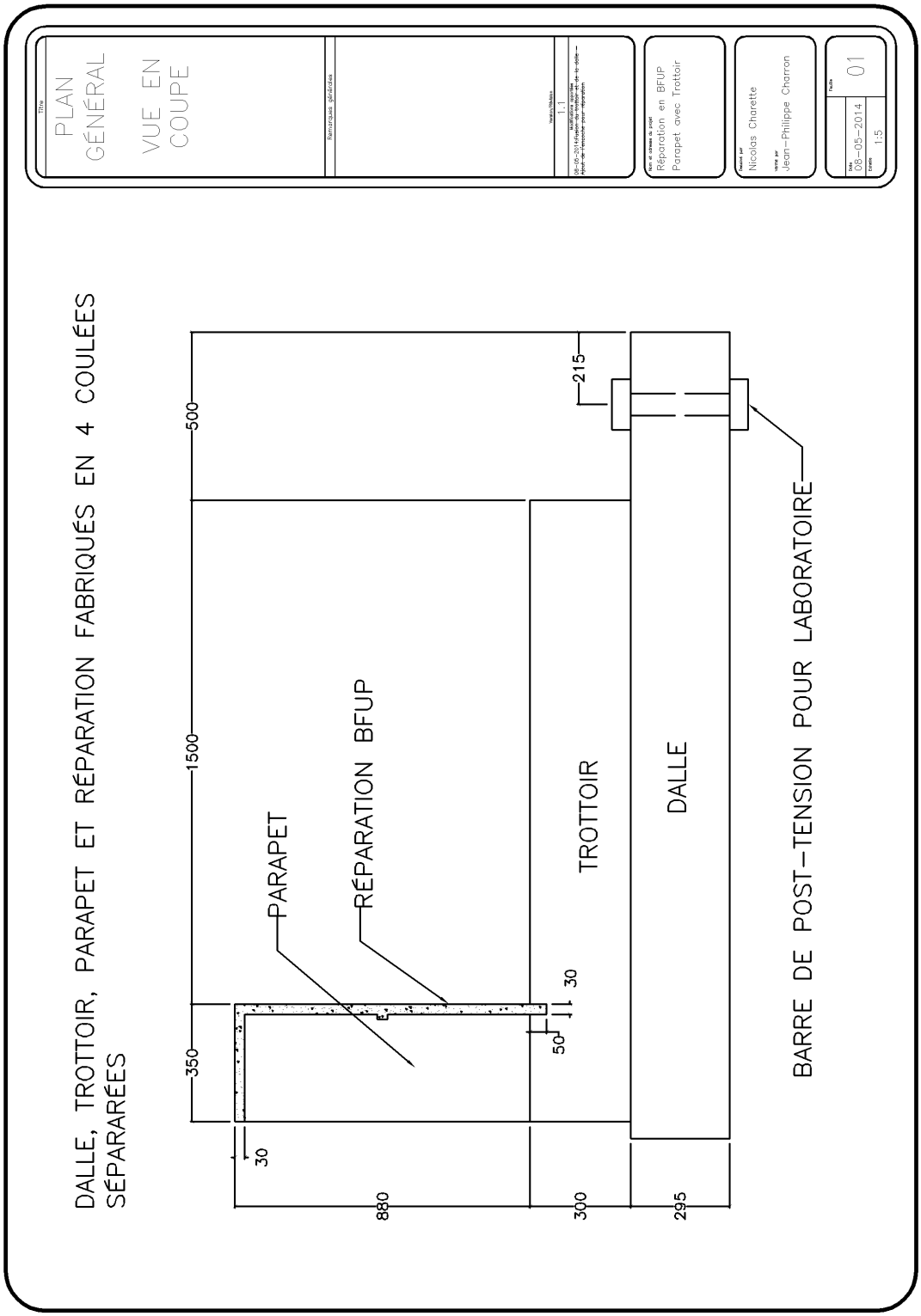


Figure C.1 Plan général – Vue en coupe

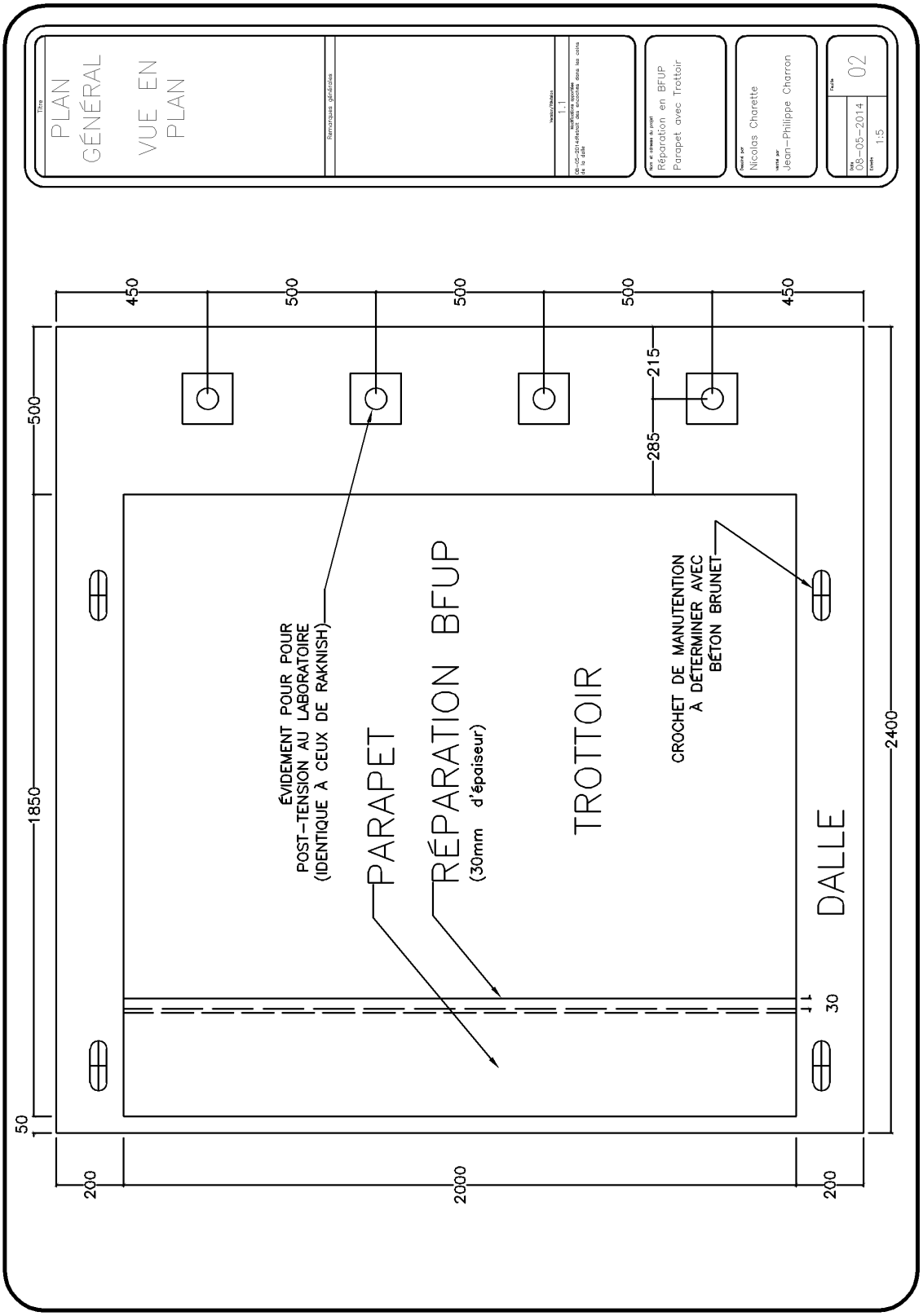


Figure C.2 Plan général - Vue en plan

