

Titre: Développement d'un parapet coulé en place avec coque
Title: préfabriquée en BFUP

Auteur: William Molloy
Author:

Date: 2024

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Molloy, W. (2024). Développement d'un parapet coulé en place avec coque
Citation: préfabriquée en BFUP [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/61982/>

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

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/61982/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Jean-Philippe Charron
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Développement d'un parapet coulé en place avec coque préfabriquée en BFUP

WILLIAM MOLLOY

Département des génies civil, géologique et des mines

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

Génie Civil

Décembre 2024

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Développement d'un parapet coulé en place avec coque préfabriquée en BFUP

Présenté par **William MOLLOY**

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

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

Najib BOUANNANI, président

Jean-Philippe CHARRON, membre et directeur de recherche

Bruno MASSICOTTE, membre et codirecteur de recherche

Mahdi BEN FTIMA, membre

DÉDICACE

*À ma mère Guylaine, mon père Dick et mes grands-parents Olivette et Lou-Lou sans qui rien de
tout ça n'aurait été possible.*

À Sabrina, Isabelle, Nancy, Catherine, Thomas, Sarah et Marie pour leur soutien.

REMERCIEMENTS

Ce projet n'aurait été possible sans la participation de plusieurs personnes.

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche, le Professeur Jean-Philippe Charron, pour ses connaissances, ses conseils et sa présence tout au long du projet. Son soutien a été d'une aide inestimable pour surmonter toutes les difficultés rencontrées. Sa confiance m'a aussi permis de pouvoir développer des connaissances et une capacité de résolution de problème qui auront été très utiles pour terminer le projet. Je tiens également à remercier mon co-directeur de recherche, le professeur Bruno Massicotte, pour son expertise et sa participation dans le projet.

Je souhaite aussi remercier l'associée de recherche, Clélia Desmettre, pour son aide très active dans tous les volets du projet. Sa participation a été essentielle tout au long du projet, notamment avec beaucoup de transmission de connaissance et de l'aide à résoudre les difficultés rencontrées.

Je veux également à remercier toute l'équipe technique du laboratoire : Mathieu Robidas, Manar Benslama, David Ek, Marc-Antoine Bernier, Yazid Cheklat et Sylvain Gerhardt pour leur aide très précieuse lors des multiples coulées de BFUP et pour tous les autres volets de la partie expérimentale du projet.

Je souhaite également remercier tous les étudiants du GRS : Florian Dias Alves, Fengyi Wang, Adrien Rachello, Samia Meftah, Martin Pharand, Youcef Moussous, Annia Benchadi, Alcia Poher et Youssef El Baghli. Ils ont su rendre cette expérience inoubliable et ils ont été d'une aide inestimable pour compléter mon projet.

Finalement, je veux remercier l'équipe de BPD L et BPDR pour leur présence très active lors de la fabrication des pièces de béton de la partie expérimentale. Je tiens à remercier Julien Gauthier-Desmeulles et son équipe chez BPDR pour la fabrication des dalles. Je tiens absolument à remercier Mathieu Girard, Claude B. Gagné et leur équipe chez BPD L pour la fabrication du coffrage de la coque. Leur aide aura été irremplaçable et leur réactivité était exemplaire. Leurs savoirs et leur expertise étaient essentiels afin de surmonter les difficultés rencontrées lors de la production.

Merci au CRSNG et aux partenaires financiers : BPD L (BPDR), Sika, Euclid, Ville de Montréal, PJCCI et la Corporation de Gestion de la Voie Maritime du Saint-Laurent pour le soutien matériel et financier rendant ce projet possible.

RÉSUMÉ

Plusieurs parapets sur les ponts du Québec montrent systématiquement une détérioration rapide en bas âge. La détérioration est causée par la méthode de fabrication actuelle des parapets coulés en place. Ces derniers étant soumis à une grande restriction provenant de la dalle de pont et des armatures. La détérioration de ces éléments des ponts engendre des coûts de réparation importants. Pour résoudre ce problème, des parapets préfabriqués en béton fibré ultra performant (BFUP) et en béton hautes performances (BHP) sont considérés. Cependant, ces derniers doivent être installés sur les dalles de ponts avec des méthodes d'ancrages qui ne sont pas encore approuvées. L'utilisation de parapets coulés en place avec coque en BFUP préfabriqué est donc envisagée pour résoudre la problématique de durabilité et d'ancrage à la dalle de pont. La coque en BFUP est installée sur la dalle de pont avec les armatures en attente et remplie avec un béton ordinaire (BO) en chantier qui crée alors un parapet hybride.

La coque est conçue avec deux types de BFUP : un avec des fibres en acier et un autre avec des fibres synthétiques en PVA. La conception est faite avec des modèles d'éléments finis non linéaires en trois dimensions et vise principalement à déterminer l'épaisseur de la coque. La coque doit être conçue pour résister au retrait restreint important causé par le coffrage non conventionnel. Elle doit aussi résister aux efforts occasionnés lors du remplissage avec le BO en chantier. Des essais d'écoulement de BFUP menés en laboratoire sur des segments de coque à l'échelle sont aussi réalisés pour étudier le mode de remplissage et l'épaisseur raisonnable de la coque. Les résultats combinés des essais d'écoulement et des modèles numériques permettent de conclure que l'épaisseur de la coque doit être d'au moins 30 mm. Le parapet hybride est ensuite modélisé pour vérifier qu'il peut résister au chargement prescrit par la norme CSA S6-19.

Par la suite, une étude expérimentale est menée au laboratoire afin de documenter la fabrication des coques en BFUP et de confirmer les résultats des modèles numériques en conception. Une première coque est d'abord fabriquée au laboratoire avec un moule conçu en équipe avec un partenaire du projet (BPDF) et fabriquée par ce dernier. À la suite du démoulage de la première coque, la géométrie et la séquence de fabrication des coques sont modifiées afin d'améliorer la fabrication des autres coques. Une coque en BFUP avec fibres en acier et une autre avec fibres en PVA sont fabriquées. Ensuite, les deux coques sont installées sur des dalles préfabriquées avec armatures en attente fabriquées par un partenaire du projet (BPDR) et remplies avec le BO. Le

remplissage ne crée aucun endommagement visible sur les coques. Le parapet hybride est ensuite testé avec un essai quasi statique. Les deux parapets hybrides atteignent la résistance ultime prescrite par la norme CSA S6-19 et sont peu fissurés en service.

Les résultats expérimentaux permettent ensuite de confirmer les modèles numériques. Les modèles corrigés ont été utilisés afin d'étudier la variation de certains paramètres sur le comportement de la coque en BFUP et du parapet hybride. Les modèles sont peu sensibles aux changements appliqués sur les paramètres.

ABSTRACT

Numerous parapets on Quebec's bridges exhibit systematic and accelerated deterioration. This deterioration is primarily caused by the current fabrication method of cast-in-place parapets. These are subjected to significant restraint from the bridge deck and reinforcement. The deterioration of these bridge elements results in substantial repair costs. To address this issue, prefabricated parapets made from ultrahigh performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) and high-performance concrete (HPC) are being considered. However, these parapets need to be installed on bridge decks with an anchoring method that has yet to be approved. The use of precast UHPFRC shell is thus proposed to resolve durability and anchorage issues on the bridge deck. The UHPFRC shell is installed on the bridge deck with existing reinforcement and filled with ordinary concrete (OC) on site which creates a hybrid parapet.

The shell is designed with two types of UHPFRC: one with steel fibers and the other with synthetic PVA fibers. The design is made with three-dimensional nonlinear finite element model and mainly aims to determine the optimal shell thickness. The shell has to be designed to resist to the shrinkage restraint caused by the non-conventional formwork. It must also withstand the loads applied during the filling with OC on site. Laboratory flow tests on scaled shell segments were also conducted to study the filling process and determine a suitable shell thickness. The combined results of the flow tests and numerical models indicate that the shell thickness should be at least 30 mm. The hybrid parapet is then modelled to verify that it can resist to the load prescribed by the CSA S6-19 standard.

Subsequently, an experimental study was conducted in the laboratory to document the fabrication of UHPFRC shells and to validate the numerical model results. An initial shell was fabricated using a mold designed in collaboration with a project partner (BPDFL) and manufactured by the same partner. Following the demolding of the first shell, the geometry and fabrication sequence were modified to improve the production of subsequent shells. One shell with steel fibers and another with PVA fibers were fabricated. Both shells were then installed on prefabricated slabs with existing reinforcement made by a project partner (BPDR) and filled with OC. The filling process did not create any visible damage to the shells. The hybrid parapet was then tested with a quasi-static test. Both hybrid parapets obtained the ultimate strength prescribed by the CSA S6-19 standard and were lightly cracked in the service state.

The experimental results were then used to confirm the numerical models. The corrected models were used to study the variation of certain parameters on the behaviour of the UHPFRC shell and the hybrid parapet. The models seem to not be very sensitive to change applied to the parameters.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES.....	XV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XXVI
LISTE DES ANNEXES.....	XXVIII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique.....	1
1.2 Contexte	3
1.3 Objectifs	4
1.4 Méthodologie	5
1.5 Contenu du mémoire	6
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	7
2.1 Béton Fibré à Ultra-Hautes Performances (BFUP).....	7
2.1.1 Composition	7
2.1.2 Comportement mécanique.....	9
2.1.3 Durabilité.....	14
2.1.4 Déformations	19
2.2 Coques minces.....	24
2.3 Conception des parapets.....	29

2.3.1	Exigence de performance	29
2.3.2	Développement de parapets préfabriqués	34
2.4	Synthèse	40
CHAPITRE 3 CONCEPTION.....		42
3.1	Concept et étapes de conception	43
3.2	Géométrie	45
3.2.1	Géométrie extérieure du parapet et des armatures	45
3.2.2	Géométrie de la dalle.....	46
3.2.3	Géométrie de la coque.....	47
3.3	Conception par éléments finis	48
3.3.1	Matériaux considérés pour la conception.....	49
3.3.2	Interfaces	55
3.4	Modélisation du cas de chargement 1 – Retrait restreint de la coque en BFUP	56
3.4.1	Présentation du modèle	56
3.4.2	Résultats	62
3.4.3	Conclusion.....	64
3.5	Modélisation du cas de chargement 2 – Remplissage de la coque.....	65
3.5.1	Présentation du modèle	65
3.5.2	Résultats	68
3.5.3	Conclusion.....	71
3.6	Détermination de l'épaisseur de la coque	71
3.7	Modélisation du cas de chargement 3 – Essais structuraux sur le parapet hybride	72
3.7.1	Présentation du modèle	72
3.7.2	Résultats	77

3.7.3	Conclusion.....	84
3.8	Synthèse	84
CHAPITRE 4 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE.....		86
4.1	Programme expérimental préliminaire.....	86
4.1.1	Caractérisation préliminaire des BFUP	86
4.1.2	Essais d'écoulement	92
4.2	Production des parapets.....	96
4.2.1	Plans préparés.....	96
4.2.2	Fabrication des coques	102
4.2.3	Fabrication de la coque 3	112
4.2.4	Remplissage des coques avec le BO	113
4.3	Campagne expérimentale finale	115
4.3.1	Caractérisation des bétons.....	115
4.3.2	Propriétés des armatures.....	122
4.3.3	Cas de chargement 1 – Retrait restreint de la coque	122
4.3.4	Cas de chargement 2 – Remplissage de la coque.....	127
4.3.5	Cas de chargement 3 – Essais structuraux sur les parapets hybrides	131
4.4	Synthèse	145
CHAPITRE 5 ÉTUDE NUMÉRIQUE.....		147
5.1	Changements dans la géométrie.....	147
5.2	Matériaux et interfaces	149
5.3	Cas de chargement 1 – Retrait restreint de la coque en BFUP	151
5.3.1	Présentation du modèle	151
5.3.2	Résultats	152

5.3.3	Conclusion.....	154
5.4	Cas de chargement 2 – Remplissage de la coque.....	154
5.4.1	Présentation du modèle	154
5.4.2	Résultats	155
5.4.3	Paramétrisation.....	156
5.4.4	Conclusion.....	158
5.5	Cas de chargement 3 – Essais structuraux sur le parapet hybride.....	158
5.5.1	Présentation du modèle	158
5.5.2	Comportement structural.....	159
5.5.3	Fissuration et délamination	161
5.5.4	Étude paramétrique	164
5.5.5	Conclusion.....	171
5.6	Synthèse	172
CHAPITRE 6	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	174
6.1	Rappel des objectifs	174
6.2	Conclusions	175
6.3	Recommandations	179
6.3.1	Production des coques et des parapets hybrides.....	179
6.3.2	Comportement structural des parapets hybride.....	181
6.3.3	Mise en place.....	181
RÉFÉRENCES.....		183
ANNEXES		188

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 Propriétés mécaniques des différentes gammes de béton utilisées couramment (adapté de Charron & Desmettre, 2013)	7
Tableau 2-2 Composition des différentes gammes de béton utilisées couramment (adapté de Charron & Desmettre, 2013).....	8
Tableau 2-3 Indicateurs de durabilité pour le BO, le BHP, le BFHP et le BFUP à l'état non fissuré (adapté de Charron & Desmettre, 2013)	15
Tableau 2-4 Indicateurs de durabilité pour le BO, le BHP, le BFHP et le BFUP à l'état fissuré (adapté de Charron & Desmettre, 2013)	16
Tableau 2-5 Forces de design recommandées par CSA S6-19 (2019).....	30
Tableau 2-6 Forces de design recommandées par l'AASHTO (2020)	31
Tableau 3-1 Volume de BFUP pour une coque selon l'épaisseur	48
Tableau 3-2 Propriétés des bétons utilisés pour la modélisation en conception	52
Tableau 3-3 Propriétés des armatures utilisées pour la modélisation en conception	54
Tableau 3-4 Propriétés des interfaces utilisées pour les modèles	55
Tableau 3-5 Propriété du ressort qui agit comme un support	60
Tableau 3-6 Caractéristiques du maillage pour les essais structuraux	73
Tableau 4-1 Propriétés des BFUP mesurées dans la caractérisation préliminaire en compression	87
Tableau 4-2 Propriétés des BFUP mesurées dans la caractérisation préliminaire en traction	92
Tableau 4-3 Particularités des segments de coques fabriqués à l'échelle	93
Tableau 4-4 Volume de BFUP pour fabriquer une coque.....	104
Tableau 4-5 Volume de BO pour le remplissage des deux coques	114
Tableau 4-6 Propriétés mécaniques des bétons	116
Tableau 4-7 Procédure de chargement pour la caractérisation en traction des BFUP	116

Tableau 4-8 Ouverture de fissure dans les BFUP selon le niveau de chargement sur les spécimens de caractérisation en traction (Legouest, 2024)	120
Tableau 4-9 Propriétés des BFUP mesurés dans la caractérisation finale en traction	121
Tableau 4-10 Déroulement des coulées	124
Tableau 4-11 Retrait libre à considérer dans les modèles selon l'échauffement dans la coque ..	127
Tableau 5-1 Propriété du ressort	156

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 Fissuration observée sur le pont Vachon 7 mois après la réhabilitation (Cusson & Repette, 2000)	2
Figure 1-2 Fissuration sur les parapets du pont de l'autoroute 40 dans Montréal-Est	2
Figure 1-3 Parapet MTQ201 hybride BFUP/BO sur la dalle en BHP	5
Figure 2-1 Propriétés des fibres utilisées dans le BFUP, a) Module élastique, b) Résistance à la traction (Gong et al., 2022)	9
Figure 2-2 Comportement en compression de différents BFUP avec un pourcentage de fibres variable (Abbas et al., 2015)	10
Figure 2-3 Lois idéalisées en traction pour des BFUP avec différents pourcentages de fibres et à différentes échéances (Lagier, 2015)	11
Figure 2-4 Contrainte déformation des BFUP avec (courbes noire, rouge et verte) et sans fibres (courbe bleue, mauve et orange), a) Avant la première fissure, b) Courbe complète (Hassan et al., 2012; Nguyen et al., 2023)	11
Figure 2-5 Comportement en traction des BFHP et des BFUP (Naaman, 2008).....	12
Figure 2-6 Comportement du prisme 70x70x280 mm en flexion pour deux BFUP a) avec fibres en acier (Chanvillard & Rigaud, 2003) b) avec fibres synthétiques (droite) (Nana et al., 2023).....	13
Figure 2-7 Pénétration d'ion Cl ⁻ dans des éprouvettes de BFUP après 180 jours (Abbas et al., 2015)	17
Figure 2-8 États des fibres du BFUP après 30 jours dans la solution de chlorure a) à la surface de l'éprouvette b) à 3 mm de profondeur, sans corrosion (Abbas et al., 2015)	17
Figure 2-9 Profil de chlore dans des spécimens de BFUP exposés à l'île Treat (RPC-USACE : BFUP de référence, UNB-FM: BFUP avec fibres en acier 2 % et UNB-FO : BFUP avec fibres en PVA 4 %) (Thomas et al., 2012)	19
Figure 2-10 Illustration de la dépression capillaire (Charron, 2007)	20
Figure 2-11 Influence du pourcentage de fibres métalliques sur le retrait endogène mesuré (Z. Wu et al., 2019).....	21

Figure 2-12 Retrait dans le BFUP au long terme pour des éprouvettes scellées (sealed) et non scellées (Habel 2004)	22
Figure 2-13 Résultats de l'étude, a) Poutre de référence en BO, b) Poutre U2 hybride, c) Ouverture de fissure - force, d) Graphique force - flèche (Zhang et al., 2022).....	25
Figure 2-14 Résultats de l'étude, a) Coffrage en BFUP avec texture et armature qui relie le cœur et la coque, b) Force - flèche (Huang et al., 2017).....	26
Figure 2-15 Résultats de l'étude, a) Coupe de la poutre étudiée, b) Ouverture de fissure selon le ratio de la capacité (Qiao et al., 2019).....	27
Figure 2-16 Résultats de l'étude, a) Dimensions du chevêtre étudié b) Force – flèche (Azizinamini et al., 2019).....	29
Figure 2-17 Identification des paramètres selon l'AASHTO (2020)	31
Figure 2-18 Essais sur parapets préfabriqués, a) Géométrie des parapets, b) Force – déplacement horizontal (Duchesneau et al., 2011).....	36
Figure 2-19 Essais sur parapet préfabriqué, a) 3 configurations, b) Force - déplacement horizontal	37
Figure 2-20 Section du parapet avec niche fermée (gauche) et niche ouverte (droite) (Damry et al., 2013).....	38
Figure 2-21 Section des parapets préfabriquée (Gendron et al., 2022).....	39
Figure 2-22 Essais excentrés menés sur les parapets préfabriqués MTQ301 (essais 2 à gauche et essais 3 à droite) (Gendron et al., 2022).....	39
Figure 2-23 graphique force - déplacement horizontal sur les 3 types de parapets	40
Figure 3-1 Deux modèles de parapet sur dalle de pont a) MTQ201 présent au Québec b) Proposition de parapet hybride avec coque en BFUP avec les mêmes dimensions extérieures et les mêmes armatures	42
Figure 3-2 Vue éclatée du moule pour la coque.....	43
Figure 3-3 Type de chargement attendu lors du remplissage des coques avec le BO	44
Figure 3-4 Parapet MTQ201 (MTQ, 2023a).....	46

Figure 3-5 Armatures dans la dalle	47
Figure 3-6 Vue de coupe des coques en BFUP d'épaisseur de 20, 30 et 40 mm	48
Figure 3-7 Loi en traction entrée sur « CC3DNonLinCementitious2User » type (Červenka et al., 2021).....	50
Figure 3-8 Transformation d'une loi mesurée en laboratoire (haut) vers une loi sur ATENA (bas)	51
Figure 3-9 Comportement en traction simplifié des BFUP.....	53
Figure 3-10 Comportement en traction simplifié et réduit de 50 % des BFUP	53
Figure 3-11 Comportement des armatures en traction pour la modélisation en conception.....	54
Figure 3-12 Propriété du matériau de la plaque de chargement.....	55
Figure 3-13 Comportement de l'interface des barres d'armatures et du béton.....	56
Figure 3-14 Modèle pour étudier le retrait restreint de la coque, a) Macro-éléments, b) Maillage	57
Figure 3-15 Chanfrein modélisé dans la coque en BFUP, a) Position, b) Dimensions	57
Figure 3-16 Utilisation de la symétrie dans le modèle de retrait restreint, a) Partie modélisée, b) Surface avec application de la symétrie en rouge.....	58
Figure 3-17 Déformation causée par le retrait avec deux conditions frontières différentes, a) Blocage incorrect des déplacements avec un support, b) Blocage adéquat des déplacements avec un ressort.....	59
Figure 3-18 Position de la jauge selon l'épaisseur de la coque.....	61
Figure 3-19 Fissuration à proximité du chanfrein pour un retrait libre appliqué de 500 $\mu\text{m}/\text{m}$	62
Figure 3-20 Macro-éléments retirés pour mesurer la fissuration due au retrait restreint	62
Figure 3-21 Retrait de la coque selon l'épaisseur et le type de fibres dans le BFUP, a) Retrait effectif, b) Ouverture de fissure selon le retrait libre appliqué	63
Figure 3-22 Fissuration due au retrait observée dans les coques de 30 mm avec un retrait libre de 350 $\mu\text{m}/\text{m}$	64