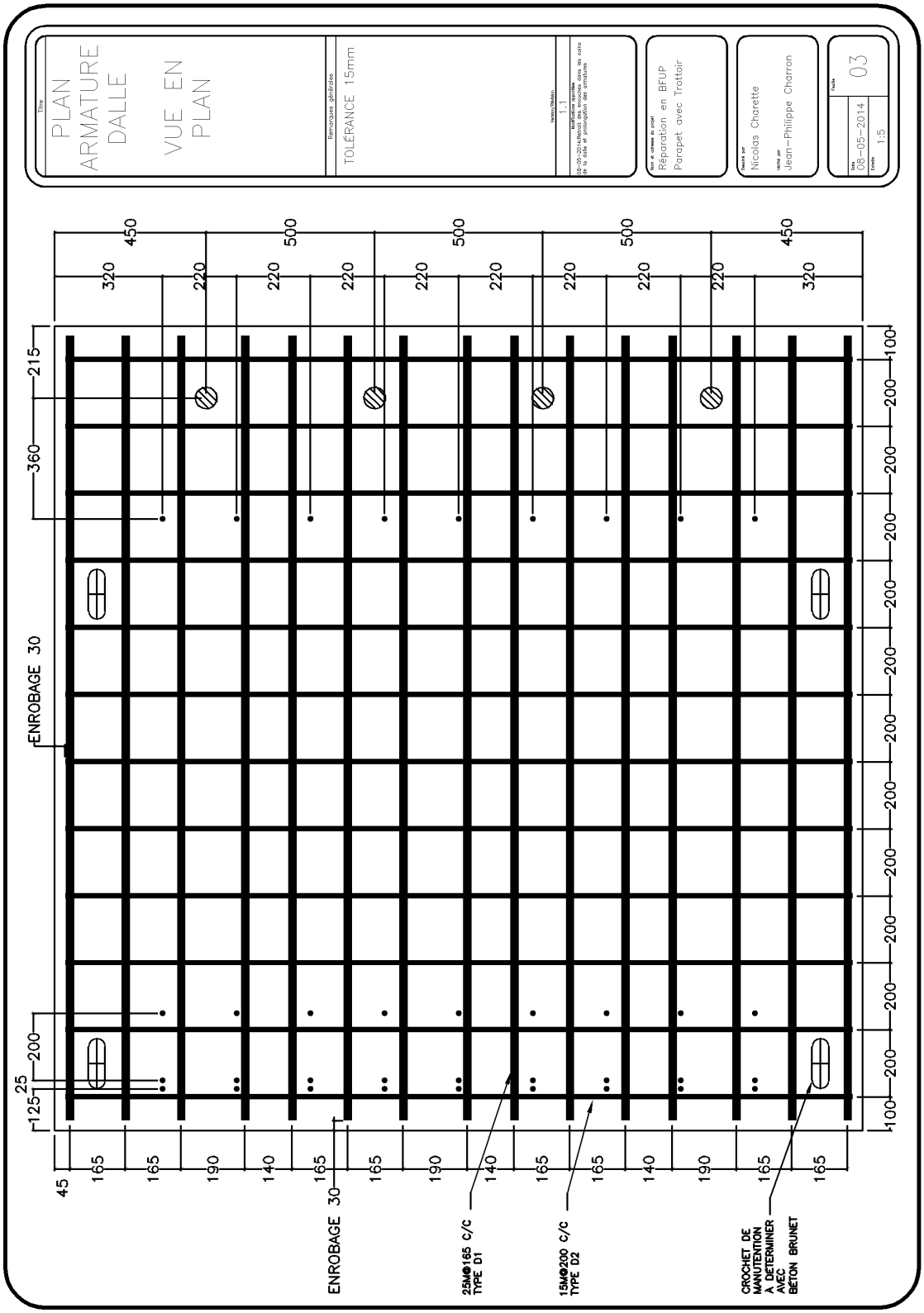


Figure C.3 Plan d'armature dalle - Vue en plan

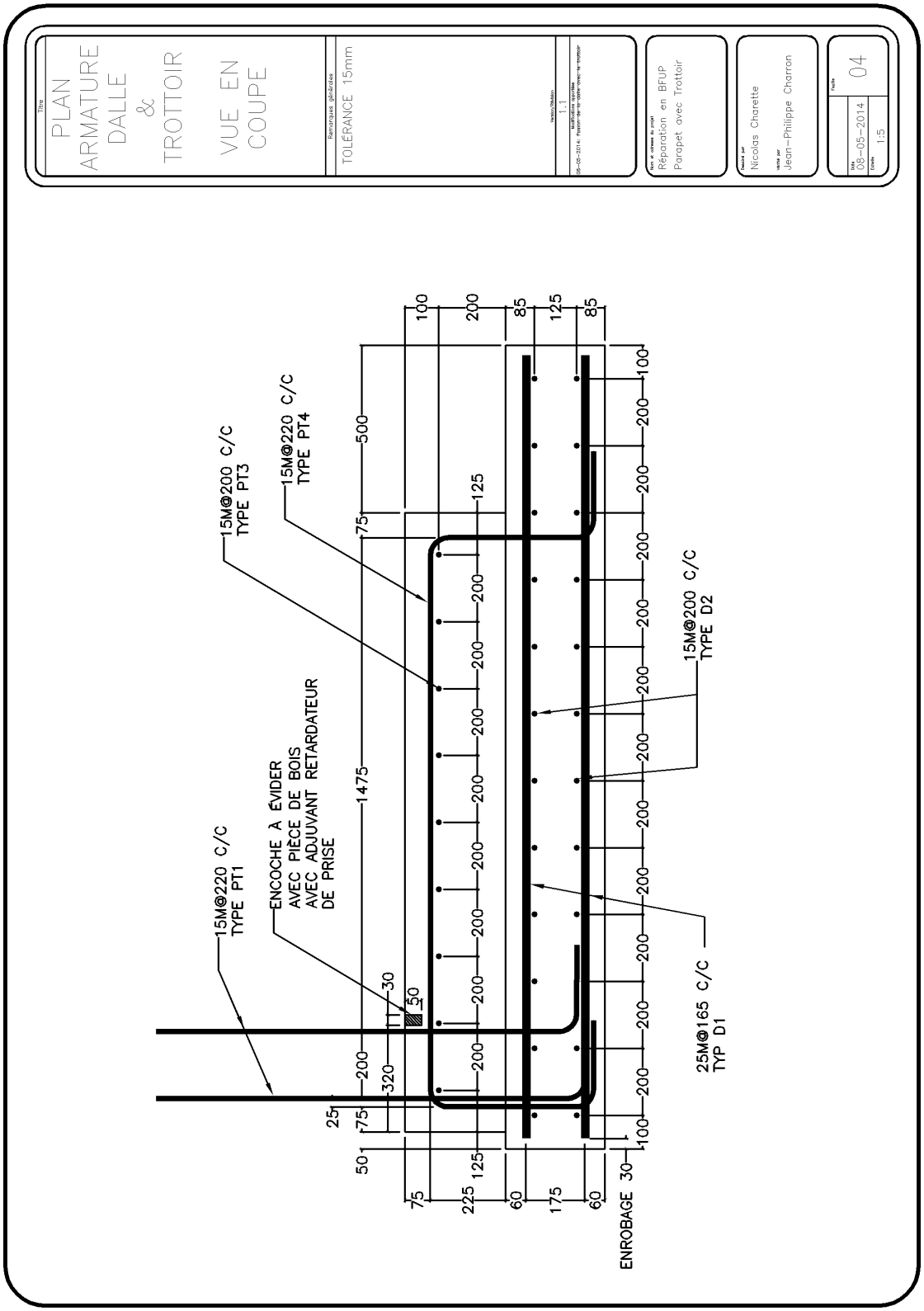


Figure C.4 Plan d'armature dalle et trottoir - Vue en coupe

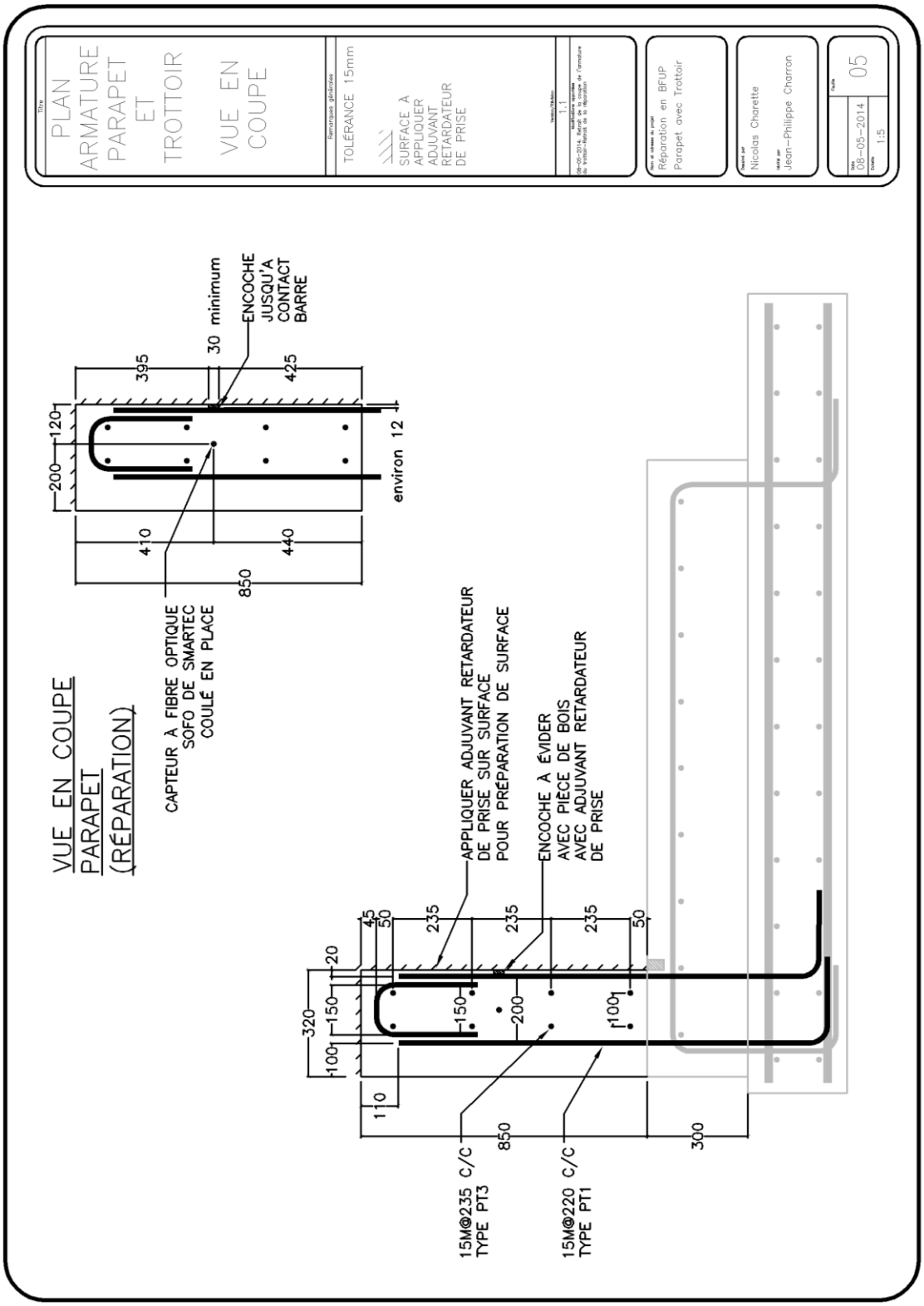


Figure C.5 Plan d'armature parapet - Vue en coupe

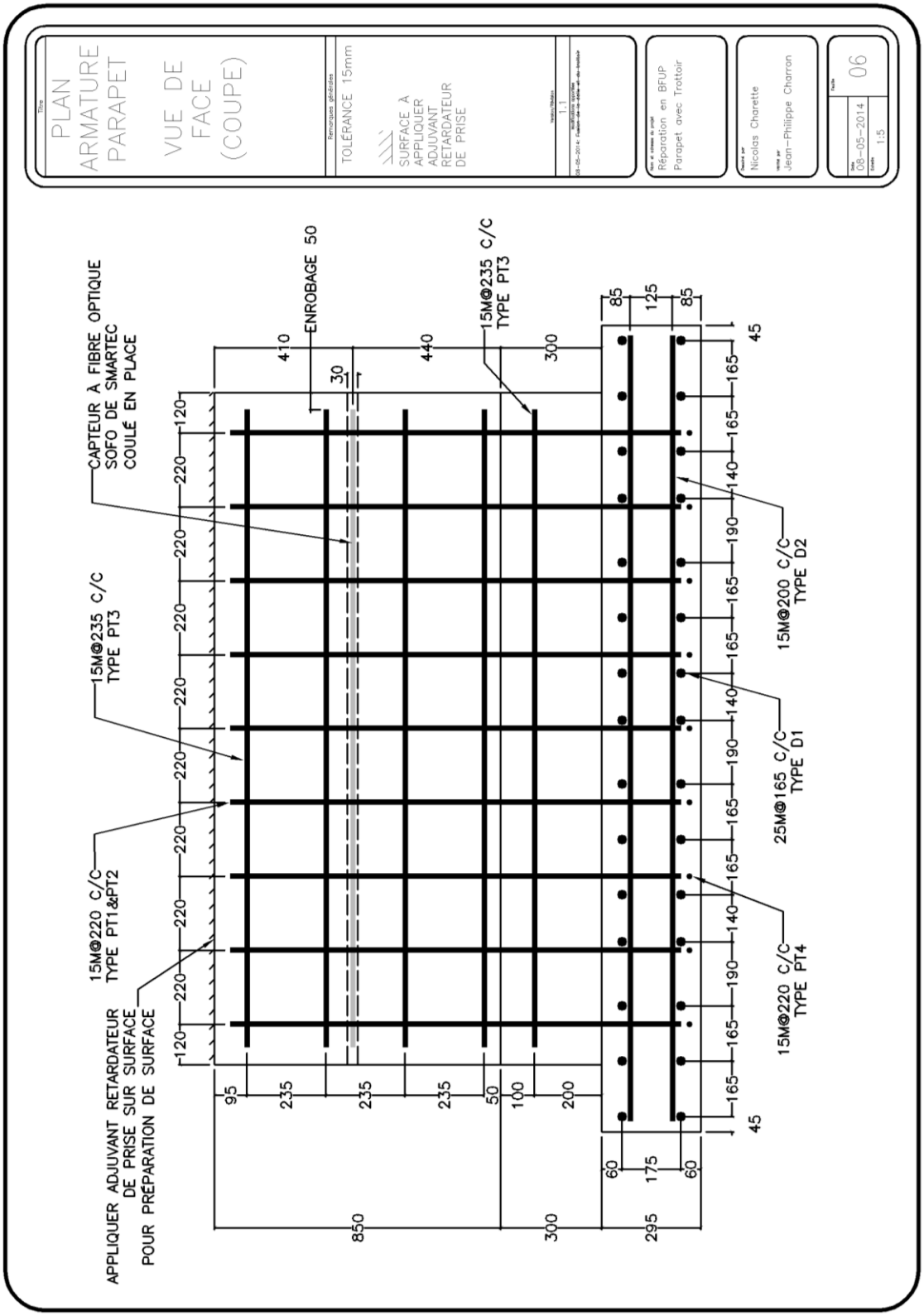