Figure 3-23 Modèle pour étudier l'effet du remplissage de la coque en BFUP par le BO en chantier a) Macro-éléments, b) Maillage	65
Figure 3-24 Conditions limites sur la coque pour le remplissage du béton, a) Vue de dessous, b) Vue de côté	66
Figure 3-25 Remplissage de la coque, a) chargement réel, b) 1er pas de chargement, c) 5e pas de chargement, d) 10e pas de chargement (dernier)	67
Figure 3-26 Déformation transversale lors du remplissage de BO en chantier	68
Figure 3-27 Comportement des différentes coques lors de leur remplissage avec du BO pour différentes épaisseurs de coque de BFUP, a) Déformation longitudinale, b) Ouverture de fissure	69
Figure 3-28 Fissuration à l'intérieur de la coque de 30 mm en BFUP lors du remplissage de BO en chantier	70
Figure 3-29 Fissuration à l'extérieur de la coque de 30 mm en BFUP lors du remplissage de BO en chantier	70
Figure 3-30 Modèle pour les essais structuraux sur parapet hybride, a) Maillage, b) Armature ..	73
Figure 3-31 Interfaces considérées sur le parapet en conception	75
Figure 3-32 Point de contrôle en déplacement pour le chargement structural	76
Figure 3-33 Position des moniteurs considérés pour le chargement structural en conception, a) Face arrière, b) Face avant	77
Figure 3-34 Comportement structural des deux parapets, a) Déplacement transversal dans l'axe du vérin selon la force, b) Soulèvement des parapets selon la force, c) Contrainte maximale dans les armatures selon le soulèvement du parapet	79
Figure 3-35 Patron de fissuration sur le parapet de référence	80
Figure 3-36 Patron de fissuration sur le parapet hybride avec BFUP fibres en acier 2 %	81
Figure 3-37 Patron de fissuration sur le parapet hybride avec BFUP fibres en PVA 3 %	81
Figure 3-38 Fissuration en surface dans les parapets	82

Figure 3-39 Délamination dans les parapets hybrides à la plastification des armatures en conception	83
Figure 3-40 Déplacement à l'interface selon la force appliquée sur les parapets hybrides, a) Face avant, b) Dessus.....	84
Figure 4-1 Spécimens de traction directe, a) Os, b) Tirant 50 x 100 mm, c) Montage de test	88
Figure 4-2 Comportement en traction du BFUP avec 2 % de fibres en acier	89
Figure 4-3 Comportement en traction du BFUP avec 2 % de fibres en PVA.....	90
Figure 4-4 Comportement en traction du BFUP avec 3 % de fibres en PVA.....	91
Figure 4-5 Segment de coque fabriqué a) extrémité, b) milieu.....	92
Figure 4-6 Remplissage des segments de coque, a) Coffrage utilisé pour les essais d'écoulement, b) Coque avec rebord en rouge	93
Figure 4-7 Photos de chaque coque coulée	94
Figure 4-8 Bulles d'air présentes sur la surface du dernier segment de coque coulé	95
Figure 4-9 Surfaces avec fibres exposées après, a) 22 h, b) 24 h, c) 26 h, d) 28 h depuis la coulée	96
Figure 4-10 Vue de la coque de face avec les dimensions extérieures et intérieures.....	97
Figure 4-11 Vue de la coque de côté avec les dimensions extérieures et intérieures et la position du capteur SOFO	98
Figure 4-12 Dalle avec armature en attente	99
Figure 4-13 Dalle fabriquée à BPDR	100
Figure 4-14 Trous prévus dans la coque pour le remplissage	101
Figure 4-15 Fibre optique SOFO fixée sur le moule intérieur de la coque en BFUP	102
Figure 4-16 Coffrage utilisé pour couler les coques en BFUP, a) Vue assemblée, b) Moule extérieur en acier, c) Moule intérieur démontable en bois	102
Figure 4-17 Moule en bois avec le retardateur de prise	103

Figure 4-18 Étapes de production de la coque, a) Démoulage du moule intérieur, b) Surface rugueuse, c) Cure.....	105
Figure 4-19 Procédure de retournement de la coque.....	105
Figure 4-20 Remplissage de la coque 1, a) Première gâchée, b) Deuxième gâchée, c) Zone perturbée avec moins de fibres	106
Figure 4-21 Démoulage du moule intérieur	107
Figure 4-22 Frottement lors du démoulage du moule intérieur	108
Figure 4-23 Démoulage du moule extérieur, a) Fixation sur la dalle, b) Endommagement créé lors du démoulage	109
Figure 4-24 Changement sur la face avant de la coque, a) Géométrie initiale, b) Géométrie finale	110
Figure 4-25 Extrémité démontable dans le moule extérieur	110
Figure 4-26 Tiges filetées coulées dans le BFUP et fixées dans le cadre en acier.....	111
Figure 4-27 Deuxième coque en BFUP	112
Figure 4-28 Troisième coque en BFUP, a) Face avant, b) Extrémité, c) Face arrière	112
Figure 4-29 Réparation de la fissure par injection à l'époxy	113
Figure 4-30 Coque en BFUP installée sur la dalle	114
Figure 4-31 Remplissage des coques, a) Procédure, b) Armatures enrobées de BO	115
Figure 4-32 Phases de chargement sur les spécimens de caractérisation en traction.....	117
Figure 4-33 Spécimens de traction directe, a) Os 50×100 mm, b) Tirant 50×50 mm, c) Montage d'essai.....	117
Figure 4-34 Comportement en traction du BFUP avec 2 % de fibres en Acier.....	118
Figure 4-35 Comportement en traction du BFUP avec 3 % de fibres en PVA.....	119
Figure 4-36 Ouverture de fissure pour avoir la reprise de la charge a) BFUP avec fibres en Acier, b) BFUP avec fibres en PVA	121
Figure 4-37 Comportement en traction des armatures	122

Figure 4-38 Installation des jauges dans les coffrages, a) Retrait restreint de la coque, b) Retrait libre dans un prisme, c) Dimensions du prisme	123
Figure 4-39 Évolution de la température pour les spécimens restreint et libre mesurée par les thermocouples	124
Figure 4-40 Retrait effectif mesuré par la jauge SOFO	125
Figure 4-41 Retrait restreint et libre mesuré par les jauges TML	126
Figure 4-42 Instrumentation lors du remplissage des coques, a) LVDT, b) SIC	128
Figure 4-43 Déplacement de la coque latéral.....	129
Figure 4-44 Profil de déplacements transversaux dans la coque 2 avec fibres en acier	130
Figure 4-45 Déformation dans les barres d'armature noyées dans le BO	130
Figure 4-46 Montage pour les essais structuraux sur parapets hybrides.....	131
Figure 4-47 Instrumentation pour le parapet avec coque en BFUP avec fibres en PVA.....	132
Figure 4-48 Instrumentation pour le parapet avec coque en BFUP avec fibres en acier	133
Figure 4-49 Instrumentation sur les armatures pour les deux parapets.....	133
Figure 4-50 Instrumentation sur la face avant du parapet et de la dalle.....	134
Figure 4-51 Instrumentation sur la face avant du parapet, a) Soulèvement du parapet et de la dalle, b) Délamination sur le haut du parapet	134
Figure 4-52 Instrumentation dans le dos du parapet, a) Parapet avec fibres en PVA, b) Parapet avec fibres en acier	135
Figure 4-53 Force déplacement des parapets hybrides, a) BFUP PVA 3 % 1 ^{er} et 2 ^e chargement (zoom), b) BFUP PVA 3 % et acier 2 %.....	136
Figure 4-54 Soulèvement des parapets hybrides, a) BFUP PVA 3 % 1 ^{er} et 2 ^e chargement (zoom), b) BFUP PVA 3 % et acier 2 %	137
Figure 4-55 Mode de rupture final des parapets hybrides avec coque en, a) PVA 3%, b) Acier 2%	137

Figure 4-56 Déformation dans les barres pour les parapets hybrides, a) Barre horizontale, b) Barre verticale	138
Figure 4-57 Patron de fissuration pour le parapet BFUP PVA 3%.....	139
Figure 4-58 Ouverture des fissures principales mesurées avec DIC pour le parapet en BFUP PVA 3%, a) Position de la mesure des fissures, b) Ouvertures de fissures	140
Figure 4-59 Patron de fissuration pour le parapet BFUP acier 2%.....	142
Figure 4-60 Ouverture des fissures principales mesurées avec DIC pour le parapet en BFUP acier 2%, a) Position de la mesure des fissures, b) Ouvertures de fissure	143
Figure 4-61 Déplacement à l'interface entre le cœur et la coque du parapet PVA 3 %, a) En bas du parapet, b) En haut du parapet.....	144
Figure 4-62 Déplacement à l'interface entre le cœur et la coque du parapet Acier 2 %, a) En bas du parapet, b) En haut du parapet.....	145
Figure 5-1 Position des trous de remplissage dans la coque	148
Figure 5-2 Modification de la coque, a) Géométrie initiale, b) Géométrie finale.....	148
Figure 5-3 Comportement en traction simplifié des BFUP.....	150
Figure 5-4 Comportement en traction simplifié et réduit de 50 % des BFUP	150
Figure 5-5 Modèle pour étudier le retrait restreint de la coque, a) Macro-éléments, b) Maillage	151
Figure 5-6 Retrait de la coque selon le type de fibres dans le BFUP, a) Retrait effectif, b) Ouverture de fissure selon le retrait libre appliqué	152
Figure 5-7 Microfissuration déterminée avec les modèles pour le retrait expérimental mesuré	153
Figure 5-8 Fissuration due au retrait observée dans les coques de 30 mm	153
Figure 5-9 Modèle pour étudier le remplissage de la coque avec le BO, a) Macro-éléments, b) Maillage	154
Figure 5-10 Conditions limites sur la coque pour le remplissage du béton	155

Figure 5-11 Comportement des différentes coques lors de leur remplissage avec du BO selon le BFUP, a) Déplacement transversal, b) Ouverture de fissure	156
Figure 5-12 Comportement des différentes coques lors de leur remplissage avec du BO avec le BFUP avec fibres en acier pour les deux restraints, a) Déplacement transversal, b) Ouverture de fissure	157
Figure 5-13 Comportement des différentes coques lors de leur remplissage avec du BO avec le BFUP avec fibres en PVA pour les deux restraints, a) Déplacement transversal, b) Ouverture de fissure	157
Figure 5-14 Déformation transversale lors du remplissage de BO en chantier	158
Figure 5-15 Modèles avec moniteurs	159
Figure 5-16 Comportement structural des parapets hybrides.....	160
Figure 5-17 Soulèvement des parapets hybrides.....	161
Figure 5-18 Déplacement à l'interface entre le cœur et la coque selon la force appliquée sur les parapets hybrides.....	162
Figure 5-19 Ouverture de fissure selon la force appliquée sur les parapets hybrides.....	162
Figure 5-20 Patron de fissuration pour le parapet avec coque avec fibres en acier	163
Figure 5-21 Patron de fissuration pour le parapet avec coque avec fibres en PVA	164
Figure 5-22 Comportement structural des parapets hybrides courbe force-déplacement selon la qualité de l'interface cœur-coque.....	165
Figure 5-23 Déplacement à l'interface cœur-coque dans le parapet hybride avec coque avec fibres en acier selon la qualité de l'interface cœur-coque, a) Devant, b) Dessus.....	166
Figure 5-24 Déplacement à l'interface cœur-coque dans le parapet hybride avec coque avec fibres en PVA selon la qualité de l'interface cœur-coque, a) Devant, b) Dessus	167
Figure 5-25 Loi de comportement en traction du BFUP avec fibres en Acier avec différentes réductions de performances.....	168
Figure 5-26 Loi de comportement en traction du BFUP avec fibres en PVA avec différentes réductions de performances.....	168

Figure 5-27 Comportement structural des parapets hybrides selon les différentes réductions de performances dans le BFUP	169
Figure 5-28 Ouverture de fissure des parapets hybrides courbe force-déplacement selon la réduction appliquée sur le BFUP	170
Figure 5-29 Comportement structural des parapets hybrides courbe force-déplacement selon la réduction appliquée sur le BFUP	171
Figure A-1 Conditions limites et moniteurs sur l'essai de matériau sur un cube (gauche) et déformation du cube (état initial au centre et état final à droite)	188
Figure A-2 Comportement de la loi mesurée réduite au laboratoire et le test sur le cube pour un béton avec fibre en acier 2 % à 90 jours a) prépic, b) postpic	189
Figure A-3 Comportement de la loi mesurée réduite au laboratoire et le test sur le cube pour un béton avec fibre en PVA 3 % à 113 jours a) prépic, b) postpic	189
Figure A-4 Module élastique et chargement/déchargement en prépic (gauche) et comportement postpic (droite)	190
Figure A-5 Comportement a) prépic, b) postpic d'un BFUP avec déchargement-rechargement dans la partie écrouissante	190
Figure B-1 Page de couverture des plans avec vue en 3D du parapet et de la dalle	191
Figure B-2 Dalle avec armatures en attente et armatures dans le parapet.....	192
Figure B-3 Dalle de béton avec ancrages de manutention	193
Figure B-4 Vues orthogonales de la coque en BFUP.....	194
Figure B-5 Emplacement du capteur SOFO dans la coque.....	195
Figure B-6 Détail de l'armature dans le parapet et dans la dalle	196
Figure C-1 Retrait restreint et libre dans le BFUP de la coque 1 - BFUP fibre en acier 2 %	197
Figure C-2 Retrait restreint et libre dans le BFUP de la coque 2 - BFUP fibre en acier 2 % a) courbes modifiées, b) courbe finale et initiale retrait restreint - TML, c) courbe finale et initiale retrait libre – TML.....	198

Figure C-3 Retrait restreint et libre dans le BFUP de la coque 2 - BFUP fibre en acier 2 % a) courbes modifiées, c) courbe finale et initiale retrait restreint - SOFO, b) courbe finale et initiale retrait restreint - TML, d) courbes finale et initiale retrait libre – TML	199
Figure C-4 Température mesurée au laboratoire pour chaque coque	200
Figure C-5 Déformation du parapet a) avec la butée de Drystone b) sans la butée	201
Figure C-6 Force déplacement des parapets avec les trois types d'instruments, a) BFUP PVA 3 %, c) BFUP acier 2 %.....	202
Figure C-7 Déplacemen de la dalle parapet PVA 3 % a) transversal b) vertical	203
Figure C-8 Déplacement de la dalle parapet crier 2 % a) transversal b) vertical	203

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Sigles

AASHTO	American Association of Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATENA	Advanced Tool for Engineering Nonlinear Analysis
BFHP	Béton Fibré à Hautes Performances
BFUP	Béton Fibré à Ultra-hautes Performances
BHP	Béton à Hautes Performances
BO	Béton Ordinaire
BPDL	Béton Préfabriqué du Lac
BPDR	Béton Préfabriqué du Richelieu
BUHP	Béton à Ultra-Hautes Performances
CNB	Code National du Bâtiment du Canada
CSA	Canadian Standard Association
E/C	Rapport eau sur liant ou eau sur ciment
LVDT	Linear Variable Differential Transformer (transducteur différentiel variable linéaire)
MASH	Manual for Assessing Safety Hardware
MTQ	Ministère des Transports du Québec
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
PJCCI	Société des Ponts Jacques Cartier et Champlain Incorporée
PVA	Alcool Polyvinylique
SIC	Système d’Imagerie Corrélée
VM	Ville de Montréal

Variables alphabet latin

C	Coefficient de cohésion pour une interface
d_f	diamètre de fibre
E_c	Module élastique du béton
E_{pc}	Module élastique dans la partie écrouissante, correspondant au retour élastique dans le cas de déchargement.
f'_c	Résistance à la compression à 28 jours d'un béton
f'_t	Résistance à la traction à 28 jours d'un béton
f_t	Traction minimale pour une interface avant la rupture
f_{te}	Résistance de la matrice d'un BFUP
f_{tu}	Contrainte maximale prépic d'un BFUP
G	Module de cisaillement
K_{nn}	Rigidité normale d'une interface
K_{tt}	Rigidité tangentielle d'une interface
L_{ch}^t	Longueur caractéristique du maillage en traction
L_f	Longueur de fibre
w	Ouverture de fissure

Variables alphabet grec

σ	Contrainte
ε_{loc}^t	Déformation post-élastique où il y a localisation de la fissure
ε^t	Déformation post-élastique quelconque en traction
μ	Coefficient de frottement dans une interface après la rupture
ν	Coefficient de Poisson

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A Vérification du bon comportement du logiciel ATENA.....	188
ANNEXE B Plans envoyés à l’usine pour la fabrication des coques et des dalles.....	191
ANNEXE C détails sur les résultats expérimentaux.....	197

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Problématique

Les dispositifs de retenue sont des éléments présents sur tous les ponts. Ces éléments sont essentiels à la sécurité des usagers de la route en gardant des véhicules qui ont perdu le contrôle dans les voies de circulation. Les parapets en béton sont des dispositifs de retenue qui sont plus fréquemment utilisés depuis que les exigences de sécurité ont été augmentées depuis le début des années 2000. Vu leur exposition, ces éléments sont généralement ceux qui se détériorent le plus rapidement sur les ponts. Cette détérioration est souvent liée à la fissuration qui se développe rapidement à la suite de la fabrication des parapets sur les ponts. La production des parapets coulés en place se fait toujours après avoir complété la fabrication de la dalle du pont et que celle-ci ait atteint une résistance suffisante. Lorsque le béton du parapet est mis en place dans les coffrages, le retrait est restreint par la dalle rigide en dessous et les nombreuses armatures du parapet. Cette restriction importante crée très fréquemment de la fissuration dès leur jeune âge (Cusson & Repette, 2000). À titre d'exemple, la fissuration transversale observée sur les parapets du pont Vachon au nord de Montréal est clairement visible 7 mois après le remplacement des parapets (Figure 1-1). Les fissures sont espacées de 0.75 m et des traces de rouilles indiquent que les armatures ont déjà commencé à corroder.

La fissuration des parapets est très préjudiciable, car ils sont soumis à un environnement très sévère avec des cycles de gel-dégel et des sels de déverglaçage projetés sur leur surface (Staton & Knauff, 2007). Le gel-dégel peut créer une fissuration supplémentaire avec l'eau qui s'infiltre dans la porosité dans les fissures du béton. Les chlorures contenus dans les sels de déverglaçage pénètrent alors plus rapidement et plus profondément dans le parapet par les fissures, ce qui initie et accélère la corrosion des armatures du parapet qui, avec le temps, générera de la délamination dans le béton d'enrobage. Du fait de leur position sur les ponts, les parapets sont exposés aux cycles de mouillage-séchage qui favorisent l'infiltration de l'eau et des chlorures. Ainsi la fissuration due au retrait restreint et les conditions d'expositions sévères mènent à une détérioration précoce des parapets. La Figure 1-2 montre des parapets de moins de 5 ans avec une fissuration de retrait restreint

importante. Chaque ligne foncée est une fissure où l'eau s'infiltré en profondeur. Ce patron de fissuration est classique pour les parapets coulés en place.



Figure 1-1 Fissuration observée sur le pont Vachon 7 mois après la réhabilitation (Cusson & Repette, 2000)



Figure 1-2 Fissuration sur les parapets du pont de l'autoroute 40 dans Montréal-Est

Différentes solutions sont utilisées pour réduire la fissuration dans les parapets. Certains parapets de pont sont coulés en quinconce à tous les 4 mètres pour réduire la longueur des éléments. La restrainte et la fissuration sont alors réduites. Les armatures conventionnelles en acier sont parfois remplacées par des armatures galvanisées, recouvertes d'époxy ou en composite. Bien que ceci retarde ou évite les problèmes de corrosion, la fissuration du béton due au retrait restreint demeure (Cusson et al., 2008). Une autre solution est de préfabriquer les parapets en usine et de les installer par différents moyens de connexion à la dalle (Damry et al., 2013; Gendron et al., 2022; Namy et al., 2015). Ceci évite complètement le retrait restreint causé par la rigidité de la dalle. Les parapets préfabriqués ont une durée de vie améliorée, mais lorsqu'un béton conventionnel est utilisé pour leur fabrication, il peut être peu durable quand il est soumis à l'environnement très sévère des ponts au Québec. Il est alors pertinent de remplacer le béton conventionnel par des bétons fibrés, soit par l'utilisation de parapets monolithiques en béton fibré (BFUP ou BRF) ou de parapets hybrides jumelant béton et BFUP.

Ce projet de recherche est consacré au développement de la solution présentée d'un parapet hybride composé d'une coque en BFUP préfabriquée en usine qui agit comme un coffrage permanent pour la mise en place d'un cœur en BO coulé sur place en chantier. Les armatures verticales du parapet sont en attente, ancrées dans la dalle, la coque est installée sur la dalle au-dessus des armatures et le cœur en BO est coulé. Ce concept de parapet utilise alors la géométrie normée pour les parapets et les armatures qui joignent la dalle et le parapet.

1.2 Contexte

Ce projet fait suite à plusieurs travaux de recherche menés à Polytechnique Montréal en collaboration avec différents partenaires industriels. Le Québec présente un environnement très sévère pour les parapets, ce qui incite les propriétaires d'ouvrages à trouver des solutions novatrices à travers des projets de recherche. Les travaux de recherche ont débuté avec Braïke (2007) qui a proposé une étude numérique sur l'utilisation de différents parapets préfabriqués : référence avec du BHP de 50 MPa, avec du BRF de 50 MPa, de 90 MPa et de 150 MPa. Les matériaux sélectionnés ont permis de réduire la quantité d'armatures et de diminuer le volume de béton, ce qui est avantageux du côté économique

et permet des économies de main-d'œuvre. La réduction de matériaux est en partie compensée par le coût de production supérieur des BRF. Cependant, la durabilité attendue à long terme devrait mener à des coûts d'entretien à long terme réduits. Par la suite, différents projets de parapets préfabriqués sont menés avec différents modes d'encrage à la dalle : niche fermée et ancrages en U (Duchesneau et al., 2011; Thiaw et al., 2016) et avec ancrages et niche ouverte (Damry et al., 2013; Gendron et al., 2022). Des parapets préfabriqués avec trottoirs intégrés sont aussi testés (Thiaw et al., 2016). Enfin, une étude est menée sur des parapets sous chargement statique et dynamique, chargés au centre ou à l'extrémité du parapet et sur des parapets avec ou sans joints de continuité sur différentes longueurs (Gendron et al., 2022).