Figure C.6 Plan d'armature parapet – Vue de face

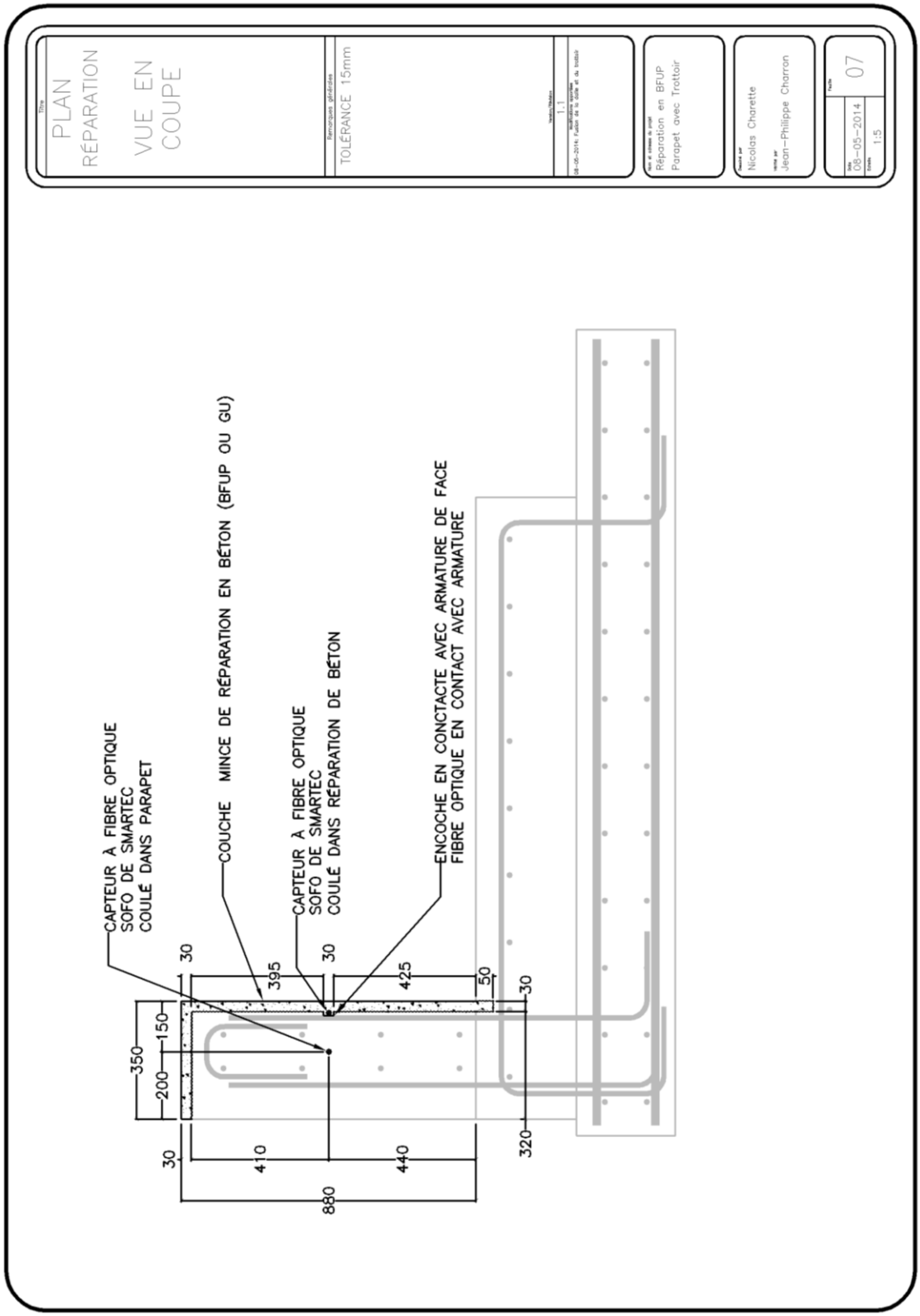


Figure C.7 Plan de la réparation - Vue en coupe

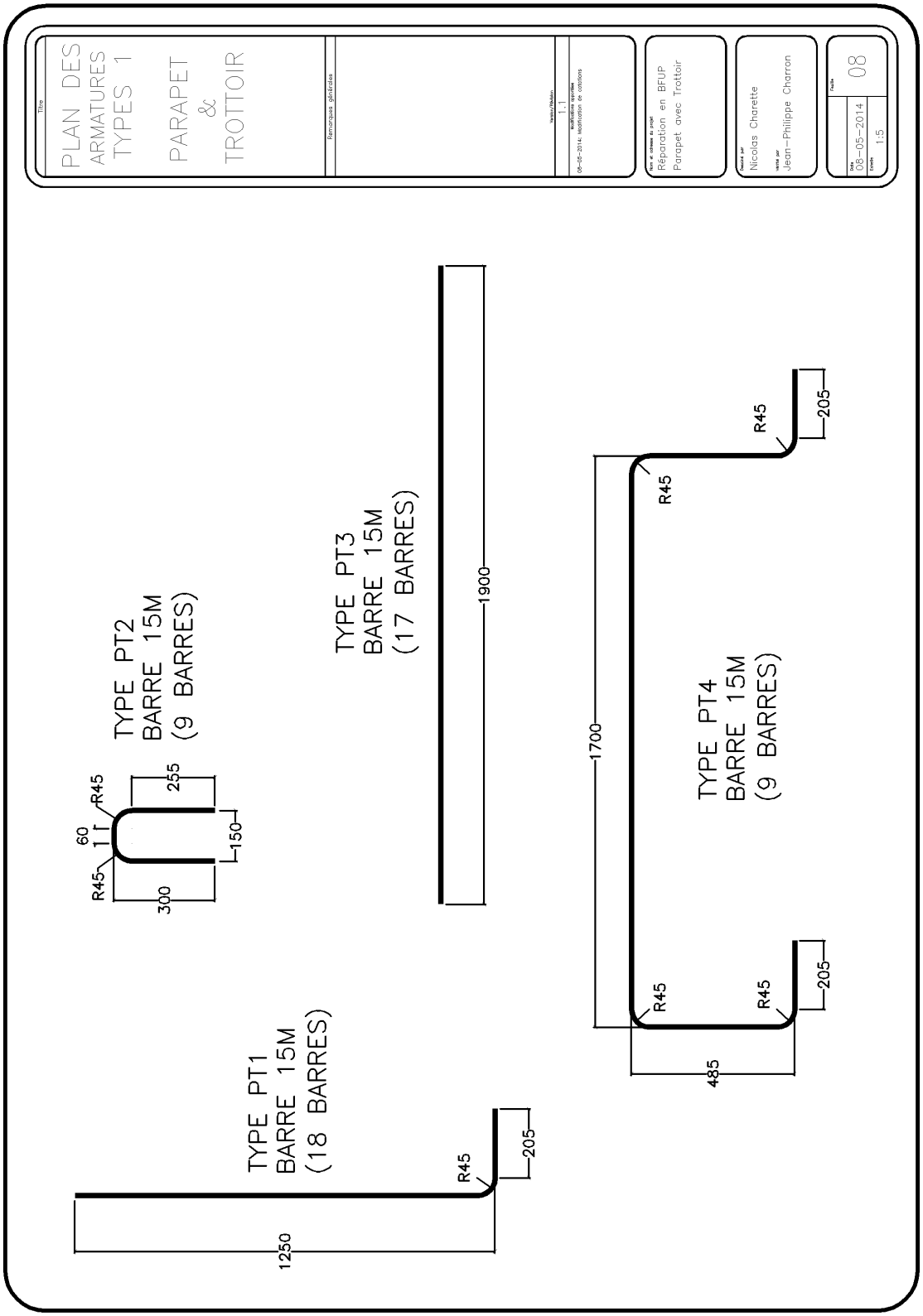


Figure C.8 Plan des armatures types 1

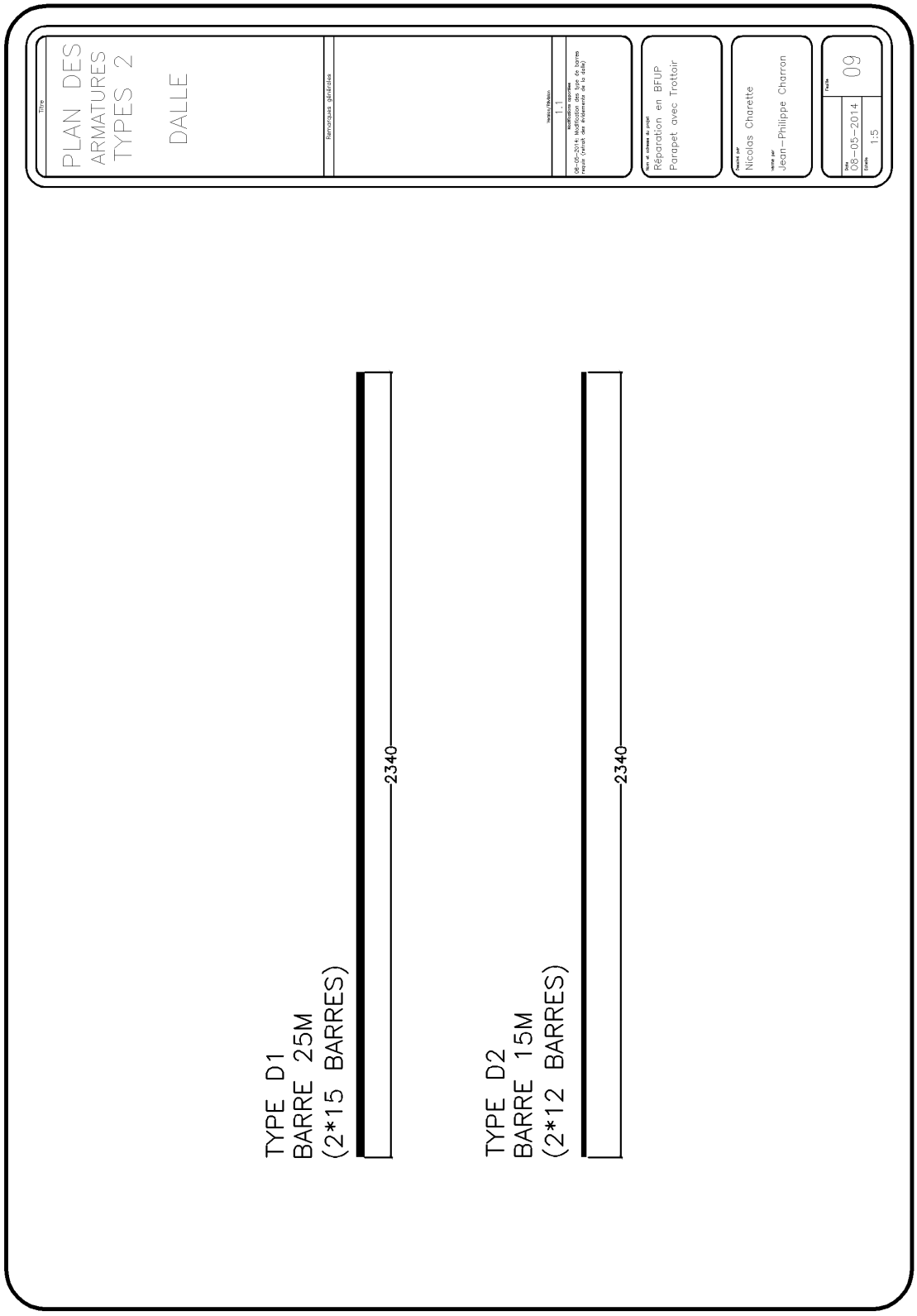


Figure C.9 Plan d'armatures types 2

ANNEXE D PLAN D'INSTRUMENTATION