1.3 Objectifs

L'objectif global du projet est de poursuivre le développement de parapets hybrides à Polytechnique Montréal en créant un parapet TL-4 hybride composé d'une coque en BFUP et d'un cœur en BO coulé en place avec armatures conventionnelles en attente ancrées dans la dalle de pont (Figure 1-3). Ce nouveau concept ne modifiant pas les armatures d'ancrage et la section des parapets vise à éviter l'exigence de réalisation d'essais d'impact avec véhicules pour certifier les parapets avec de nouvelles configurations. En effet, cette exigence rend plus complexe l'intégration des parapets préfabriqués développés jusqu'à maintenant. Au terme de ce projet, les propriétaires d'ouvrage (comme VM, PJCCI) pourront bénéficier d'une alternative permettant de construire des parapets de ponts de durabilité améliorée.

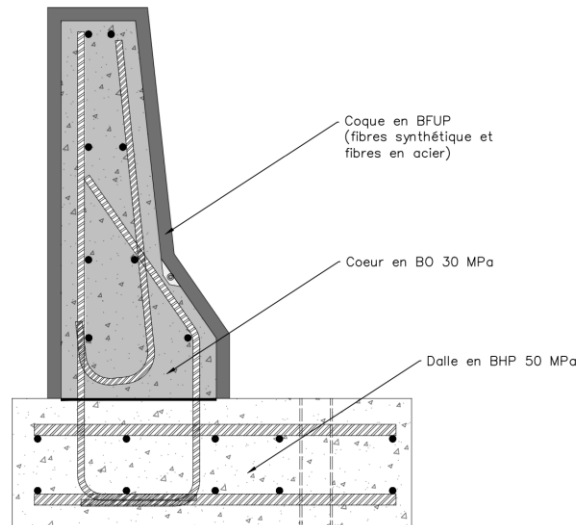


Figure 1-3 Parapet MTQ201 hybride BFUP/BO sur la dalle en BHP

Quatre objectifs spécifiques sont visés pour ce développement.

- Concevoir la coque en BFUP pour résister aux efforts lors de la production : retrait restreint, manipulation et remplissage avec le béton ordinaire. Il faut aussi vérifier que le parapet hybride résiste à la charge prescrite par la norme CSA S6-19 (2019) censée reproduire la charge d'impact.
- Fabriquer deux parapets hybrides de taille réelle avec les phases de production attendues en usine et en chantier.
- Tester les parapets hybrides en laboratoire pour les différents cas de chargement prévus lors de la production, manutention, remplissage et en service sur un pont.
- Développer un modèle numérique qui permet de reproduire le comportement global des coques en BFUP.

1.4 Méthodologie

Ce projet comporte trois phases principales. Premièrement, il faut concevoir la coque qui sera utilisée comme coffrage. Des études par éléments finis seront conduites afin de déterminer l'épaisseur de la coque pour qu'elle résiste à trois cas de chargement :

1. retrait restreint de la coque causé par le retrait du BFUP dans le coffrage;

2. pression hydrostatique causée par le béton ordinaire frais dans la coque utilisée comme coffrage permanent;
3. chargement statique de la norme CSA S6-19 (2019) en participant en action mixte avec le béton ordinaire du cœur.

Deuxièmement, des parapets hybrides sont fabriqués avec du BFUP avec fibres en acier et fibres en PVA. La coque sera fabriquée au laboratoire de structures avec un coffrage fabriqué à l'usine de BPDF. Le retrait du BFUP est mesuré et la coque est inspectée. La coque est ensuite fixée sur une dalle de pont fabriquée à l'usine. Elle est remplie avec du BO. La pression de remplissage du béton dans la coque est mesurée et des inspections sont réalisées. Finalement, le parapet hybride sur la dalle de pont est testé au laboratoire de façon statique jusqu'à rupture.

Troisièmement, les modèles par éléments finis sont calibrés avec les résistances des vrais matériaux pour reproduire les résultats des 3 cas de chargement mesurés expérimentalement. Une fois les modèles calibrés, des études paramétriques sont réalisées pour étudier des paramètres de conception.

1.5 Contenu du mémoire

Ce mémoire est divisé en 6 chapitres. Le Chapitre 1 introduit et met en contexte le projet de recherche. Ensuite, le Chapitre 2, contient une revue de littérature portant sur les BFUP, les coques minces utilisées comme coffrage permanent, les normes qui régissent la conception des parapets et les travaux de recherches antérieurs menés à Polytechnique Montréal sur le sujet. Le Chapitre 3 décrit la conception des coques. La géométrie, les calculs, les modélisations numériques et les résultats préliminaires sont abordés. Au Chapitre 4, la phase expérimentale composée de la fabrication des parapets hybrides, la caractérisation des matériaux, le montage et l'instrumentation des 3 cas de chargement et les résultats expérimentaux seront décrits. Le Chapitre 5 porte sur la calibration des modèles numériques pour étudier l'impact de différents paramètres de conception sans devoir retourner au laboratoire. Finalement, le Chapitre 6 conclut les travaux et présente des recommandations pour l'application des parapets hybrides sur des ponts réels et des travaux de recherche futurs.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente d’abord la revue de la littérature sur le Béton Fibré à Ultra-hautes performances (BFUP) qui est étudié en grande partie dans ce mémoire. Par la suite, la revue aborde l’étude de coques minces en béton, les normes de conception des parapets ainsi que les travaux de recherche menés dans le passé à Polytechnique Montréal sur les parapets préfabriqués.

2.1 Béton Fibré à Ultra-Hautes Performances (BFUP)

Les BFUP sont des bétons idéaux pour augmenter la durabilité des ouvrages en béton exposés à des conditions d’exposition ou climatiques rigoureuses comme celles rencontrées au Québec pour plusieurs raisons. La compacité élevée de cette gamme de béton permet d’obtenir une durabilité élevée en réduisant la porosité. Leur contenu en fibres permet de contrôler la fissuration et ainsi réduit la perméabilité à l’état fissuré. Les fibres offrent aussi un gain de ductilité en traction.

Le Tableau 2-1 présente les différentes propriétés mécaniques du BFUP. Le BFUP a une résistance à la compression presque 2 fois plus grande que le BHP, tout en ayant une résistance à la traction presque 3 fois plus grande et un comportement écrouissant en prépic lorsqu’un dosage en fibres important est utilisé.

Tableau 2-1 Propriétés mécaniques des différentes gammes de béton utilisées couramment (adapté de Charron & Desmettre, 2013)

Propriété	BO	BHP	BFHP	BFUP
Compression – f_c [MPa]	20 à 40	50 à 90	50 à 90	120 à 180
Traction – f_t [MPa]	1.5 à 2.5	3 à 4.5	3 à 4.5	7 à 15
Module – E_c [GPa]	20 à 25	25 à 35	25 à 35	30 à 45

2.1.1 Composition

Le BFUP est une gamme de béton avec une composition qui se différencie des autres bétons par son faible rapport eau liant (E/L), généralement inférieur à 0.2, son absence de pierre et une composition granulaire très fine (Charron & Desmettre, 2013). Le Tableau

2-2 présente les différentes compositions des bétons couramment utilisés au Québec. Le BFUP se différencie également des autres gammes de béton par une quantité de liants environ 3 fois supérieure dans le volume total des mélanges.

Tableau 2-2 Composition des différentes gammes de béton utilisées couramment (adapté de Charron & Desmettre, 2013)

Composition	BO	BHP	BFHP	BFUP
Rapport E/L	≥0.40	0.30 à 0.40	0.30 à 0.40	0.15 à 0.25
Liant [kg/m ³]	300 – 400	350 à 450	350 à 550	800 à 1000
Ajouts minéraux	Parfois	Oui	Oui	Oui
Sable	Oui	Oui	Oui	Oui
Pierre	Oui	Oui	Oui	Non
Fibres* [kg/m ³]	Non	Non	40 à 120	160 à 480
(%-vol)			(0.5 à 1.5)	(2 à 6)

* Dans ce tableau, seulement les BFUP avec fibres en acier sont présentés. Le mélange est le même sauf le poids de fibres qui change.

Les BFUP ont d’abord été développés avec des fibres en acier parce que ces fibres ont une résistance en traction et un module élastique très élevés qui permettent d’améliorer la capacité de déformation en traction caractérisée par un écrouissage en déformation avant l’atteinte de la résistance maximale (phase prépic) tout en présentant une phase adoucissante en postpic en traction directe (Richard & Cheyrezy, 1995; Wille et al., 2014). Plus récemment, des travaux de recherche ont porté sur l'utilisation de fibres synthétiques qui sont moins coûteuses et qui ne sont pas atteintes de problème d'oxydation comme les fibres en acier conventionnelles. Les fibres synthétiques les plus courantes sont celles en alcool polyvinylique (PVA), en polypropylène et en polyéthylène (Gong et al., 2022; Karim & Shafei, 2022; Nana et al., 2023). La Figure 2-1 compare les propriétés de la plupart des fibres synthétiques et de celles en acier. On constate que leur résistance et leur module élastique sont considérablement plus faibles que pour les fibres en acier. Cependant les fibres en aramide ou en carbone sont très compétitives, mais leurs coûts n’en font pas des fibres d’utilisation courante. Les faibles propriétés mécaniques des autres fibres synthétiques affectent leur application structurale parce qu’elles présentent plus

difficilement des propriétés écrouissantes en phase prépic. La sous-section suivante montre le comportement mécanique des BFUP composés avec les deux types de fibres, en acier et synthétiques.

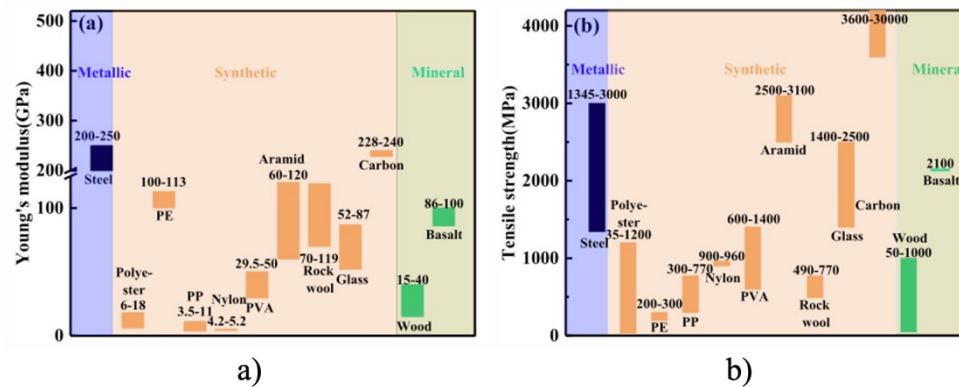


Figure 2-1 Propriétés des fibres utilisées dans le BFUP, a) Module élastique, b) Résistance à la traction (Gong et al., 2022)

Certaines fibres synthétiques ont aussi tendance à absorber l'eau, ce qui nécessite parfois de corriger la quantité d'eau ajoutée dans les mélanges (Provete Vincler et al., 2019). La variation de la quantité ou du type de fibres dans un mélange peut aussi affecter l'étalement des BFUP (Gong et al., 2022).

2.1.2 Comportement mécanique

Le rapport E/L faible des BFUP et leur compacité élevée procurent une résistance en compression qui doit atteindre minimalement 120 MPa (CSA S6-19, 2019), valeur nettement supérieure à celles des bétons ordinaires. Les fibres ajoutent de la ductilité au béton (Abbas et al., 2015; Gong et al., 2022; Hassan et al., 2012). La Figure 2-2 montre l'intérêt d'ajouter des fibres dans les BFUP pour le comportement en compression, le matériau est moins fragile alors que la résistance maximale est légèrement améliorée avec l'ajout de fibres.

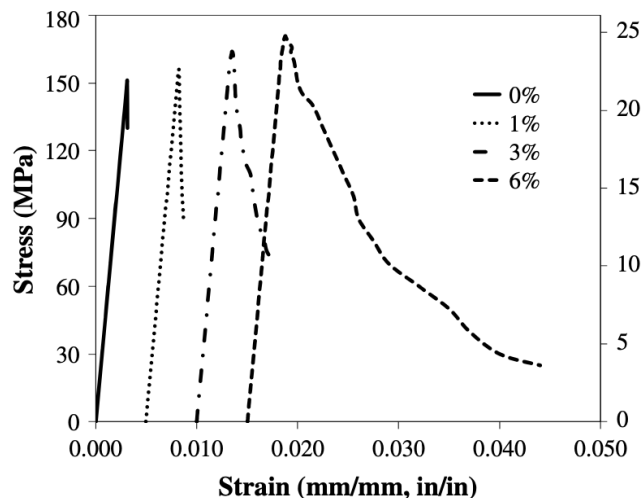


Figure 2-2 Comportement en compression de différents BFUP avec un pourcentage de fibres variable (Abbas et al., 2015)

La matrice est aussi plus résistante et plus ductile en traction. La Figure 2-4 montre l'intérêt d'incorporer des fibres dans les BFUP pour améliorer la résistance à la traction. Hassan et al. (2012) montrent que l'ajout de 2%-vol de fibres courtes de 13 mm de longueur et de diamètre de 0.2 mm permet d'avoir le plateau d'écrouissage et une augmentation de la résistance à la traction ainsi qu'un comportement postpic adoucissant. Les fibres courtes ($L_f = 13$ mm, $d_f = 0.2$ mm) sont utilisées et offrent des comportements à la traction similaires (Abid, 2021; Mina et al., 2021; Nguyen et al., 2023). Une augmentation du volume de fibres en acier de 2 à 4 % permet d'augmenter la résistance en traction, mais réduit la capacité en déformation, comme illustré à la Figure 2-3.

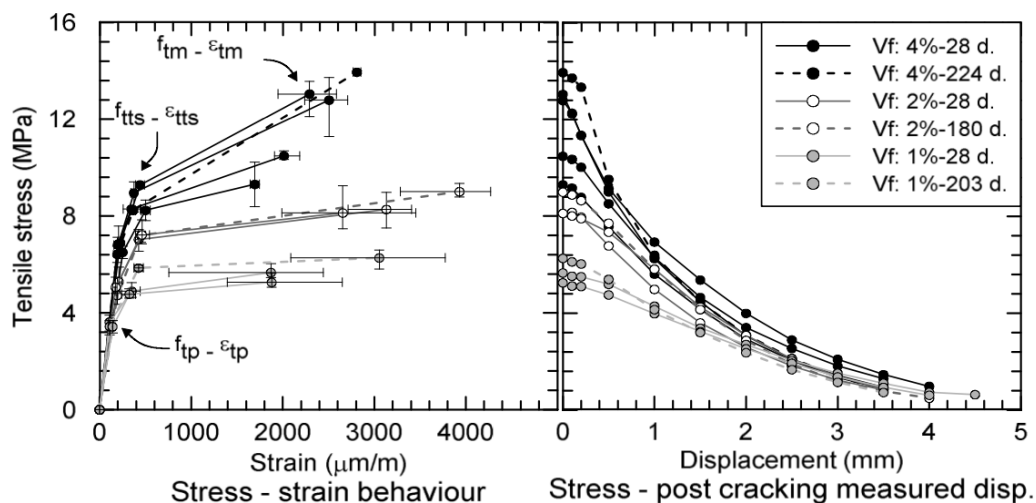


Figure 2-3 Lois idéalisées en traction pour des BFUP avec différents pourcentages de fibres et à différentes échéances (Lagier, 2015)

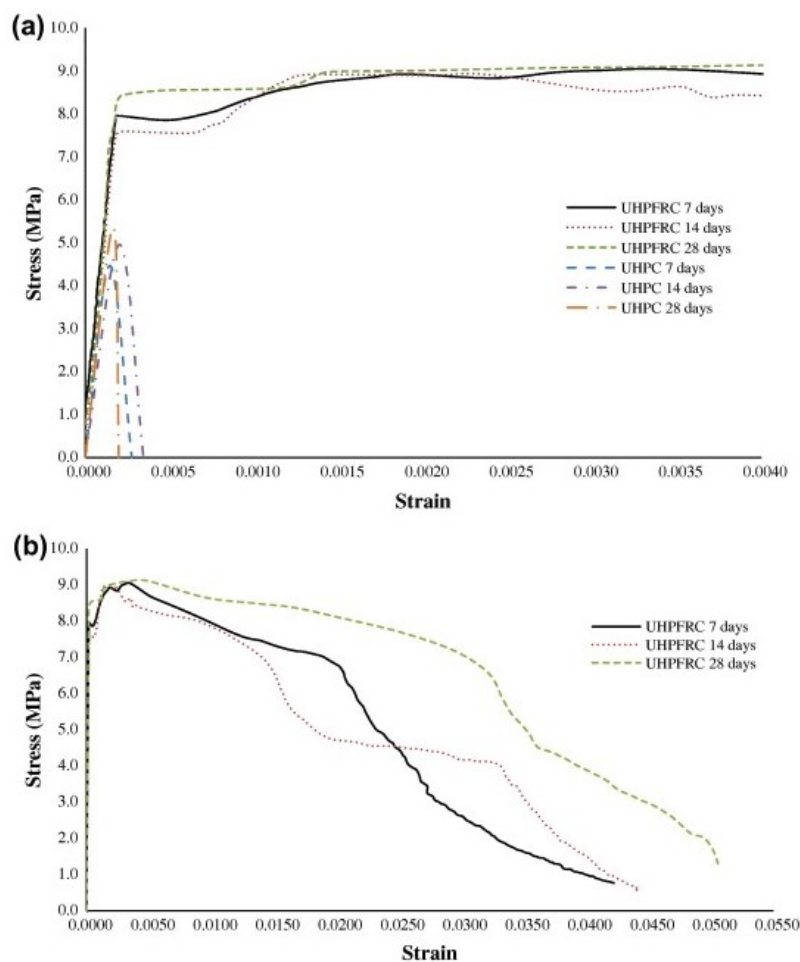


Figure 2-4 Contrainte déformation des BFUP avec (courbes noire, rouge et verte) et sans fibres (courbe bleue, mauve et orange), a) Avant la première fissure, b) Courbe complète (Hassan et al., 2012; Nguyen et al., 2023)

La Figure 2-5 montre l'intérêt des BFUP avec fibres en acier par rapport aux autres gammes de béton. Le comportement classique d'un béton ordinaire est qu'à la fin de la phase élastique, une fissure se localise et la rupture du spécimen est presque immédiate. Pour un Béton Fibré à Hautes Performances (BFHP) dès la fin de la phase élastique, le matériau passe d'abord par une phase adoucissante avec localisation d'une macrofissure. Pour un BFUP avec un dosage suffisant de fibres en acier, le béton passe d'abord par une phase écouvissante avec la formation de nombreuses microfissures pour ensuite passer par la même phase adoucissante lorsqu'une macrofissure est formée.

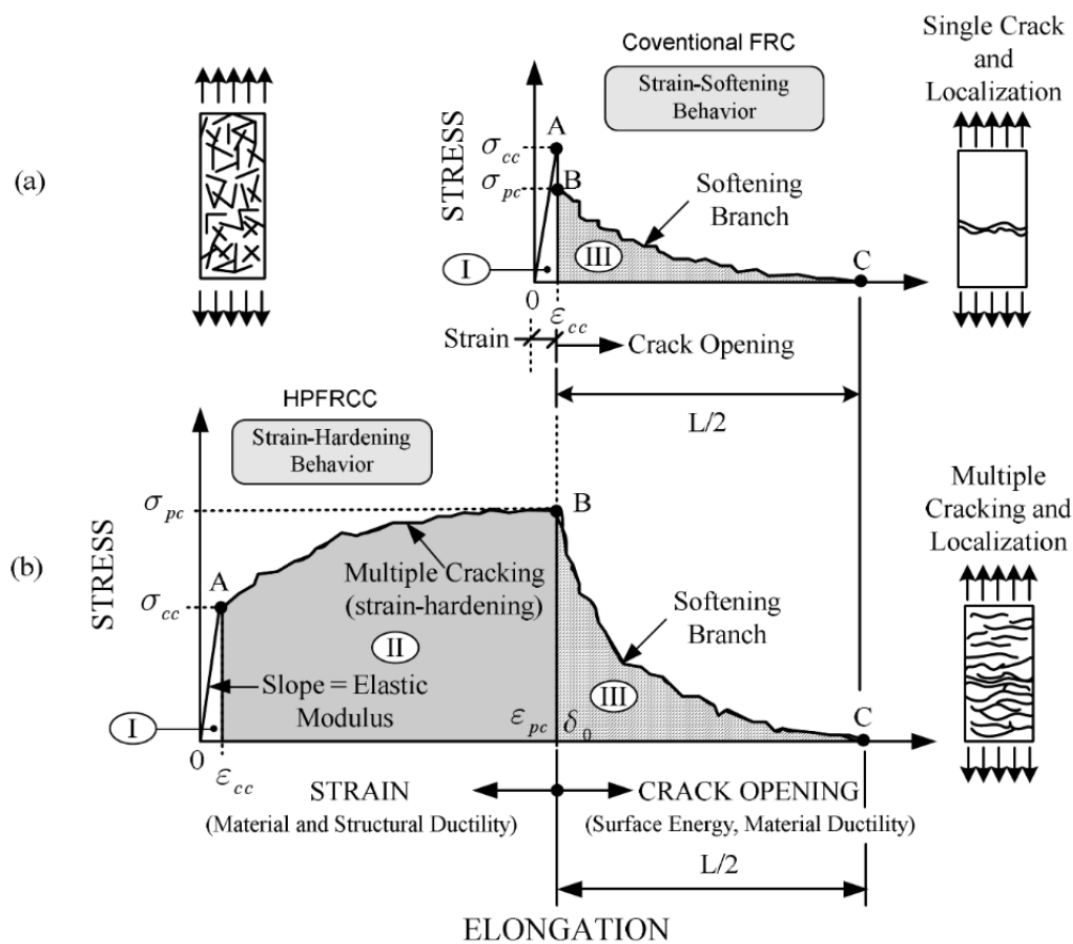


Figure 2-5 Comportement en traction des BFHP et des BFUP (Naaman, 2008)

Pour les fibres synthétiques, la phase écouvissante n'est généralement pas présente dans le comportement en traction du matériau et la caractérisation dans un essai de traction directe

est plus difficile (Nana et al., 2023). La résistance en traction est alors obtenue en testant des prismes en flexion et en idéalisant un calcul inverse. L'étude de Nana et al. (2023) a démontré qu'un BFUP avec 3 %-vol de fibres en PVA avait une résistance maximale en flexion de 14 à 16 MPa, équivalente à 6 MPa en traction directe, sans comportement écrouissant.

Chanvillard et Rigaud (2003) ont conduit des essais similaires avec des BFUP avec fibres en acier qui ont présenté un comportement très différent (voir Figure 2-6a). Le BFUP avec fibres en acier obtient une résistance plus grande de 30 à 40 MPa en flexion et un comportement très ductile avec de la multifissuration, alors que le BFUP avec fibres en PVA présente une contrainte maximale plus petite avec une localisation de fissure très tôt et accompagnée d'une chute très rapide de la résistance. Le comportement moins ductile et la chute de résistance rapide au début sont expliqués par Nana et al. (2023) comme étant dus à l'absence de la phase écrouissante de ce matériau. Ce comportement est principalement lié au faible module élastique des fibres synthétiques qui doivent s'allonger davantage avant d'être en mesure de reprendre les efforts de traction supportés par la matrice cimentaire avant la fissuration.

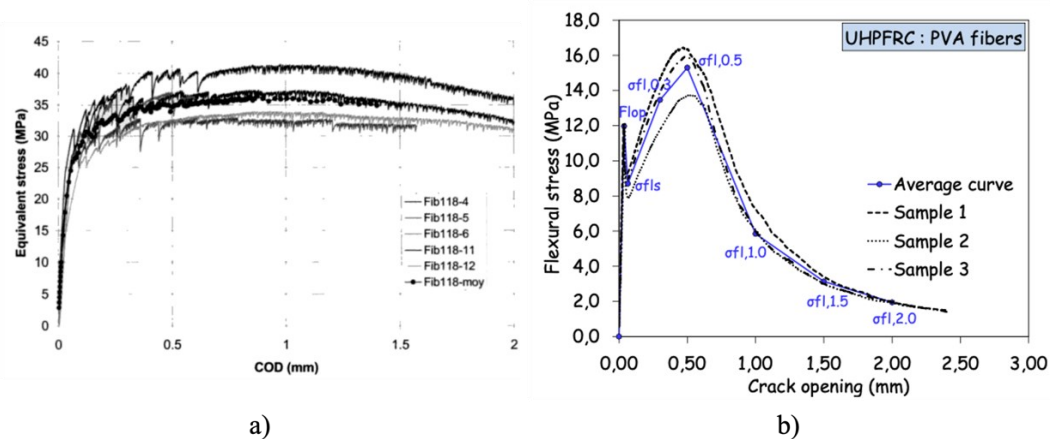


Figure 2-6 Comportement du prisme 70x70x280 mm en flexion pour deux BFUP a) avec fibres en acier (Chanvillard & Rigaud, 2003) b) avec fibres synthétiques (droite) (Nana et al., 2023)

Le comportement des fibres de PVA en traction après la fin de la phase élastique est caractérisé par une chute de la résistance après la première fissuration. Ensuite, les fibres

offrent un comportement écouvissant en flexion. La chute initiale est expliquée par le fait que les fibres synthétiques ont un module élastique plus faible.

Li et Deng (2023) ont aussi testé un BFUP avec un dosage de 2.5 % de fibres en PVA de 12 mm de longueur et de 0.04 mm de diamètre. Ils ont obtenu une résistance maximale à la traction d'environ 6 MPa et avec un comportement adoucissant. Nana et al. (2023) ont également obtenu ce type de résultats avec des fibres en fibre de verre, en aramide, en basalte et en propylène.

Zhao et al. (2022) ont testé des BFUP avec fibres en polyéthylène de différentes dimensions avec un dosage de 2 % qui ont comme avantage d'offrir une phase écouvissante au BFUP et une résistance à la traction de plus de 5 MPa. Ces fibres en polyéthylène se retrouvent de plus en plus dans la littérature, car elles offrent un comportement écouvissant intéressant au BFUP.

Un fait intéressant, Zhao et al. (2022) notent que l'utilisation de fibres synthétiques amène une réduction de la résistance en compression des BFUP. Le BFUP sans fibres avait une résistance à la compression de 130 MPa, alors que le matériau avec fibres offrait une résistance à la compression entre 105 et 115 MPa.

2.1.3 Durabilité

La durabilité est un point important qui justifie l'utilisation du BFUP dans les ouvrages modernes. Dans le contexte de la conception de parapets plus durables, la durabilité du béton est un point important à considérer vu l'environnement difficile dans lequel les parapets sont exposés, particulièrement au Québec. Charron et Desmettre (2013) présentent l'intérêt d'utiliser des bétons fibrés dans les ouvrages modernes dans le Tableau 2-3. Les facteurs de durabilité sont issus de plusieurs références avec des méthodes d'essais semblables. Le BFUP a des indicateurs de durabilité près de 100 fois plus petits que les bétons ordinaires, tandis que les BHP et les BFHP ont aussi des indicateurs plus de 3 fois plus petits que le béton ordinaire. Les fibres n'ont pas d'impact sur les indicateurs des bétons à l'état non fissuré, c'est plutôt la compacité et le faible rapport E/L de la matrice qui permettent aux BFUP d'être aussi durables.

Tableau 2-3 Indicateurs de durabilité pour le BO, le BHP, le BFHP et le BFUP à l'état non fissuré (adapté de Charron & Desmettre, 2013)

Indicateur de durabilité	BO	BHP et BFHP	BFUP
Perméabilité à l'air, K_{air} [m^2]	$10^{-15} - 10^{-16}$	10^{-17}	$< 10^{-19}$
Perméabilité à l'eau, K_{eau} [m/s]	$10^{-11} - 10^{-12}$	10^{-13}	$< 5 \times 10^{-14}$
Diffusion effective, D_{eff} [m^2/s]	$2 \times 10^{-11} - 2 \times 10^{-12}$	$2 \times 10^{-12} - 2 \times 10^{-13}$	2×10^{-14}
Sorptivité, S [$\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}^{1/2}$]	0.01 – 0.03	0.003 – 0.01	0.0003
Vitesse de corrosion, C ($\mu\text{m}/\text{an}$)	1.20	0.25	< 0.01
Porosité à l'eau, ϕ [%]	12 – 16	8 – 12	1 – 6
Indicateur de durabilité relatif	BO	BHP et BFHP	BFUP
$K_{\text{air}}/K_{\text{air BO}}$	1	0.018	< 0.002
$K_{\text{eau}}/K_{\text{eau BO}}$	1	0.018	< 0.0091
$D_{\text{eff}}/D_{\text{eff BO}}$	1	0.100	0.0018
S/S_{BO}	1	0.325	0.0150
C/C_{BO}	1	0.208	< 0.0083
Indicateur de durabilité relatif critique	1	≤ 0.325	≤ 0.015

Pour étudier la durabilité au long terme, il faut aussi considérer le matériau à l'état fissuré. Le béton, même dans les meilleures conditions, aura un certain niveau de fissuration dû au chargement de service. Le Tableau 2-4 présente les ouvertures de fissure et la perméabilité à l'eau des 4 gammes de bétons étudiées avec et sans fibres d'acier selon le niveau de la contrainte atteinte dans la barre d'armature de tirants produits avec ces bétons.

Tableau 2-4 Indicateurs de durabilité pour le BO, le BHP, le BFHP et le BFUP à l'état fissuré (adapté de Charron & Desmettre, 2013)

Contrainte armatures σ_s [MPa]	Ouverture de fissures, w [mm]			Perméabilité à l'eau, K_{eau} [m/s]		
	BO et BHP	BFHP	BFUP	BO et 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 σ_s [MPa]	Fissure relative au BO, w/w _{BO}			Perméabilité relative au BO, K/K _{BO}		
	BO et BHP	BFHP	BFUP	BO et 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

L'incorporation des fibres dans les bétons est alors évidente en comparant le comportement du BO et du BHP sans fibres avec le comportement d'un BFHP qui a une matrice similaire au BHP, mais avec des fibres. L'ajout des fibres réduit les ouvertures de fissures et ainsi réduit d'un facteur trois la perméabilité à l'eau. Pour le BFUP, le résultat est encore plus évident. En condition fissurée, le BFUP présente des ouvertures de fissures très petites et offre ainsi une perméabilité à l'eau 1000 fois plus petite que pour un béton ordinaire. Les résultats démontrent que le BFUP est idéal pour les ouvrages soumis à des conditions environnementales sévères (hiver, eau saline, etc.).

Par ailleurs, Abbas et al. (2015) ont submergé des éprouvettes en BFUP avec des pourcentages de fibres qui varient de 0% à 6% dans des solutions de 10% de chlorures pendant 180 jours et ont étudié la concentration en chlore selon la profondeur. La Figure 2-7 présente les résultats obtenus. L'ajout de fibres ne modifie pas la pénétration des chlorures en condition non fissurée. Pour tous les mélanges, presque aucune trace de chlore n'est détectée au-delà d'une vingtaine de millimètres. La Figure 2-8 montre la corrosion observée par les chercheurs après avoir submergé les éprouvettes dans la solution de chlorure pendant 180 jours. La surface des fibres est corrodée en surface, mais ne l'est plus à 3 mm de profondeur.

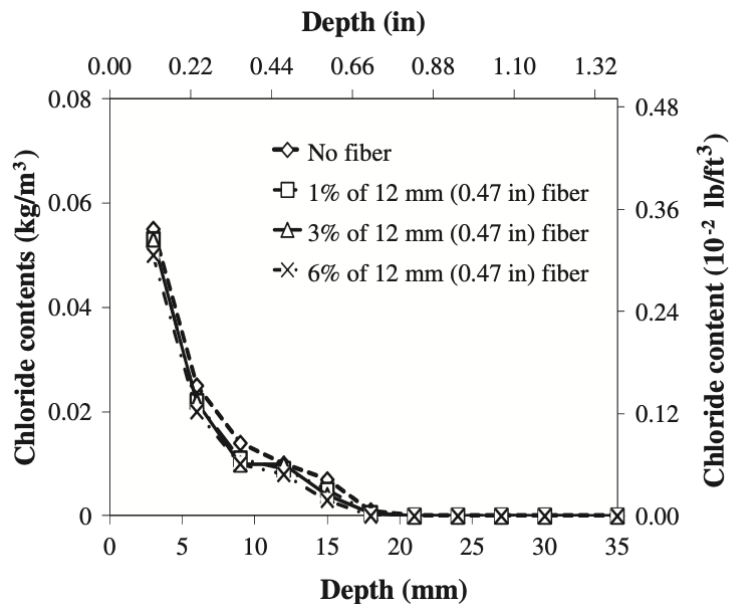


Figure 2-7 Pénétration d'ion Cl^- dans des éprouvettes de BFUP après 180 jours (Abbas et al., 2015)

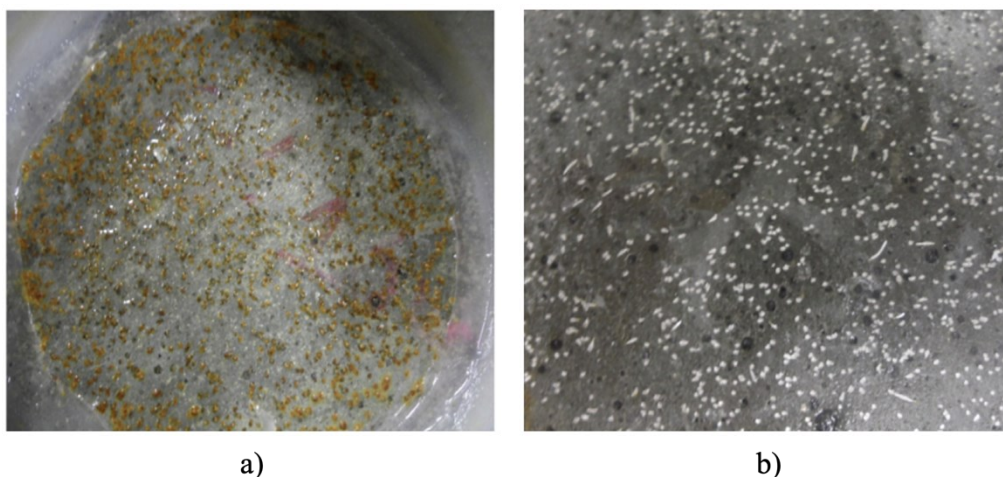


Figure 2-8 États des fibres du BFUP après 30 jours dans la solution de chlorure a) à la surface de l'éprouvette b) à 3 mm de profondeur, sans corrosion (Abbas et al., 2015)

Les résultats sont intéressants, mais ne sont pas obtenus dans la condition la plus critique du béton microfissuré ou dans des conditions de mouillage séchage où les ions auraient pu pénétrer plus profondément.

Charron et al. (2008) ont étudié la perméabilité à l'eau dans des BFUP soumis à différents niveaux de fissuration. La perméabilité est mesurée sur tous les spécimens entre 35 et 45 jours à l'aide d'un montage spécial. Les spécimens de BFUP avec une ouverture de

fissure de 0.13 mm et dont le chargement n'a pas dépassé le pic de résistance ont une perméabilité d'environ $2.80E-12$ m/s qui est très inférieure à la perméabilité de béton ordinaire non-fissuré avec un ratio E/L de 0.45. Les spécimens de BFUP avec une ouverture de fissure entre 0.33 et 0.88 mm et dont le chargement a dépassé le pic de résistance ont une perméabilité beaucoup plus élevée qui est reliée à des ouvertures de fissure localisées plus importantes. Cette étude démontre que si le chargement imposé au BFUP ne va pas au-delà du pic de résistance en traction, il génère principalement des fissures inférieures à 0.1 mm pour laquelle la perméabilité à l'eau est très faible. Dans cette condition, le BFUP présentera donc une excellente durabilité comme démontré par (Hubert et al., 2015). Ce critère d'ouverture maximale de fissure de 0.1 mm sera donc un critère de conception utilisée dans ce projet pour garantir la durabilité du BFUP en service.

(Provete Vincler et al., 2019) ont étudié la perméabilité en chlorure sur des spécimens en BFUP contenant des fibres en PVA et des fibres en acier avec un essai de migration accéléré. Pour deux mélanges similaires, les deux bétons avaient un profil de pénétration de chlorure similaire. Le chlorure ne pénétrait pas à plus de 3.8 mm pour tous les spécimens de BFUP peu importe le pourcentage de fibres (entre 1 et 4 %) en acier et en PVA.

Thomas et al. (2012) ont étudié le comportement de BFUP renforcés avec des fibres en acier et des fibres en PVA soumis à des cycles de gel-dégel et à des cycles de mouillage-séchage à de l'eau de mer très agressive. Après 5 à 15 ans avec une centaine de cycles gel-dégel par année et des marées qui mouillaient les spécimens, les chercheurs ont mesuré la pénétration des ions de chlorure dans les spécimens. Dans cet environnement très agressif, les ions ne pénètrent pas plus loin que 10 mm dans les spécimens en BFUP (Figure 2-9). Ces résultats prouvent que les BFUP avec fibres en acier et en PVA sont très performants pour améliorer la durabilité des structures en béton. Même si les BFUP avec fibres en PVA sont très légèrement plus poreux, leur performance est très intéressante.

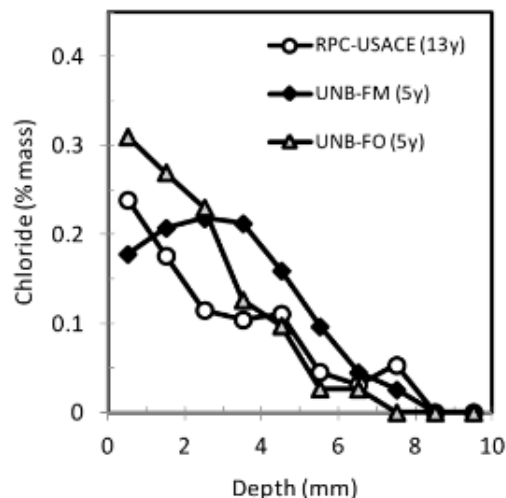


Figure 2-9 Profil de chlore dans des spécimens de BFUP exposés à l'île Treat (RPC-USACE : BFUP de référence, UNB-FM: BFUP avec fibres en acier 2 % et UNB-FO : BFUP avec fibres en PVA 4 %) (Thomas et al., 2012)

2.1.4 Déformations

Le béton est soumis à plusieurs types de déformations temporelles avec échange et sans échange d'humidité avec l'environnement. Puisque le BFUP est très peu perméable, les déformations les plus importantes sont les déformations sans échange d'humidité avec l'environnement, soit le retrait endogène (retrait chimique et retrait d'autodessiccation), les variations thermiques et le fluage propre. Le BFUP contient une grande quantité de liant qui provoque un échauffement élevé lors de l'hydratation de même que du retrait endogène et un fluage propre assez important.

2.1.4.1 *Retrait*

Le retrait endogène est défini par (Tazawa, 1999) comme étant la réduction de volume des matériaux cimentaires après l'hydratation. En effet, le béton subit une contraction quand les matériaux cimentaires sont hydratés parce que le volume initial de liants et d'eau occupe un volume plus grand que celui des produits d'hydratation.

Le retrait s'explique par les trois théories suivantes : les pressions capillaires, les pressions disjonctives et les tensions de surface. Les théories sont expliquées ci-dessous.

Les dépressions capillaires s'expliquent de la manière suivante : l'eau dans les pores forme un ménisque qui induit de la traction dans la phase liquide et de la compression dans le solide d'hydrates. La réduction du rayon de courbure du ménisque augmente les forces de

compressions dans les hydrates et cause un retrait. La Figure 2-10 présente bien comment le rayon de courbure du ménisque a une influence sur le retrait. Ce phénomène explique le retrait pour une humidité relative de 80 % et plus, soit des conditions trouvées pendant la cure des bétons (Charron, 2007).

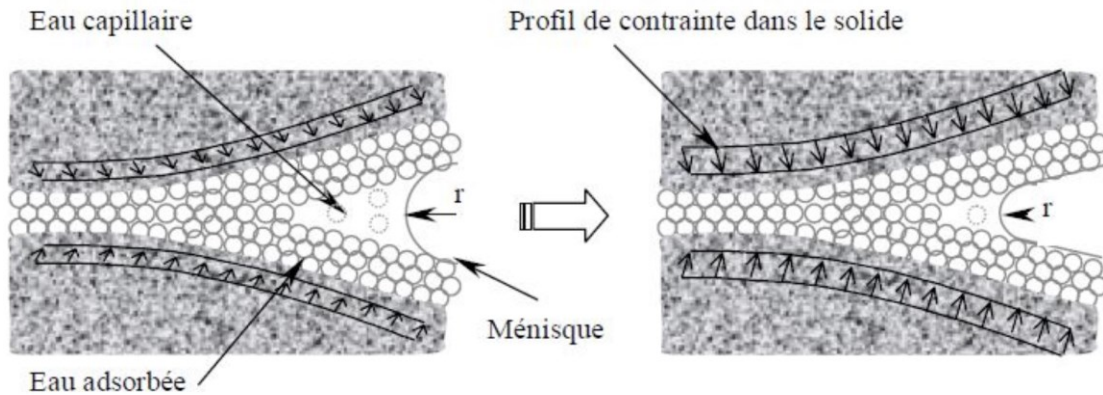


Figure 2-10 Illustration de la dépression capillaire (Charron, 2007)

Les pressions disjonctives surviennent lorsque l'eau absorbée en surface des feuillettes de CSH suffisamment rapprochés génèrent une force de répulsion entre deux feuillettes. Lorsque l'humidité relative diminue dans le béton, la force de répulsion s'estompe et les feuillettes auront tendance à se rapprocher. Ce phénomène explique le retrait pour une humidité relative comprise entre 40 et 80 %, soit en condition de séchage (Charron, 2007).

Les tensions de surface ont lieu à la surface des feuillettes d'hydrates qui attirent les couches d'eau absorbée à la surface des pores les unes aux autres. Cette force d'attraction est tellement élevée entre les couches d'eau et les feuillettes d'hydrates qu'ils se compriment. Quand l'humidité relative diminue dans les pores à une humidité supérieure à 40 %, les couches d'eau sur les feuillettes diminuent et la force d'attraction augmente, ce qui augmente la compression des feuillettes donc le retrait (Charron, 2007).