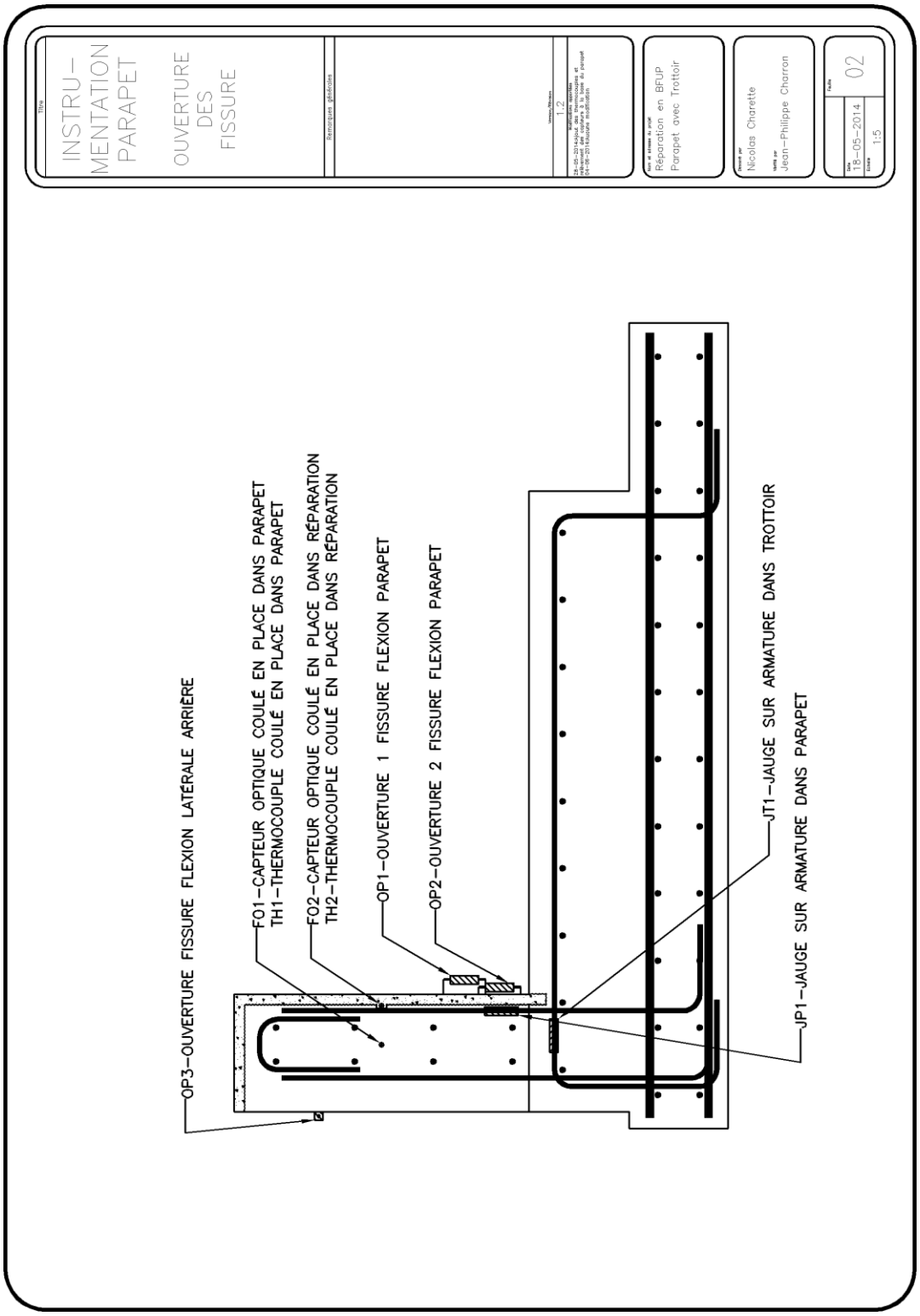


Figure D.1 Plan d'instrumentation pour ouverture des fissures

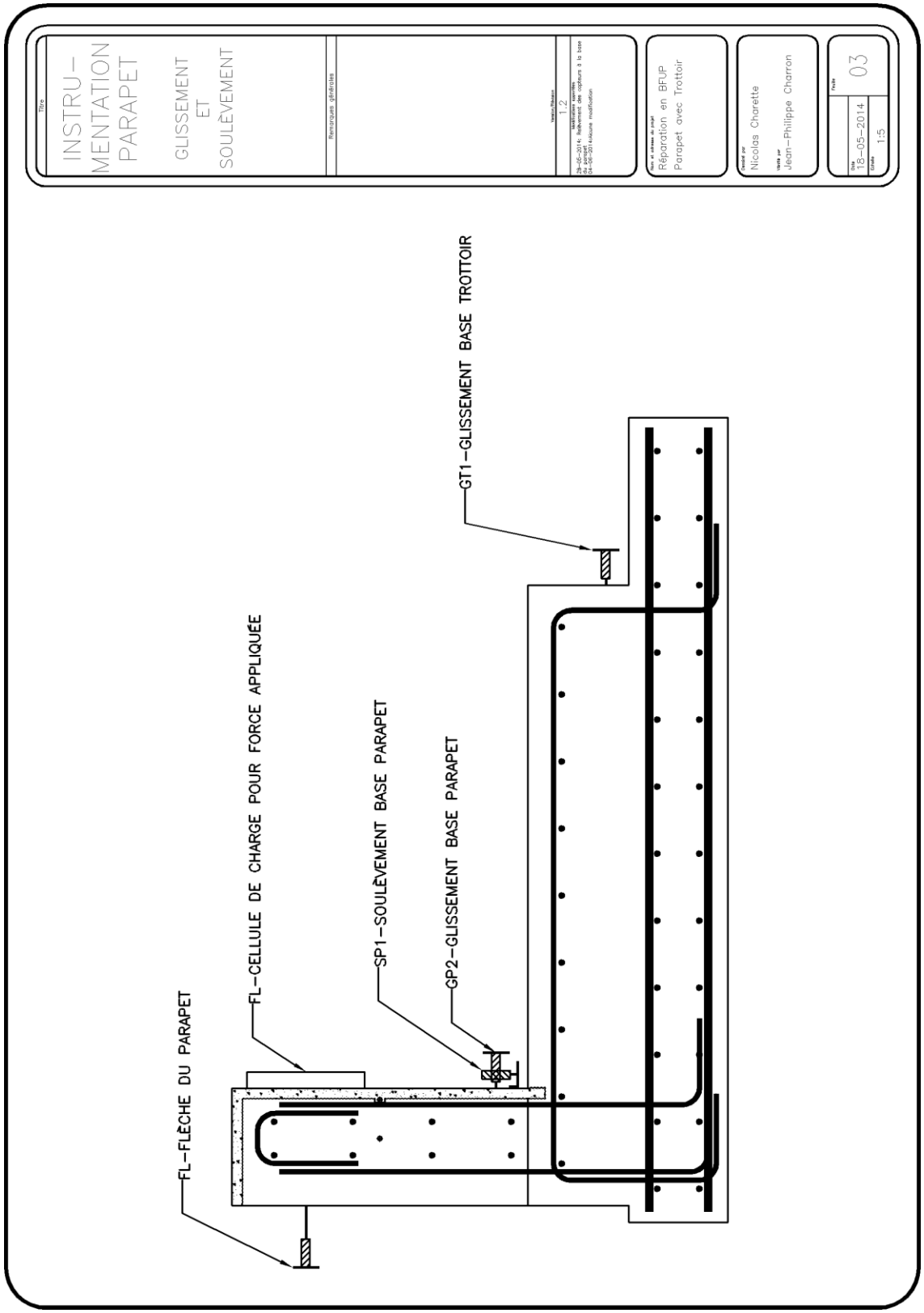