Tazawa (1999) indique que des bétons avec des rapports eau sur liant faibles seront plus touchés par le retrait endogène. La compacité très élevée des BFUP, qui diminue la dimension des pores et augmente les dépressions capillaires, conduit à une augmentation du retrait endogène (Ghafari et al., 2016). Cependant, les fibres contenues dans le BFUP ont comme effet de réduire le retrait. En effet, les fibres étant rigides ont tendance à réduire

le retrait, comme les granulats. De plus, il semblerait qu'une fine couche d'eau autour des fibres favorise la formation d'hydroxyde de calcium à l'interface fibre - matrice qui rigidifie aussi la microstructure (L. Wu et al., 2017). Z. Wu et al. (2019) ont démontré que l'augmentation du pourcentage de fibres de 0 à 3 % réduit jusqu'à plus de 50 % le retrait. Dans leur étude, un BFUP avec 2 % de fibres présente un retrait endogène d'un peu plus de 700 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 72 heures.

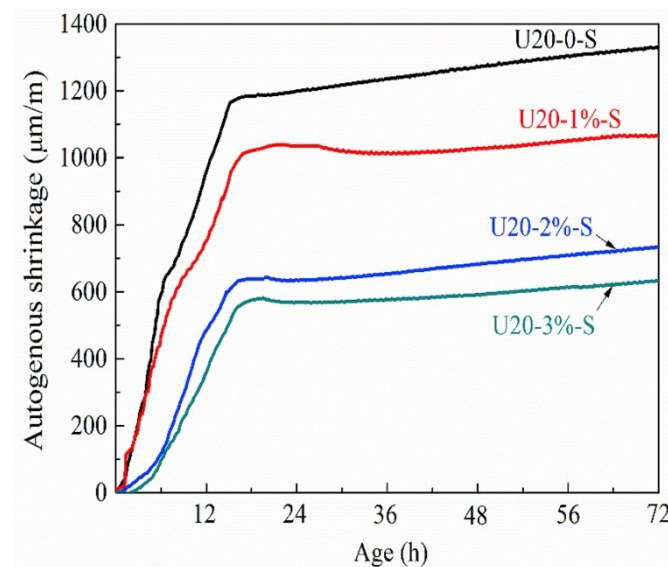


Figure 2-11 Influence du pourcentage de fibres métalliques sur le retrait endogène mesuré (Z. Wu et al., 2019)

Puisque le retrait endogène est réduit par les fibres en acier, les fibres synthétiques devraient également réduire le retrait, mais dans une moindre mesure étant donné leur plus faible rigidité comparée aux fibres en acier. Cependant, il n'a pas été possible de trouver dans la littérature des résultats de recherche qui comparent le retrait endogène d'un BFUP avec fibres synthétiques et celui d'un BFUP avec fibres en acier. Des articles comme ceux de Wang et al. (2023) qui ont étudié l'impact des fibres en PVA sur la réduction du retrait dans des BRF, indiquent que les fibres réduisent très faiblement le retrait dans leurs spécimens.

2.1.4.2 Retrait de dessiccation

Le retrait de dessiccation est un phénomène qui survient lorsque l'humidité dans les pores du béton quitte vers le milieu ambiant. Ceci fait intervenir les dépressions capillaires nommées précédemment et deux autres phénomènes, soit les pressions disjonctives et les tensions de surface. La diminution de l'humidité dans le béton crée donc une contraction du matériau importante dans une matrice avec une faible porosité comme le BFUP.

Katrin Habel (2004) a mesuré le retrait d'un BFUP en condition scellée qui représente le retrait endogène et en condition non scellée qui comprend l'effet combiné des retraits endogène et de dessiccation (Figure 2-12). Elle constate que le retrait endogène est beaucoup plus important que le retrait de dessiccation, car le retrait total est légèrement supérieur au retrait endogène, scellé. Le retrait de séchage apparaît surtout après 20 jours, ce qui suggère que la compacité élevée de la matrice empêche les échanges d'humidité quand le béton est plus mature.

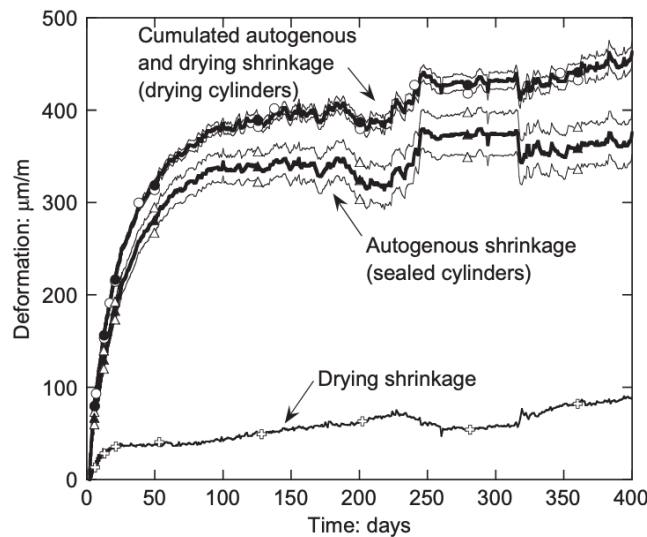


Figure 2-12 Retrait dans le BFUP au long terme pour des éprouvettes scellées (sealed) et non scellées (Habel 2004)

Une étude plus récente menée par Xie et al. (2018) indique la même tendance pour des spécimens scellés et non scellés, ce qui confirme l'importance de l'effet du retrait endogène en comparaison avec le retrait de séchage.

2.1.4.3 *Fluage*

Le fluage est une déformation différée qui apparaît quand une contrainte constante est appliquée pendant une période de temps. Les quatre mécanismes les plus fréquemment mentionnés pour expliquer le fluage sont : la migration de l'eau, l'écoulement visqueux, l'impact de la fissuration et l'impact des granulats (Charron, 2007). Pour la majorité des situations où le béton se retrouve en compression, le fluage augmente les déformations. Cependant, lorsque le béton se retrouve en traction, le fluage peut compenser en partie le retrait et réduire les contraintes associées au retrait restreint.

Kamen et al. (2009) expliquent que leurs essais sur des BFUP avec 88 % de pâte de ciment ont montré que le fluage en traction compense une partie du retrait endogène et donc réduit la possibilité de fissuration en bas âge. Il est mentionné que de la microfissuration peut aussi exister dans les spécimens, mais qu'elle n'est pas dommageable puisque la déformation se produit au début de la partie écrouissante des BFUP avec fibres en acier. Pour des BFUP qui ne sont pas écrouissants comme ceux avec des fibres synthétiques, ces déformations pourraient être dommageables. Dans le cas de retrait restreint, 65 % du retrait d'un BFUP est consommé par le fluage (K Habel et al., 2006).

Une étude plus récente de (Abid et al., 2023) a démontré des résultats comparables sur des spécimens en BFUP avec un grand degré de restreinte. Pour les spécimens en BFUP contenant des volumes de fibres en acier de 2, 3 et 4 %, une réduction du retrait respectivement de 67, 63 et 61 % a été observée. Ces résultats sont semblables à ceux mentionnés plus tôt. La réduction est attribuée au comportement viscoélastique de la pâte, ce qui explique la faible différence entre les trois pourcentages de fibres.

Une étude par Liu et al. (2023) permet d'arriver à la même conclusion à l'effet que les fibres dans le BFUP réduisent les contraintes dues au retrait endogène. Ces derniers ont également étudié l'impact du pourcentage de fibres sur le fluage. Le fluage est passé de 396, 260, 216 à 226 $\mu\text{m/m}$ pour un BFUP avec respectivement 0 %, 0.83 %, 1.67 % et

2.5 % de fibres. Les fibres étant rigides, elles limitent le fluage comme le font les granulats dans le béton.

2.2 Coques minces

Le BFUP est un matériau qui est extrêmement durable, mais aussi beaucoup plus coûteux que du béton ordinaire. La réflexion qu'il faut avoir avec cette gamme de béton est de l'utiliser où son apport est maximal. Dans le cas de ce projet, le BFUP est utilisé comme coque mince servant de coffrage permanent au parapet et offrant une protection long terme au parapet par la suite. Cette section présente ainsi quelques exemples d'utilisation de coques minces dans la littérature.

Deux points importants doivent être considérés pour les coques minces : l'adhérence entre le cœur et la coque mince ainsi que l'épaisseur de la coque. L'épaisseur est importante pour la résistance de la coque lors de la coulée et de l'usage qui est prévu. L'épaisseur est aussi importante pour la mise en place, car plus une coque est mince, plus le béton sera difficile à mettre en place.

Il y a principalement deux types d'application pour les coffrages permanents en BFUP, les colonnes et les poutres. Cette section fait une revue des coques utilisées pour les poutres, car elles ressemblent aux coffrages des parapets envisagés.

Zhang et al. (2022) ont travaillé sur des coffrages en coque en forme de U fabriqués en une coulée. Le coffrage ne comporte aucune texture interne pour favoriser le comportement hybride entre la coque et le cœur. La poutre à l'intérieur de la coque a une section de 150 par 250 mm et la coque à une épaisseur de 20 mm. La poutre finale avec coque est testée en 4 points espacés de 600 mm. L'étude fait varier le renforcement dans les poutres et la résistance à la compression du béton dans le cœur de la poutre. Même avec toutes ces variations, toutes les poutres ont présenté une rupture à l'interface cœur/coque sur les faces latérales qui s'expliquent par le manque de texture dans les coques. La campagne d'essais n'a pas inclus de mesure du retrait dans le cœur ou de la pression hydrostatique du BO lors de la coulée, mais elle démontre l'intérêt de favoriser l'adhérence coque-cœur pour assurer un comportement hybride entre les deux types de béton. Il faut éviter la délamination entre la coque et le cœur en béton ordinaire, car elle nuit au comportement de la poutre. Les

auteurs recommandent de considérer une solution pour éviter la délamination dans des essais de poutre hybride.

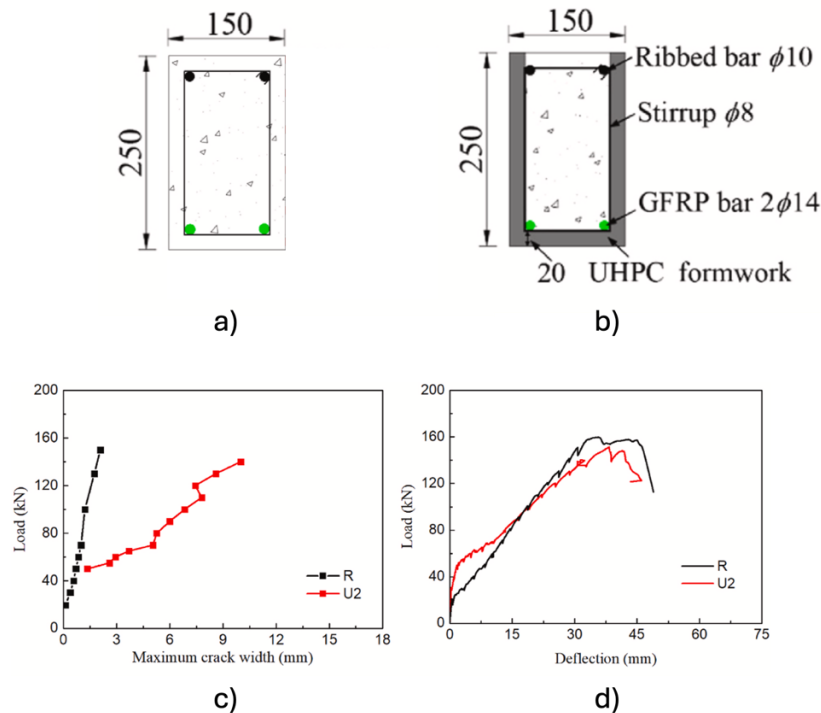


Figure 2-13 Résultats de l'étude, a) Poutre de référence en BO, b) Poutre U2 hybride, c) Ouverture de fissure - force, d) Graphique force - flèche (Zhang et al., 2022)

Huang et al. (2017) ont étudié des coffrages en forme de U en BFUP, mais avec un intérêt sur les joints entre les différentes pièces en BFUP (Figure 2-14). Leurs coffrages présentent aussi beaucoup de texture alors que des armatures sont coulées dans le BFUP et dans le béton du cœur pour avoir une action mixte entre les deux pièces. Le BFUP utilisé dans cette étude est renforcé avec des fibres en PVA KURALON K-II REC15 qui permettent au béton d'afficher une résistance de 3.0 MPa et une déformation de 1.5 % à 56 jours. Dans leurs essais, les pièces en BFUP sont simplifiées en enlevant les côtés et laissant seulement le fond du coffrage. Les poutres fabriquées à l'intérieur de la coque ont une section de 120 par 250 mm et une longueur de 2200 mm alors que les coques en BFUP ont une épaisseur de 50 mm. Les poutres finales avec la coque sont testées en 4 points espacés de 1200 mm. Au total, 4 configurations sont testées : poutre en BO (RC), poutre avec coque sans joint (RC-0), avec joint et barres de 10 mm dans la coque (RU-10) et avec barres de 18 mm dans

la coque (RU-18). La poutre avec coque sans joint est légèrement plus résistante que la poutre en BO, mais les poutres avec coque et joint sont moins résistantes. Dans le cas de la poutre avec coque et barres de 18 mm dans le joint, elles sont peu ductiles et dans le cas de la poutre avec coque et barres de 10 mm dans le joint, elles sont beaucoup moins résistantes que les poutres en BO. Les poutres avec le joint affichent une défaillance en délaminage du cœur et de la coque au niveau du joint, ce qui indique l'importance d'assurer des moyens pour avoir l'action hybride entre le cœur et la coque.

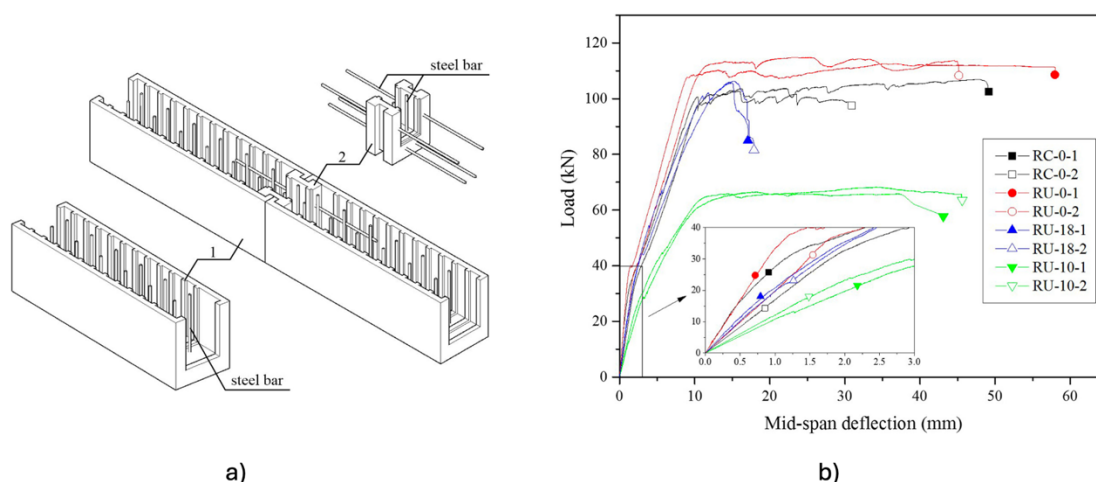


Figure 2-14 Résultats de l'étude, a) Coffrage en BFUP avec texture et armature qui relie le cœur et la coque, b) Force - flèche (Huang et al., 2017)

Qiao et al. (2019) ont réalisé des essais sur des coques en forme de U faites avec des BRF renforcés avec des fibres en PVA. Ils mentionnent que les fibres en PVA qu'ils ont utilisées peuvent être cassées, car, elles ont une bonne adhérence avec les hydrates ce qui implique que les BRF créés avec ces fibres n'ont pas de comportement écrouissant. Ils ont donc utilisé aussi des fibres en PVA avec un enrobage d'huile qui réduit l'adhérence et permet au BRF d'avoir un comportement légèrement plus écrouissant. Les fibres huilées sont 8 fois plus chères que les fibres non huilées, ce qui fait que leur usage industriel est très limité. Dans cette étude, les chercheurs ont opté pour un ratio de 1 % et 0.6 % respectivement de fibres en PVA non huilées et huilées. Des essais de flexions ont montré que ce mélange de BRF avec fibres huilées est écrouissant en flexion puisque de la multifissuration est

observée lors du chargement. Les poutres testées dans l'étude ont une section de 120 par 150 mm et la coque a une épaisseur de 20 mm sur les côtés et 30 mm en dessous. La coque est aussi renforcée avec un textile de renfort et des barres de 6 mm (Figure 2-15). Le paramètre qui varie dans l'étude est le type de texture qui est appliquée dans la coque en BRF, soit un fini lisse (N), une texture avec particules de sables (S) ou des rainures transversales (T) et finalement une poutre simplement en béton ordinaire (RC). Les essais sont faits en flexion 4 points sur une poutre de 1500 mm de longueur. Le comportement en flexion des poutres indique que les 3 poutres avec la coque en BRF (entre 82.5 et 87.1 kN) sont légèrement plus résistantes que les poutres en BO seulement (entre 73.8 et 75.7 kN). La flèche maximale avant la rupture est également plus importante pour les poutres avec la coque en BRF que pour la poutre en BO. Les poutres qui sont les plus ductiles en ordre décroissant sont les poutres avec les rainures transversales, texturées avec les particules de sable, le fini lisse et finalement la poutre en BO. Le fini de surface a donc un impact peu important sur la résistance et important sur le comportement postpic des poutres. Les chercheurs indiquent que le comportement postpic est influencé par la capacité de la coque à reprendre les efforts de cisaillement et les coques avec beaucoup de texture affichent plus de microfissuration, ce qui explique leur comportement postpic plus intéressant. Il n'y a pas eu de délamination entre le cœur et la coque dans les essais à cause de la grande surface de contact.

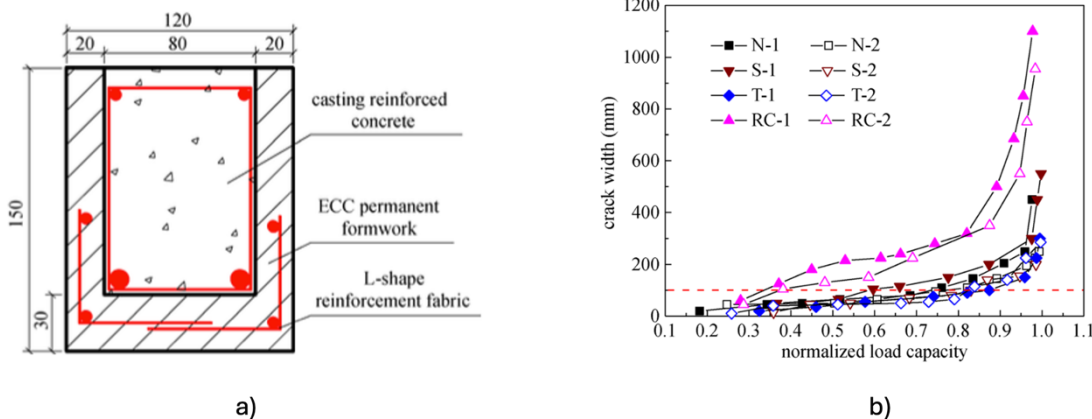


Figure 2-15 Résultats de l'étude, a) Coupe de la poutre étudiée, b) Ouverture de fissure selon le ratio de la capacité (Qiao et al., 2019)

Azizinamini et al. (2019) proposent un coffrage permanent en BFUP pour couler un chevêtre de pont. Leur coque en BFUP a une épaisseur de 50 mm. L'étude présente 3 phases : le calcul de résistance de la coque à la pression hydrostatique, le calcul du retrait du béton du cœur et de ses effets, ainsi que la résistance structurale finale du chevêtre hybride. La Figure 2-16a) présente les dimensions du chevêtre étudié. Des rainures sont prévues dans la coque pour assurer l'action mixte. Le BFUP utilisé dans l'étude est renforcé avec 2 % de fibres en acier. La résistance de la coque au remplissage est simulée avec un modèle numérique par éléments finis sur le logiciel ATENA. Les parois de la coque sont modélisées avec des éléments solides de 20 nœuds. La contrainte maximale mesurée dans la coque après le remplissage du cœur est de 1.627 MPa, ce qui est inférieur à la contrainte de fissuration du BFUP. Les résultats numériques sont confirmés à la coulée, aucune fissure n'est apparue dans la coque et il n'y a pas de délamination visible. La coque n'indique aucune fissuration due au retrait restreint du BFUP également. Le BFUP était coulé dans le sens du chevêtre pour favoriser l'orientation parallèle des fibres et des efforts attendus dans la coque. Le retrait restreint du béton du cœur atteint un peu moins de 60 $\mu\text{m}/\text{m}$ au pic après 12 heures. La déformation est plus graduelle dans la coque et atteint une valeur similaire à 50 jours après la coulée du cœur. Pour les essais structuraux, le chevêtre mixte (B1) affiche un comportement postpic plus ductile (30 %) et une résistance maximale plus élevée (14 %) que le chevêtre de référence en BO (C1). Le chevêtre mixte affiche également de la multifissuration. La défaillance en flexion du chevêtre mixte est due à une fissure localisée dans la coque qui a dépassé la partie écrouissante en traction du BFUP. La défaillance du chevêtre de référence était due à l'écrasement du béton en compression alors que, dans le chevêtre mixte, la coque confinait le béton, ce qui permettait d'éviter ce comportement.

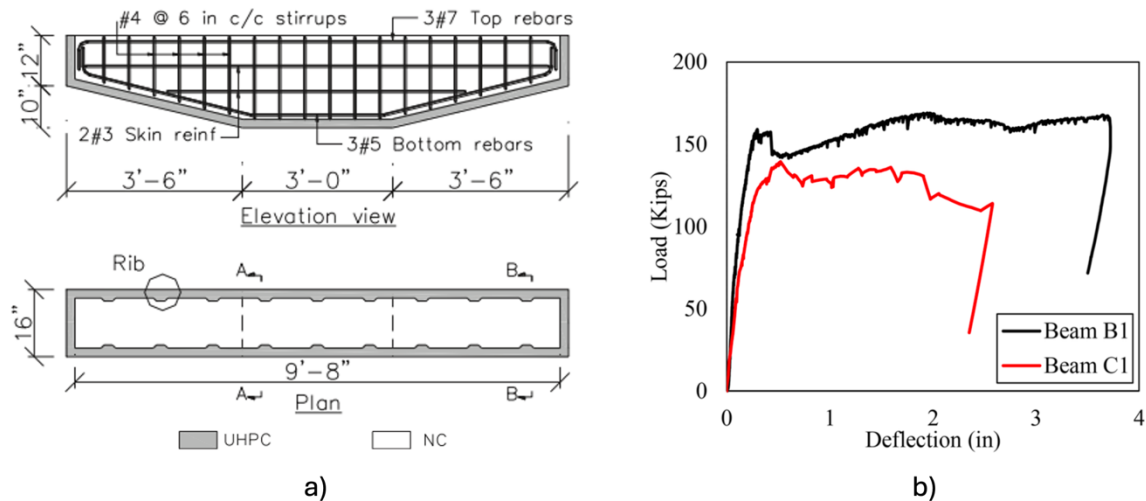


Figure 2-16 Résultats de l'étude, a) Dimensions du chevêtre étudié b) Force – flèche (Azizinamini et al., 2019)

Les études sur les coques minces en BFUP se limitent surtout aux poutres et aux colonnes, ce qui justifie ce projet de recherche sur des parapets des coques en BFUP pour des parapets. La coque améliore la durabilité et non que la résistance. Il faut également porter attention à l'endommagement causé par le retrait restreint de la coque, l'effet du retrait du BO du cœur et la capacité composite d'un parapet à reprendre des forces de manière différente à une poutre ou une colonne.

2.3 Conception des parapets

La recherche sur les parapets est de plus en plus nécessaire puisque ce sont des éléments soumis à un environnement très sévère qui affecte beaucoup la durabilité. Si de nouveaux moyens de construction de parapet sont utilisés, il faut toujours s'assurer que les parapets résistent minimalement aux forces prescrites par les normes. Cette section présente les normes qui touchent les parapets et un survol rapide de la recherche effectuée sur la construction de parapets durables.

2.3.1 Exigence de performance

Les normes qui régissent les parapets en Amérique sont la norme canadienne, CSA S6-19 (2019) et la norme américaine AASHTO (2020). D'abord, les deux normes précisent des niveaux de test des parapets (TL, test level) anciennement appelé des niveaux de

performances (PL, performance level). Dans les deux normes, les niveaux de test varient de TL-1 jusqu'à TL-6. AASHTO (2020) définit le TL-1 comme le niveau le plus bas où on trouve une petite vitesse pour les véhicules et peu de volume de véhicules alors que le TL-6 est le niveau le plus sévère avec des vitesses de véhicules anticipées de 97 km/h, un trafic élevé de camions avec centre de gravité élevé et des conditions de sites très défavorables. Cependant, le niveau TL-4 est un niveau qui est souvent adéquat pour des autoroutes avec quelques camions. Le niveau TL-5 est comme le niveau TL-4, mais il est sélectionné dans un cas où le pourcentage de camions est un peu plus élevé ou lorsque des conditions de site justifient un niveau plus élevé. Le code CSA S6-19 (2019) attribue le niveau de test selon la vitesse, le pourcentage de camions et l'indice d'exposition du dispositif de retenue. Les niveaux de performances correspondent respectivement au niveau de test suivant : TL-1, TL-2; TL-3, TL-4; TL-5.

Le Tableau 2-5 et le Tableau 2-6 montrent les forces de conception prescrites à respecter pour chacun des niveaux par la CSA S6-19 (2019) et AASHTO (2020).

Tableau 2-5 Forces de design recommandées par CSA S6-19 (2019)

Forces de design et identification	Niveau de test			
	TL-1	TL-2	TL-4	TL-5
F_T Transversale (kN)	25	50	100	210
F_L Longitudinale (kN)	10	20	30	70
F_V Verticale (kN)	10	10	30	90
L_T et L_L (mm)	1200	1200	1050	2400
L_V (mm)	5500	5500	5500	12 000
H_e (min) (mm)	600	600	700	900
Hauteur minimale du parapet (mm)	680	680	800	1050

Tableau 2-6 Forces de design recommandées par l'AASHTO (2020)

Forces de design et identification	Niveau de test					
	TL-1	TL-2	TL-3	TL-4	TL-5	TL-6
F_T Transversale (kips)	13.5	27	54	54	124	175
[kN]	60	120	240	240	552	778
F_L Longitudinale (kips)	4.5	9	18	18	41	58
[kN]	20	40	80	80	182	258
F_V Verticale (kips)	4.5	4.5	4.5	18	80	80
[kN]	20	20	20	80	356	356
L_T et L_L (pi)	4.0	4.0	4.0	3.5	8	8
[mm]	1219	1219	1219	1067	2438	2438
L_V (pi)	18.0	18.0	18.0	18.0	40	40
[mm]	5486	5486	5486	5486	12192	12192
H_e (min) (po)	18.0	20.0	24.0	32.0	42	56
[mm]	457	508	610	813	1067	1422
Hauteur H minimale du parapet (po.)	27.0	27.0	27.0	32.0	42	90
[mm]	686	686	686	813	1067	2286

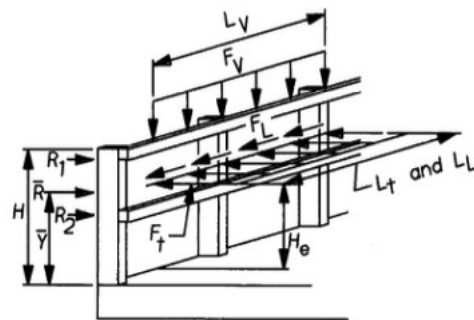


Figure 2-17 Identification des paramètres selon l'AASHTO (2020)

Les valeurs en gras dans le Tableau 2-5 et le Tableau 2-6 sont les valeurs des parapets TL-4 étudiés dans ce mémoire. La norme AASHTO (2020) recommande une force transversale de 240 kN alors que CSA S6-19 (2019) recommande plutôt une force de 100 kN. Cette différence s'explique de la manière suivante. Premièrement, la norme CSA S6-19 (2019) applique un facteur de pondération 1.7 pour les charges vives, sans majoration dynamique

liée aux impacts sur les dispositifs de retenues. Deuxièmement, la norme AASHTO (2020) considère une augmentation de la résistance des matériaux et augmente ainsi la force de conception d'environ 40 %. La force de 240 kN divisée par 1.7 puis 1.4, correspond à une force prescrite de 101 kN. Les deux normes ont ainsi des exigences équivalentes.

La longueur d'application de la charge transversale varie de 1050 à 1067 mm respectivement pour la CSA S6-19 (2019) et AASHTO (2020). Normalement la force transversale, verticale et longitudinale sont appliquées en même temps pour la conception. La force longitudinale est négligeable, car elle est appliquée dans l'axe fort du parapet. La force verticale augmente la capacité en flexion à la base du parapet puisqu'elle est appliquée vers le bas. Ainsi, en ce qui est trait à la capacité en flexion pour l'ancrage du parapet dans la dalle, le cas de chargement le plus critique consiste à considérer uniquement la force transversale.

Les forces recommandées par la CSA S6-19 (2019) et de l'AASHTO (2020) sont basées sur des essais d'impact de véhicules (crash tests) réalisés depuis 1981. En effet le rapport 230 de NCHRP (1981) est le premier qui indique les types de tests qu'il faut effectuer sur les parapets pour les certifier selon le niveau de test. Le niveau de test d'impact de véhicule indique la vitesse, l'angle d'approche et le type de véhicule. Le rapport 350 de NCHRP (1992) est une mise à jour du rapport 230. Le rapport MASH (2009) qui suit est publié par l'AASHTO, suivi ensuite par le rapport MASH (2016) qui est le dernier à ce jour. Les parapets doivent être certifiés par des essais d'impact de véhicules pour être utilisés dans les deux normes. Les tests évoluent en parallèle avec l'évolution des véhicules les plus répandus sur les routes et les connaissances sur le comportement des dispositifs de retenue.

Le rapport 230 de NCHRP (1981) a défini les premiers tests à effectuer pour certifier la sécurité des dispositifs de retenues. Les véhicules recommandés représentent les véhicules les plus populaires sur les routes. À l'époque de la parution de ce rapport, les véhicules recommandés étaient donc : une berline mini-compacte (1950 lb, 885 kg), sous-compacte (2500 lb, 1134 kg) et de taille standard (4500 lb, 2041 kg), des autobus utilitaires (20 000 lb, 9072 kg), des petits autobus de ville (32 000 lb, 14 515 kg) et des grands autobus de ville (40 000 lb, 18 144 kg) et des camions-remorques cargos (80 000 lb, 36 288 kg) ou transportant des fluides (80 000 lb, 36 288 kg). Les tests prescrits dans le

rapport font varier le type de véhicule utilisé, l'angle d'approche et la vitesse du véhicule. La vitesse d'impact varie de 32 à 97 km/h. L'angle d'approche varie de 0 à 25 degrés. Le rapport spécifie également l'instrumentation, le type de sol où sont installés les dispositifs de retenue et le déroulement d'un test d'impact.

Le rapport 350 de NCHRP (1992) a proposé des changements dans la flotte de véhicule, des nouveaux concepts de dispositifs de retenus, un besoin d'avoir des niveaux de tests qui sont égaux au niveau de performance des routes et des avancés dans la modélisation par ordinateur. C'est donc dans cette version du rapport qu'apparaît le concept de niveau de test (de 1 à 6). Cette version du rapport réduit le nombre de véhicules à tester à seulement 6 : deux petites voitures (775 et 895 kg), une camionnette (2000 kg), un camion porteur (8000 kg), un tracteur ou un camion porteur avec remorque (36 000 kg) et un tracteur avec cargo ou fluide (36 000 kg). La vitesse varie de 50 à 100 km/h et l'angle d'approche varie de 15 à 25 degrés. Ce rapport ajoute aussi le type d'essais à effectuer sur des terminaux de barrière, des atténuateurs d'impact, des structures de support, des dispositifs de gestions de trafic, des poteaux d'utilité publique et des atténuateurs d'impact montés sur des camions.

Le rapport MASH (2009) a été une mise à jour sur le rapport 350 de NCHRP (1992). Les changements considérés étaient des petits ajustements sur les angles ou les vitesses pour certains tests. Les véhicules sont également adaptés : le poids de la petite automobile de 895 kg est remplacé par un véhicule légèrement plus grand et plus lourd, comme la camionnette et le camion de 8000 kg passent à 10 000 kg. Tous les camions doivent avoir un centre de masse de 711 mm minimum du sol. Des essais sur des camions flèches ou avec panneau et sur une camionnette utilisée comme dispositif de gestion de trafic sont ajoutés.

Le rapport MASH (2016) constitue la dernière mise à jour des tests à conduire sur chaque dispositif de retenue. Peu de changements sont faits sur le type de véhicules pour les tests, mais de nouveaux tests sont ajoutés pour des barrières faites avec des câbles.

La norme AASHTO (2020) indique que des parapets qui ont passé des essais d'impact de véhicule peuvent être utilisés sans analyses ou tests supplémentaires tant qu'aucune modification n'est faite sur le parapet. Des changements d'ancrages ou de géométrie de parapet requièrent donc de nouveaux essais d'impact de véhicules. Le code CSA S6-19

(2019) est plus permissif, des changements peuvent être faits sur la géométrie, l'ancrage, la résistance ou le comportement, mais il faut prouver que les changements n'ont pas d'effet sur l'interaction entre le dispositif et le véhicule.

2.3.2 Développement de parapets préfabriqués

Le développement de concept de parapets intégrant des BFHP et des BFUP est apparu comme intérêt de recherche à cause des problèmes de durabilité constaté sur les parapets en béton au Québec. Plusieurs projets de recherche ont été complétés à Polytechnique Montréal sur cette thématique, cette section présente les avancées faites sur le sujet.

Braike (2007) est le premier qui explore le potentiel du BFUP pour la préfabrication de parapets. Dans son étude numérique, les parapets préfabriqués sont assemblés avec des boulons sur la dalle de pont. Il étudie quatre parapets préfabriqués avec et sans armatures : référence avec du BHP50, avec du BRF50, avec du BRF90 et avec du BFUP150. Chaque parapet a une épaisseur différente. Les parapets sont du niveau de performance PL-2 selon la norme CSA-S6 en vigueur à cette époque. Les parapets résistent largement à la valeur minimale TL-4 recommandée par la norme actuelle CSA S6-19 (2019). Le gain de résistance justifie de pousser la conception plus loin en faisant varier l'épaisseur des parapets ou le nombre d'ancrages dans la dalle. La conclusion de cette étude est que toutes les armatures du parapet ont peu d'impact dans la résistance des parapets et que des parapets construits uniquement avec du BFUP sont trop résistants et trop coûteux pour la demande.

Niamba (2009) (Niamba et al. (2011)) continue l'étude des parapets préfabriqués fixés sur la dalle avec des boulons. Son étude porte sur 4 parapets de forme New-Jersey, PL-2 préfabriqués : parapet en BHP50 avec armatures conventionnelles pour un parapet en BRF50 avec armatures réduites, un parapet en BRF70 avec armatures réduites et géométrie adaptée et un parapet en BFUP120 sans armatures et géométrie adaptée. Les parapets sont testés en laboratoire avec des essais statiques et dynamiques. Tous les parapets résistent minimalement à la charge recommandée par la norme CSA S6-19 (2019). Les parapets résistent également à la charge dynamique de 215 kN appliquée en 3.95 secondes avec un vérin et la charge résiduelle des parapets est supérieure à 215 kN, ce qui indique qu'ils auraient pu être soumis à un impact une deuxième fois et sans perte de capacité. Les

résultats indiquent que l'ancrage offre un comportement équivalent à un parapet coulé en place. La réduction du pourcentage d'armature dans les parapets est aussi justifiée. Cependant, les parapets préfabriqués avec des gammes de bétons plus performants, notamment celui en BFUP120, sont beaucoup plus dispendieux. Par exemple, le parapet en BFUP120 est presque 5 fois plus cher qu'un parapet conventionnel en BHP. Le BFUP est un matériau très efficace, mais aussi très coûteux qui doit être utilisé de manière appropriée dans les ouvrages. Les parapets avec géométrie optimisée et armatures réduites n'ont pas été testés aux impacts de véhicules, ce qui restreint leur utilisation en Amérique du Nord.

Duchesneau (2010) (Duchesneau et al. (2011)) poursuit l'étude de l'utilisation de BFUP dans la recherche d'augmenter la durabilité des parapets. Son étude porte sur deux parapets PL-2 préfabriqués : un avec du BRF70 avec armatures réduites et géométrie modifiée (FRC70MPa-1.5%) et un parapet hybride en BFUP120 (Hybrid FRC120MPa-4%) et en BO sans armatures. Les parapets sont joints avec des armatures en attente dans la dalle de pont et un mortier. Le type de barre en attente dans la dalle est étudié avec le parapet en BRF70 (barre en U et barre en J fixée avec de l'époxy). La Figure 2-18a présente la géométrie des parapets étudiés, le parapet hybride est renforcé avec une coque qui protège le béton intérieur tout en bonifiant sa résistance même sans armature. Les parapets sont testés de façon statique. Ils ont tous une résistance supérieure à l'exigence TL-4 de la norme CSA S6-19 (2019). Le parapet hybride affiche cependant un comportement moins ductile et plus rigide. Les deux types d'ancrages à la dalle sont assez résistants et ont des comportements très similaires. Des essais dynamiques sont aussi faits et tous les parapets résistent à la charge prescrite par la norme avec une résistance résiduelle statique supérieure à la valeur prescrite par la norme (Duchesneau, 2010). De plus aucune fissure n'est observée après le chargement dynamique. Les résultats sont intéressants et justifient la suite du projet de renforcement avec des coques en BFUP. Le parapet en BFUP est seulement 2.46 fois plus cher qu'un parapet conventionnel coulé en place. L'augmentation du coût est justifiée par l'augmentation de la durabilité de l'ouvrage.

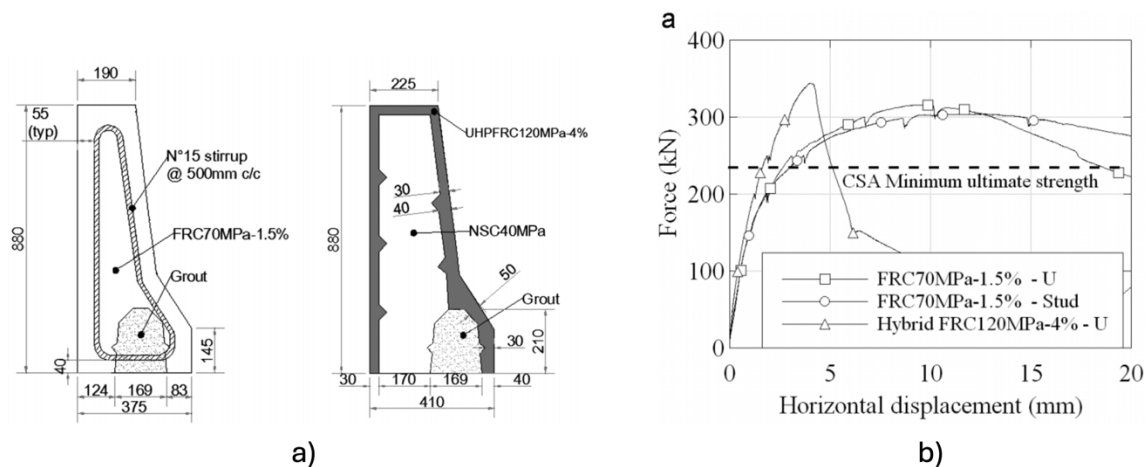


Figure 2-18 Essais sur parapets préfabriqués, a) Géométrie des parapets, b) Force – déplacement horizontal (Duchesneau et al., 2011)

Namy (2012) (Namy et al. (2015)) poursuit cette fois-ci l'étude des parapets développés par Duchesneau (2010). L'étude porte surtout sur l'étude de la continuité des parapets. Les parapets sont installés sur une dalle avec un porte-à-faux de 1 mètre. Les essais sont faits avec 3 configurations différentes : parapet coulé en place de 6 mètres de type MTQ201 TL-4 (C1), 3 parapets de 2 mètres de Duchesneau (2010) discontinus (C2) et 3 parapets de 2 mètres de Duchesneau (2010) avec un joint hexagonal en BFUP (C3). Les essais statiques sur les parapets dans les 3 configurations permettent de conclure que les 3 configurations offrent une résistance supérieure à l'exigence TL-4 de la norme CSA S6-19 (2019). Les résultats démontrent l'importance de la continuité dans les parapets pour permettre une distance appropriée de transfert de charge du parapet à la dalle qui améliore la performance structurale de la dalle. Les clés de cisaillement hexagonales permettent aux parapets individuels de 2 mètres d'avoir une continuité suffisante qui permet d'avoir un mode de défaillance idéal en flexion - cisaillement. Une étude numérique est aussi menée en faisant varier quelques paramètres notamment, la longueur des parapets préfabriqués et la position du chargement, excentré ou centré. Les parapets réels seraient de 4 mètres alors qu'au laboratoire, les parapets sont de 2 mètres pour la simplicité. Pour la configuration 2, les parapets de 4 mètres permettent un gain de 30 % de résistance qui s'explique par le fait que l'augmentation de la longueur du parapet permet de répartir la charge sur une plus longue distance. Pour la configuration 3, l'augmentation de la longueur du parapet permet d'avoir

une augmentation de la résistance de 19 %, négligeable, puisque les clés de cisaillement déjà présentes permettent déjà de répartir la charge sur une longueur plus importante. Les essais excentrés démontrent quant à eux l'importance de considérer ce chargement dans les essais de parapets puisque c'est le chargement critique pour les deux parapets préfabriqués de 2 mètres. Les deux parapets dépassent tout de même la charge recommandée par la norme (niveau TL-4. Les parapets de 4 mètres chargés avec une excentricité sont 14 % plus résistants pour la configuration 2 et à peu près résistants également pour la configuration 3, ce qui prouve encore l'importance de la clé de cisaillement. Ces résultats justifient également le choix de prendre des parapets de 2 mètres puisqu'ils sont toujours moins résistants que le parapet de 4 mètres réel.