Figure D.2 Plan d'instrumentation pour glissement et soulèvement

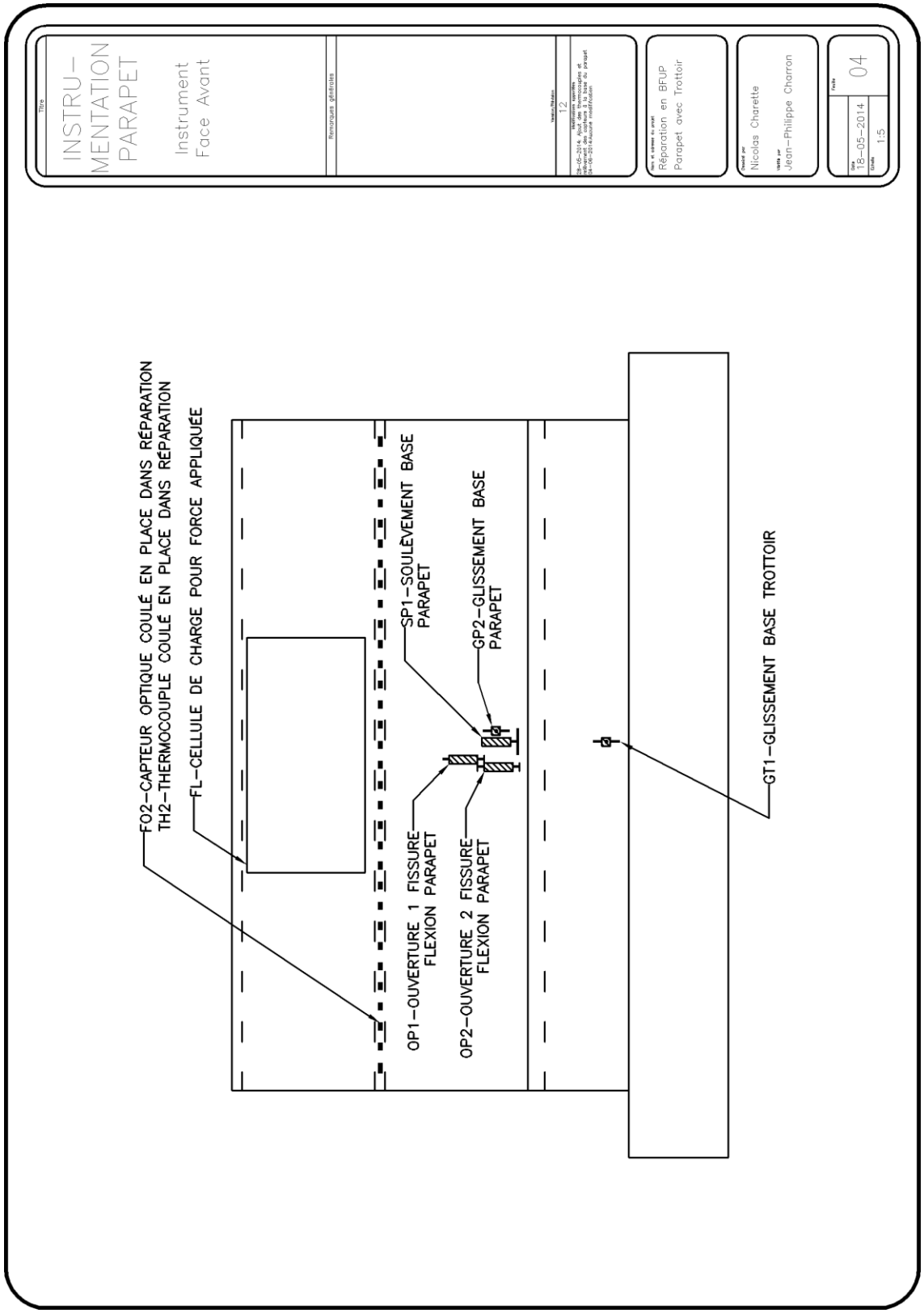


Figure D.3 Plan d'instrumentation vue de face