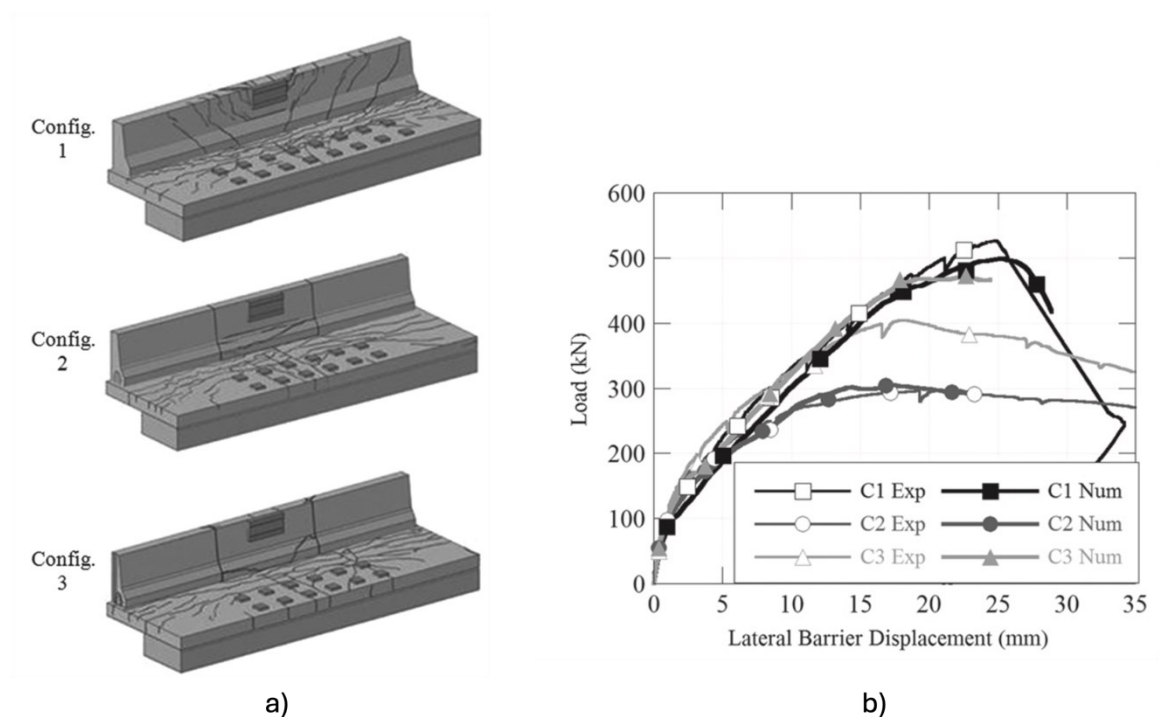


Figure 2-19 Essais sur parapet préfabriqué, a) 3 configurations, b) Force - déplacement horizontal

En parallèle du développement du parapet hybride PL-2 de Duchesneau (2010), Damry (2013) (Damry et al. (2013)) étudie un autre concept de parapet hybride avec coque en BFUP et cœur en BO. Deux parapets hybrides sont développés, un parapet avec niche fermée et barres en « U » et un parapet avec niche ouverte et connecteur « Terminator »

Figure 2-20. Leur comportement est comparé à un parapet coulé en place de référence MTQ301. Les essais statiques démontrent que le comportement du parapet de référence et du parapet hybride avec niche ouverte ont une résistance 45 % supérieure à la valeur prescrite par le niveau TL-5 de la norme CSA S6-19 (2019). Les coûts d'installation au mètre linéaire du parapet hybride avec niche ouverte et coulée en place sont comparables (1500 \$ contre 1440 \$) ce qui fait du parapet hybride une très bonne option à considérer pour les ouvrages québécois, surtout considérant la durabilité améliorée qui réduit encore plus le coût du parapet hybride à long terme.

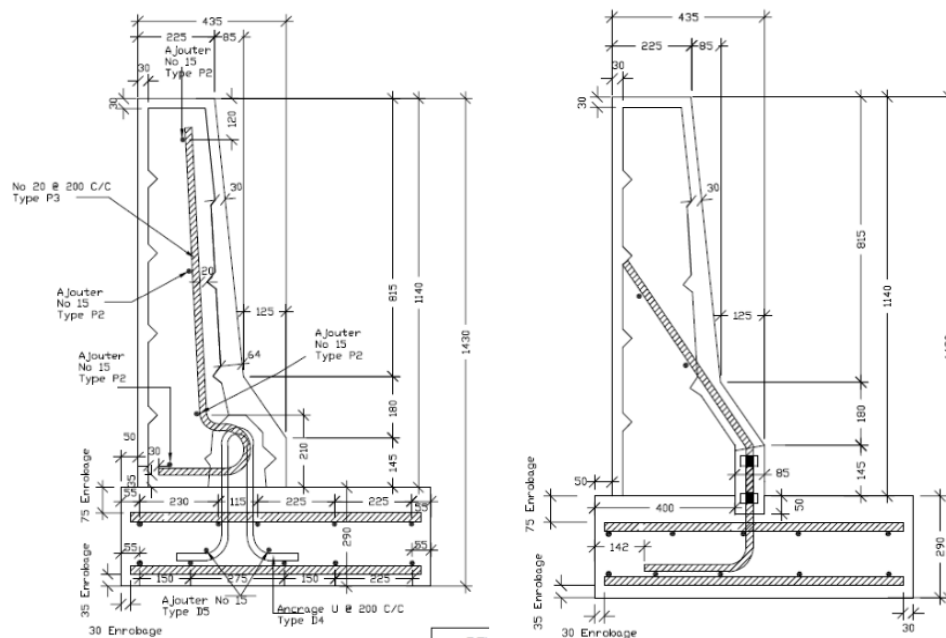


Figure 2-20 Section du parapet avec niche fermée (gauche) et niche ouverte (droite) (Damry et al., 2013)

Finalement, le dernier projet à Polytechnique Montréal a été réalisé par Gendron (2020) (Gendron et al. (2022)). L'étude porte sur des parapets hybrides TL-5 avec niche ouverte de Damry et al. (2013). Les parapets testés sont coulés en place avec du BO et préfabriqué en BO et hybride avec coque en BFUP et cœur en BO joint avec des coupleurs « Terminator » et du BFUP (Figure 2-21). Une étude numérique est menée sur le comportement des parapets par rapport à leur longueur. Les modèles sont faits sur des parapets de 2 mètres, alors que la longueur réelle est de 4 mètres et 6 mètres maximum

pour reproduire la courbure de la route. Les parapets inférieurs à 4 mètres sont trop courts pour développer la résistance maximale et avoir un patron de fissuration complet. Dans la partie expérimentale, deux types de parapet sont testés : un parapet hybride en BFUP (hybrid) et un parapet MTQ201 préfabriqué (QMT). Deux assemblages de deux parapets hybrides et deux parapets préfabriqués sont testés sur l'extrémité. Le dernier assemblage est avec deux parapets préfabriqués joints avec une clé de cisaillement et il est testé sur l'extrémité d'un parapet près de la connexion. Le parapet hybride est celui qui offre la meilleure résistance des trois tests. Entre les deux essais sur les parapets préfabriqués, les parapets joints avec une clé de cisaillement sont ceux qui performant le mieux.

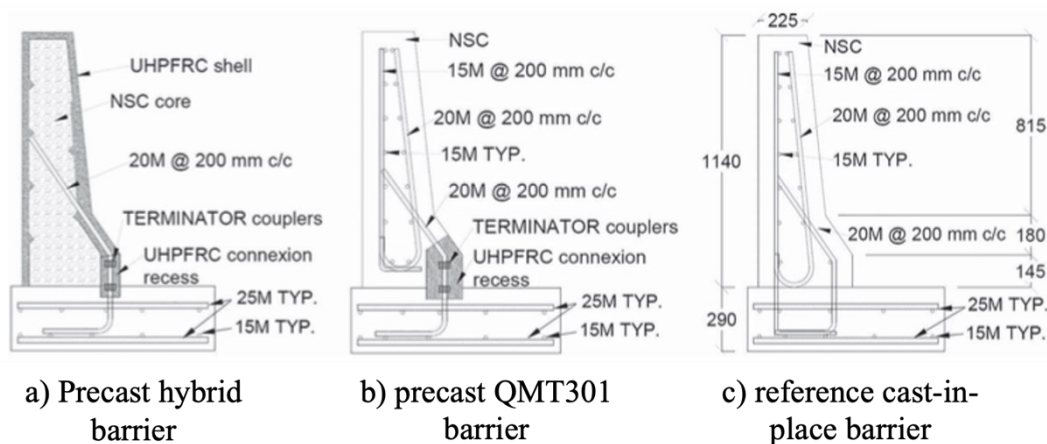


Figure 2-21 Section des parapets préfabriquée (Gendron et al., 2022)

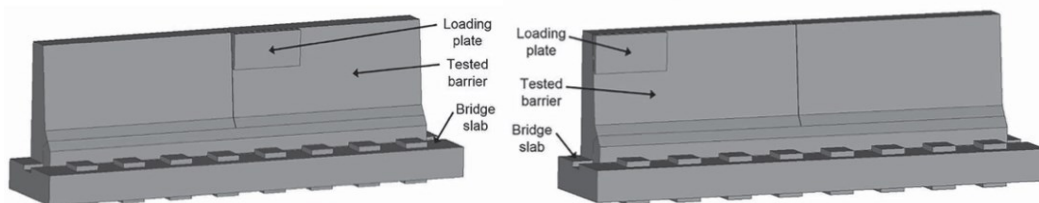


Figure 2-22 Essais excentrés menés sur les parapets préfabriqués MTQ301 (essais 2 à gauche et essais 3 à droite) (Gendron et al., 2022)

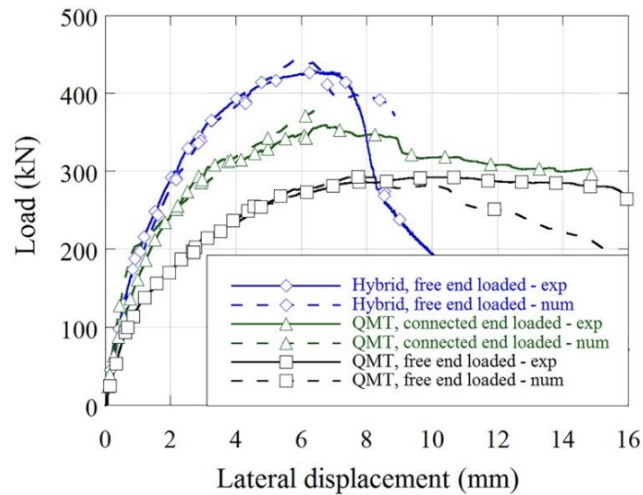


Figure 2-23 graphique force - déplacement horizontal sur les 3 types de parapets

2.4 Synthèse

La revue de la littérature sur le BFUP permet de conclure les points suivants.

- Le BFUP a des propriétés mécaniques exceptionnelles et une très bonne durabilité. Ces résultats montrent l'intérêt de protéger des bétons ordinaires plus perméables avec des coques minces en BFUP moins perméables.
- Le retrait est peu étudié pour les BFUP avec fibres synthétiques, il faut donc porter attention à ce dernier dans la fabrication de coques minces où l'endommagement dû au retrait restreint pourrait être problématique.
- Pour les coques minces en BFUP, il est important d'assurer une finition de surface qui permettra une action mixte entre la coque et le béton du cœur.

Les études menées à Polytechnique Montréal permettent d'arriver aux conclusions suivantes.

- Le critère principal de conception est la force transversale, F_T , de 100 kN appliquée sur les parapets. Pour la conception de la connexion du parapet à la dalle pour les spécimens testés, la force longitudinale F_L peut être négligée, car elle n'est pas critique alors que la force verticale F_V doit être omise, car elle est favorable.

- Les solutions préfabriquées hybrides proposées avec coque en BFUP et cœur en BO sont les plus avantageuses économiquement, car elles permettent de réduire davantage l'armature et la durabilité est grandement augmentée.
- Un chargement excentré à l'extrémité des parapets est critique, car le patron de fissuration est plus petit, ce qui fait participer moins d'armatures.
- Les parapets de 2 mètres ne permettent pas de développer le patron de fissuration complet et sont donc critiques dans la conception et dans la validation expérimentale.
- La plaque de chargement de 700 mm permet d'avoir un chargement critique sur les parapets en développant un patron de fissuration moins long faisant participer moins d'armatures. Son utilisation est pertinente au laboratoire de structures pour conserver des spécimens d'essais de taille réduite.
- Tous les parapets développés jusqu'à maintenant ont atteint les niveaux de performance souhaités sous chargement statique et dynamique en laboratoire correspondant au niveaux de la norme CSA-S6 :19. Cependant, comme la section des parapets ou la méthode d'ancrage lors de ces études ont été modifiées, cela rend nécessaire la réalisation d'essais d'impacts avec véhicules, ce qui représente une validation très onéreuse. Dans ce contexte, un concept de parapet hybride BO-BFUP ne modifiant pas ces paramètres comme étudiés dans le cadre de la présente étude apparaît très avantageux.

CHAPITRE 3 CONCEPTION

Le parapet proposé est composé d'une coque en BFUP, d'un cœur en BO ainsi que les armatures conventionnelles retrouvées sur un parapet de pont conventionnel au Québec (Figure 3-1). La solution proposée ne requiert pas de certification impliquant des essais d'impact avec des véhicules qui est très onéreuse et qui était un frein pour l'adoption des parapets développés dans les études précédentes. Le parapet est dans sa forme la plus simple, un parapet ordinaire avec une épaisseur de BO remplacée par du BFUP. Les armatures ancrées dans la dalle ainsi que les armatures longitudinales sont les mêmes que pour la solution traditionnelle coulée en place alors que la géométrie n'est pas changée ce qui permet d'utiliser cette solution sur les ponts du Québec sans validation additionnelle.

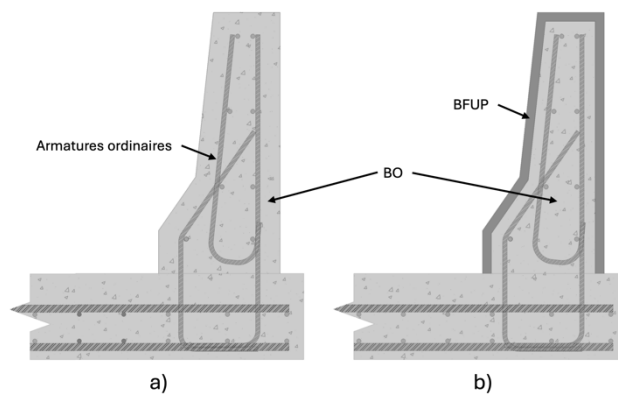


Figure 3-1 Deux modèles de parapet sur dalle de pont a) MTQ201 présent au Québec b) Proposition de parapet hybride avec coque en BFUP avec les mêmes dimensions extérieures et les mêmes armatures

Ce chapitre propose donc les étapes de conception par éléments finis de la coque en BFUP et du parapet hybride lorsque la coque est posée sur la dalle et remplie de BO. Au total, deux coques seront fabriquées avec deux types de fibres différentes dans les BFUP. Bien que le BFUP avec les fibres en PVA est théoriquement moins résistant, il possède deux qualités importantes pour cette application : son aspect esthétique, sans trace de rouille, et sa surface sans fibres coupantes qui est mieux adaptée pour des applications où les usagers peuvent toucher l'ouvrage comme en zones urbaines. Puisque le parapet aura les mêmes armatures qu'un parapet conventionnel, il est anticipé que la résistance inférieure des fibres en PVA ne devrait pas trop influencer le comportement du parapet.

3.1 Concept et étapes de conception

Les parapets de ponts avec coque préfabriquée en BFUP sont construits en deux phases. D'abord, une coque en BFUP est coulée dans un coffrage en deux parties : un moule intérieur en bois et un moule extérieur en acier. Il est attendu que le moule intérieur restreigne beaucoup le retrait du BFUP, il sera donc retiré après un maximum de 24 heures après la coulée de la coque. La Figure 3-2 présente le coffrage qui sera utilisé pour produire la coque dans la phase expérimentale. Ce coffrage a été développé par BPDFL, un partenaire industriel pour le projet. Il est important de vérifier que le retrait de la coque restreint par le moule intérieur ne causera pas de fissuration importante dans le BFUP. Il s'agit d'un paramètre important qui pourrait influencer l'épaisseur de la coque retenue.

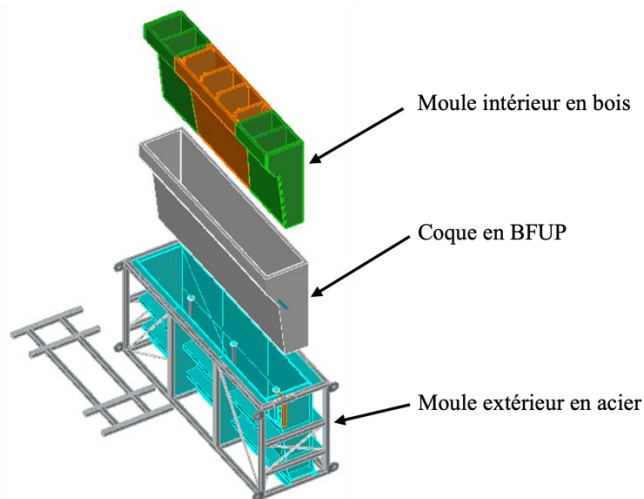


Figure 3-2 Vue éclatée du moule pour la coque

Ensuite, la coque est installée sur la dalle de pont et elle agit comme un coffrage permanent pour remplir le cœur en BO du parapet. La Figure 3-3 présente la pression causée par le béton frais coulé dans la coque en BFUP. Elle est représentée de manière simplifiée par un chargement hydrostatique équivalent à la pression maximale causée par le béton sans thixotropie. La coque doit évidemment être assez résistante pour être remplie sans endommagement significatif.

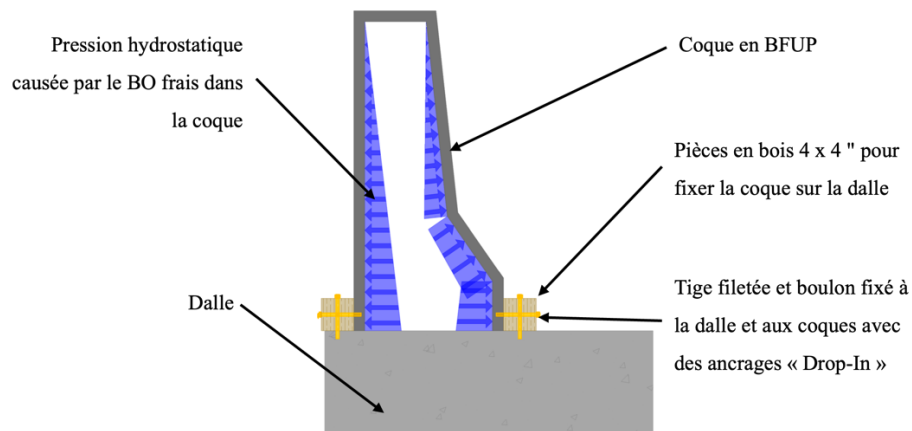


Figure 3-3 Type de chargement attendu lors du remplissage des coques avec le BO

Enfin, la mise en service du parapet exposera ce dernier à d'éventuelles collisions de véhicules. Le parapet avec coque préfabriquée en BFUP devra supporter le chargement de conception dans le code des ponts (CSA S6-19, 2019) et défini à la Section 2.3.1.

Cette section porte donc sur la conception des coques préfabriquées en BFUP pour les parapets hybrides. Les coques doivent résister à trois chargements différents qui ont donné lieu à trois étapes de conception différentes :

1. retrait restreint de la coque causé par le retrait du BFUP dans le coffrage;
2. pression hydrostatique causée par le béton ordinaire frais lors du remplissage de la coque utilisée comme coffrage permanent;
3. chargement statique pour les collisions où la coque travaillera en action mixte avec le béton ordinaire du cœur.

La conception est réalisée avec des modèles d'éléments finis qui permettent de reproduire les différents éléments du parapet hybride en trois dimensions avec les divers chargements.

Pour chaque étape de conception, la force, les contraintes, la fissuration et les déformations seront contrôlées.

Pour les deux première phases, le critère de conception est de limiter l'ouverture de fissure à moins de 0.1 mm. Cette limite est basée sur les travaux de Charron et al. (2008) et (Hubert

et al., 2015) comme étant une ouverture de fissure qui permet d'assurer la durabilité du BFUP en service. En effet, en dessous de cette ouverture de fissure, le BFUP est moins perméable qu'un béton ordinaire non-fissuré. Les fissures inférieures à 0.1 mm sont appelées microfissures, alors que celle supérieures à cette limite sont appelées macrofissures. Le critère de conception pour la dernière phase est d'atteindre la charge transversale produite par les véhicules sur le parapet prescrite par la norme CSA S6-19 (2019). La conception vise à déterminer l'épaisseur de coque optimale pour répondre aux exigences de performances du parapet mentionnées.

3.2 Géométrie

3.2.1 Géométrie extérieure du parapet et des armatures

Le parapet doit être de catégorie TL-4 pour un pont en milieu urbain. La géométrie retenue pour le parapet est celle prescrite par le ministère des Transports du Québec, pour la « glissière en béton de type 201 » qui sera appelée MTQ201. La Figure 3-4 présente une coupe transversale du parapet conventionnel (MTQ, 2023a). Le parapet adopte le profil « F-Shape ». Le parapet a une hauteur de 880 mm et une largeur à la base de 410 mm.

puisque les parapets sont les éléments qui sont testés. Des trous sont aussi faits dans la dalle pour permettre la fixation par post-tension de la dalle sur la dalle du laboratoire. Ces trous sont aussi prioritaires par rapport à la position des armatures dans la dalle.