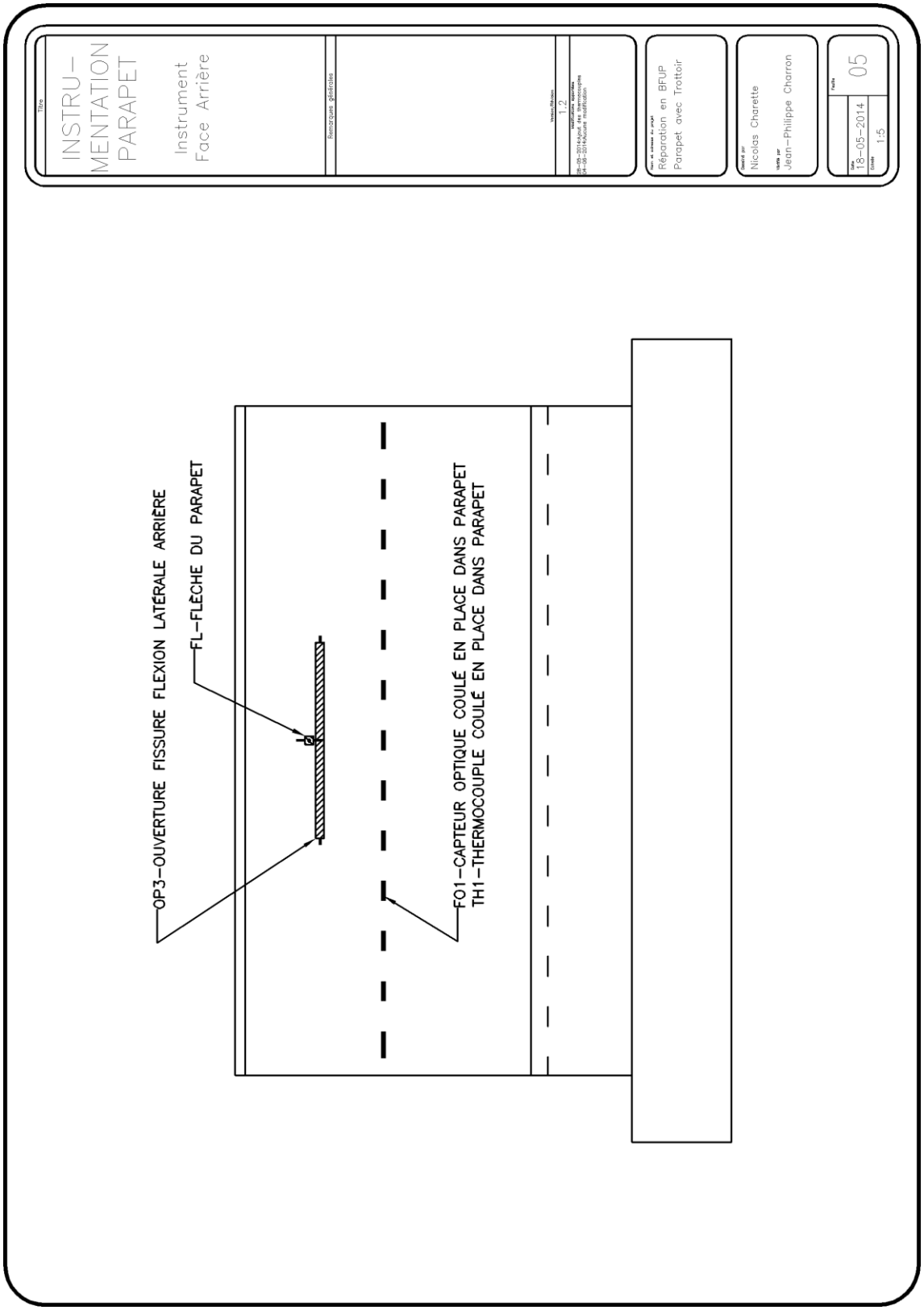


Figure D.4 Plan d'instrumentation vue de dos

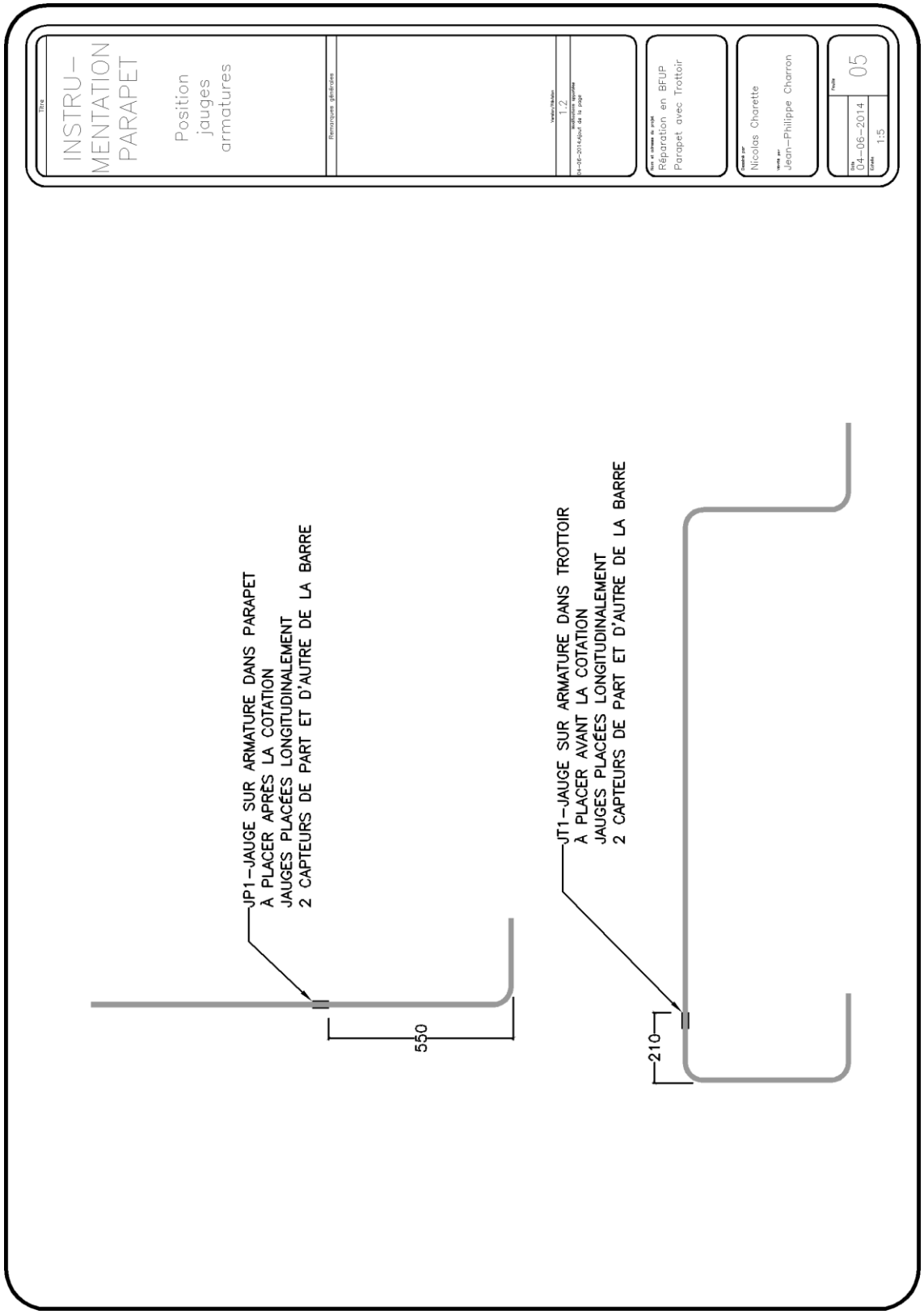


Figure D.5 Plan d'instrumentation des barres d'armature