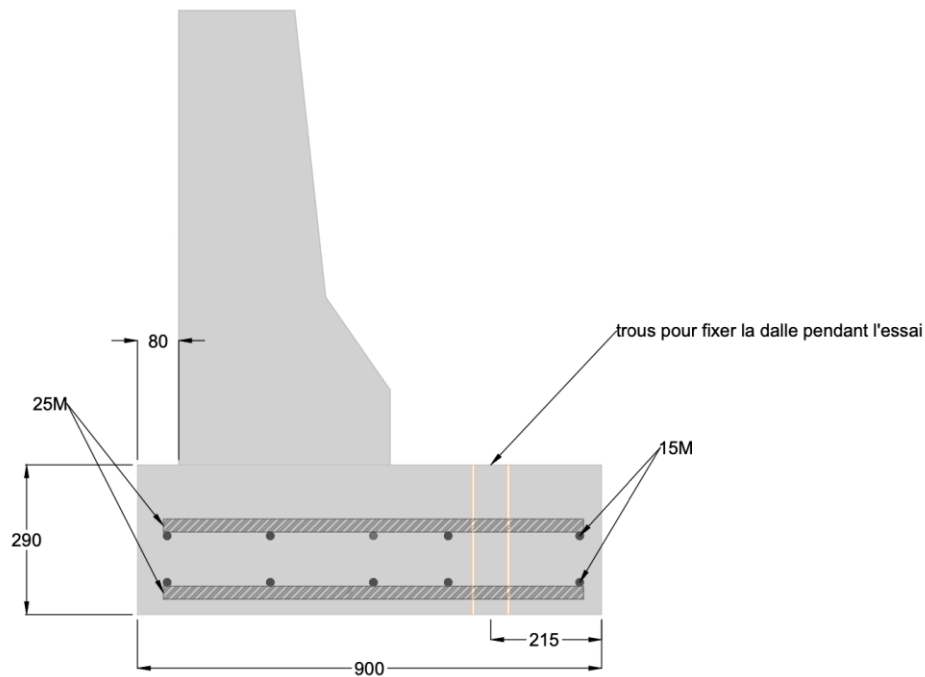


Figure 3-5 Armatures dans la dalle

3.2.3 Géométrie de la coque

La coque du parapet est l'élément à concevoir, la principale caractéristique à définir est l'épaisseur de la coque. La Figure 3-6 montre les trois épaisseurs à l'étude soit : 20, 30 et 40 mm d'épaisseur uniforme.

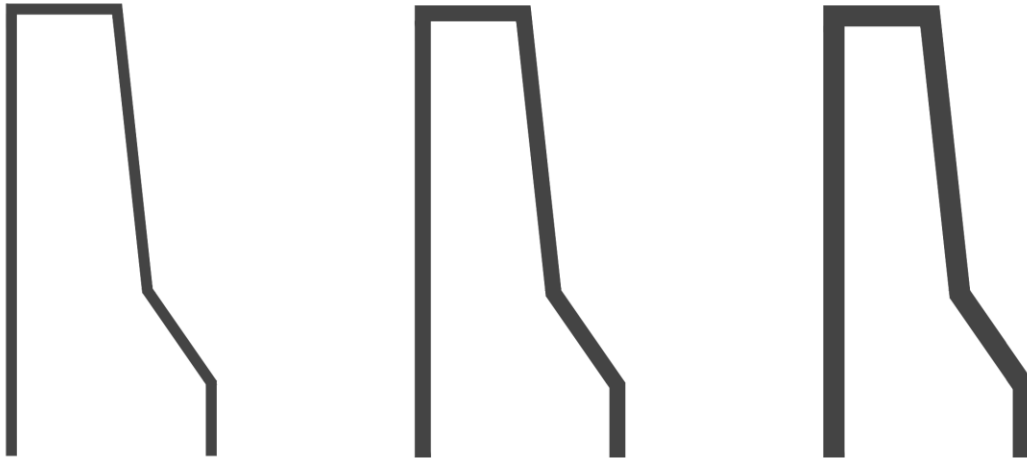


Figure 3-6 Vue de coupe des coques en BFUP d'épaisseur de 20, 30 et 40 mm

La justification de ces épaisseurs est que des coques de 30 mm ont déjà été utilisées dans la littérature pour faire des poutres et que celles-ci permettaient le remplissage adéquat avec du BFUP. Les coques de 20 mm et de 40 mm sont aussi étudiées pour savoir si l'épaisseur de 30 mm peut être optimisée ou non. Optimiser les coques est pertinent pour réduire la quantité de BFUP utilisée, celui-ci étant un matériau coûteux. Le Tableau 3-1 présente les volumes de BFUP pour chaque coque et la variation en pourcentage, où on voit l'importance de l'optimisation de l'épaisseur.

Tableau 3-1 Volume de BFUP pour une coque selon l'épaisseur

	Épaisseur de la coque (mm)		
	20	30	40
Volume (L)	88.48	130.39	170.78
Variation (%)	-32.14%	0%	30.97%

3.3 Conception par éléments finis

La conception est réalisée par éléments finis avec la version 5.9.1 du logiciel ATENA 3D. Il s'agit d'un logiciel permettant l'étude du comportement structural des ossatures en béton armé par analyse non linéaire. Ce logiciel a été utilisé avec succès dans plusieurs développements de parapet hybrides en BO et BFUP à Polytechnique Montréal (Damry et

al., 2013; Duchesneau et al., 2011; Gendron et al., 2022). Les sous-sections suivantes présentent les paramètres considérés pour la conception des coques avec ce logiciel.

3.3.1 Matériaux considérés pour la conception

Les différentes lois de comportement utilisées pour la modélisation sont les suivantes : matériaux 3D non linéaires cimentaires (BFUP, BHP, BO), matériau 1D multilinéaire acier (armature) et matériau 3D bilinéaire von Mises (plaque de chargement en acier).

3.3.1.1 *Bétons*

On retrouve deux types de matériaux dans ATENA pour représenter du béton : un matériau non linéaire défini par ATENA « CC3DNonLinCementitious2 » et un matériau non linéaire où un utilisateur entre les points des lois prépic et postpic de ses matériaux « CC3DNonLinCementitious2User ». Les deux matériaux restent tout de même définis par le modèle de défaillance de Rankine en traction et par un modèle plastique Menétrey-Willam en compression. Le modèle de fracture en traction est basé sur le modèle orthotropique de fissuration répartie et de bande de fissuration. La fissuration est utilisée avec un modèle de fissuration « fixe » ou « libre ». Le modèle de fissuration « fixe » est utilisé pour ce projet puisque l'autre modèle est non compatible avec le matériau « CC3DNonLinCementitious2User ».

L'intérêt d'utiliser le matériau « CC3DNonLinCementitious2User » est que l'utilisateur peut entrer un comportement prépic et postpic pour la traction, la compression et le cisaillement d'un béton. Dans le cas du BFUP de ce projet, seulement le comportement en traction est modifié. Pour les autres comportements, les lois par défaut du logiciel sont utilisées. La Figure 3-7 présente une loi type entrée sur le logiciel pour un béton avec comportement prépic et postpic.

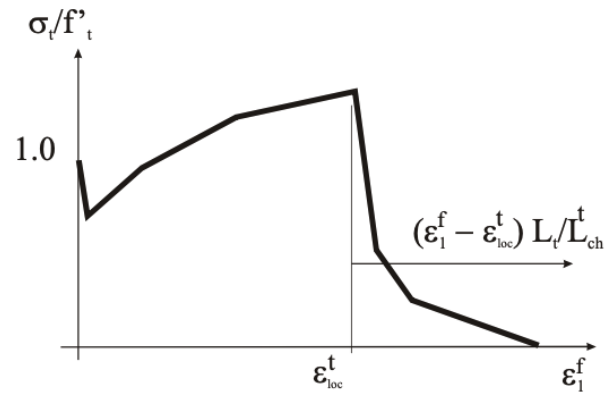


Figure 3-7 Loi en traction entrée sur « CC3DNonLinCementitious2User » type (Červenka et al., 2021)

La procédure pour convertir le comportement en traction mesuré en laboratoire vers le logiciel est résumée dans la Figure 3-8. Il est important de noter que la loi entrée sur ATENA est dépendante de la taille de la maille la plus petite de l'élément attribué au matériau. Cette taille de maille permet de convertir l'ouverture de fissure en déformation. La déformation où il y a localisation de fissure (ϵ_{loc}^t) est le moment où l'élément passera de la microfissuration (comportement prépic) à de la macrofissuration (comportement postpic).

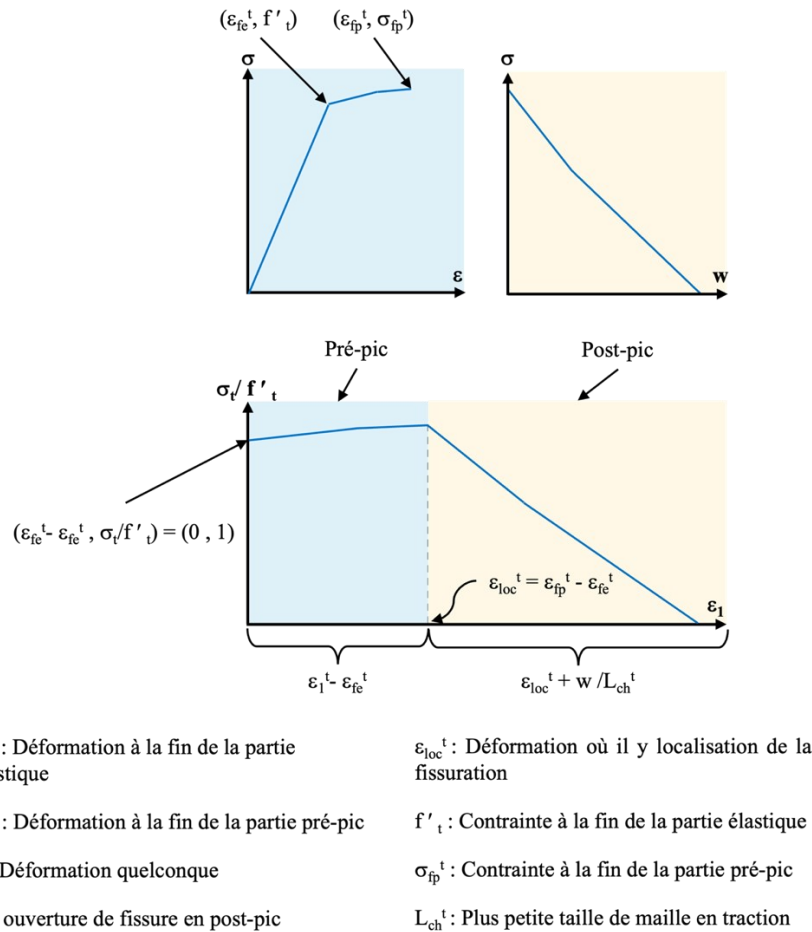


Figure 3-8 Transformation d'une loi mesurée en laboratoire (haut) vers une loi sur ATENA (bas)

Le Tableau 3-2 présente les propriétés des BFUP et des autres bétons utilisés pour les modélisations de la conception. Pour chaque BFUP, les propriétés attendues à 2 jours et à 28 jours sont présentées. Elles sont tirées d'autres projets de développement de parapets menés à Polytechnique. La résistance à la compression (f'_c), le module élastique (E_c) et le coefficient de Poisson (ν) sont introduits tels quels dans le logiciel. Pour le BFUP, le comportement en traction est introduit point par point comme indiqué dans la suite. Pour les autres bétons, la résistance à la traction (f'_t) est introduite tel quelle.

Tableau 3-2 Propriétés des bétons utilisés pour la modélisation en conception

Gamme de béton	Échéance (jours)	f'_c (MPa)	f'_t (MPa)	E_c (MPa)	ν (-)
BO parapet	28	33	2,5	32 000	0,2
BHP parapet/dalle	28	47	2,7	33 000	0,2
BFUP Acier2%	2	87	3,7	33 000	0,2
	28	133	4,5	44 000	0,2
BFUP PVA3%	2	80	2,5	32 000	0,2
	28	121	6,0	40 000	0,2

Les BFUP utilisés dans ce projet présentent deux comportements en traction différents. Le BFUP avec 2 % de fibres en acier est un matériau écouissant et adoucissant, tandis que le BFUP avec 3 % de fibres synthétiques est seulement adoucissant. Un béton sans partie écouissante signifie donc que la déformation obtenue à la fin de la partie élastique est la même que la déformation où il y a localisation de fissure.

La Figure 3-9 présente 4 lois de comportement en traction mesurées au laboratoire à 2 jours, pour avoir un aperçu de la résistance en jeune âge, lors du remplissage de la coque et à 28 jours, pour la résistance du béton mature lors des essais mécaniques, pour les BFUP avec fibres d'acier et à fibres synthétiques (Section 4.1.1). Il faut noter que les lois du BFUP renforcé avec des fibres en PVA sont préliminaires. En effet, pour les premiers essais en traction au laboratoire sur BFUP avec fibres synthétiques, la vitesse de chargement était un peu trop rapide pour bien capter le début du plateau d'écouissage ou le début de la phase d'adoucissement. Les essais du programme expérimental permettront de préciser ces courbes. La Figure 3-10 illustre la loi de comportement en traction réduite de 50 % pour prendre en compte l'orientation et la densité de fibres moins optimale dans les coques en BFUP que dans les essais de traction directe. La norme CSA S6-19 (2019) recommande la réduction de 50 % pour un BFUP coulé en deux dimensions dans un mur. La réduction est appliquée sur la déformation pré-pic et sur toutes les contraintes.

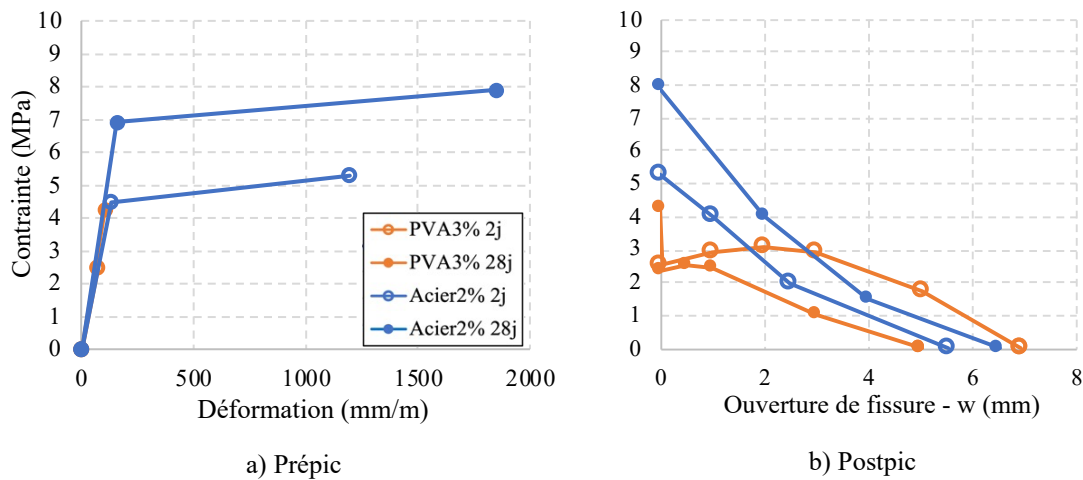


Figure 3-9 Comportement en traction simplifié des BFUP

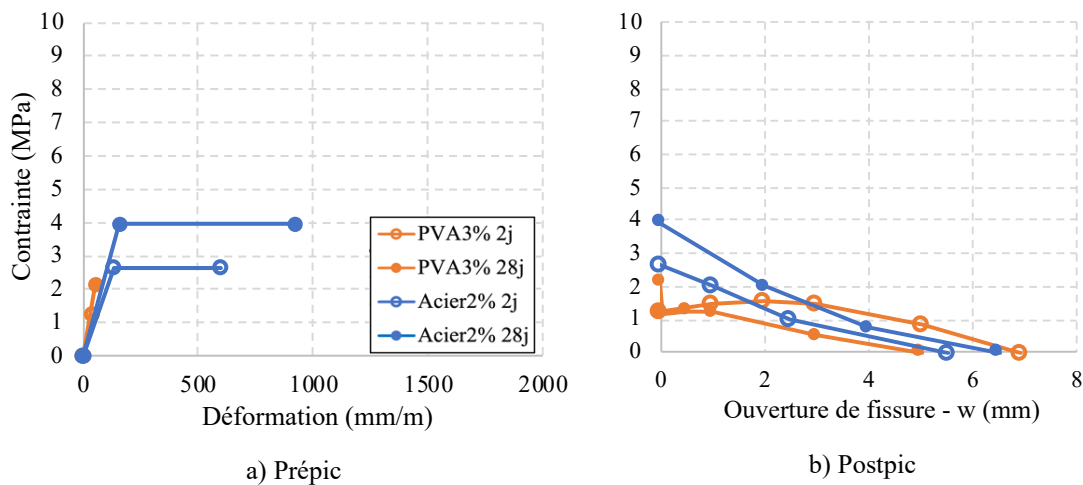


Figure 3-10 Comportement en traction simplifié et réduit de 50 % des BFUP

3.3.1.2 Armatures en acier

Les barres d'armature sont considérées comme un matériau multilinéaire unidimensionnel. Le logiciel permet de modéliser les barres comme des éléments treillis avec la loi « CCRéinforcement ». Les barres ont le même comportement en compression et en traction. Dans le cadre de ce projet, des armatures 15M et des 25M de nuance 400W sont utilisées. Le Tableau 3-3 et la Figure 3-11 présentent les propriétés des barres considérées pour la conception. Les lois utilisées proviennent de projets précédents à Polytechnique

(Damry et al., 2013; Duchesneau et al., 2011; Gendron et al., 2022). Les lois définies sont multilinéaires avec tous les points spécifiés.

Tableau 3-3 Propriétés des armatures utilisées pour la modélisation en conception

Type de barre	E (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)
15M	207000	455	636
25M	188000	470	675

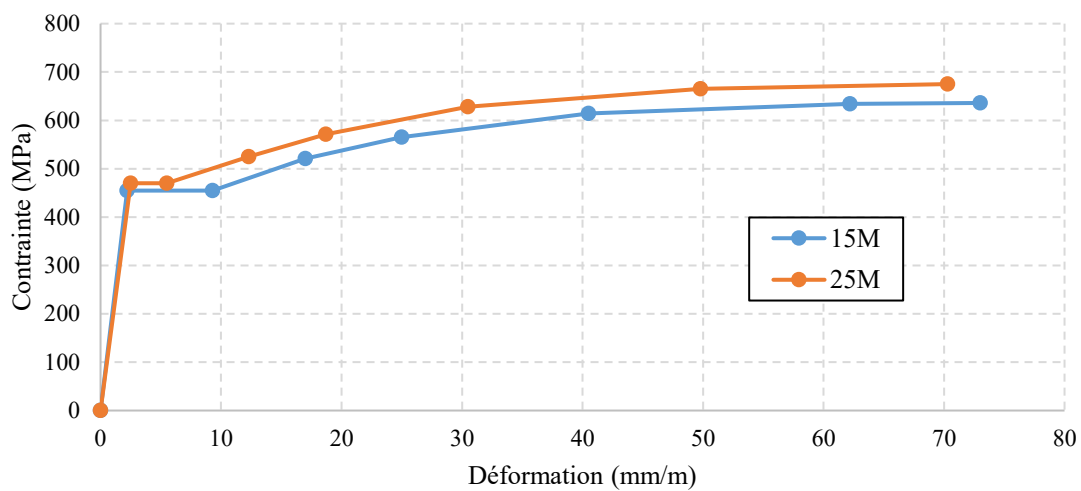


Figure 3-11 Comportement des armatures en traction pour la modélisation en conception

3.3.1.3 Plaque en acier

Le comportement de la plaque de chargement est modélisé avec la loi « CC3DBiLinearSteelVonMises » qui considère un comportement linéaire jusqu'à une contrainte où il y a de l'écrouissage défini par un autre module H. La Figure 3-12 montre une courbe considérée pour la plaque de chargement pour ce projet. Le comportement en compression et en traction est le même et le coefficient de Poisson est de 0.3.

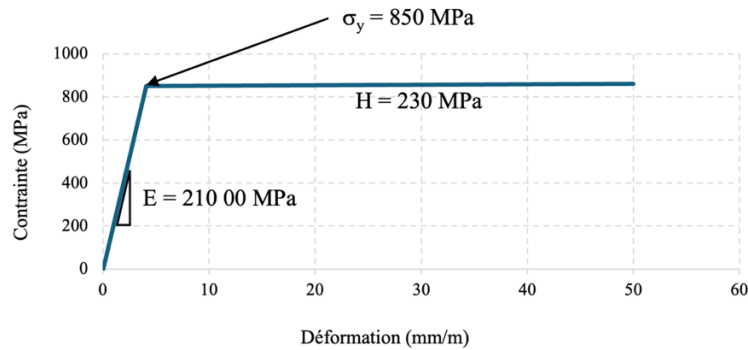


Figure 3-12 Propriété du matériau de la plaque de chargement

3.3.2 Interfaces

Cette section présente les propriétés des interfaces utilisées entre les différents bétons ou entre la plaque d'acier et les bétons dans les modèles. Les interfaces sur ATENA sont basées sur le critère Mohr-Coulomb avec une valeur de traction minimale. L'ouverture à l'interface est donc contrôlée par le critère de Mohr-Coulomb jusqu'à ce que la contrainte dans l'interface dépasse la contrainte de traction spécifiée. Par la suite, c'est le frottement entre les deux éléments qui contrôle. La loi d'interface sur le logiciel est « CC3DInterface ». Il faut y définir la rigidité normale (K_{nn}), la rigidité tangentielle (K_{tt}), la traction minimale (f_t), la cohésion (C) et le coefficient de frottement (μ). Le Tableau 3-4 présente les valeurs d'interfaces utilisées pour tous les paramètres. Elles proviennent de projets antérieurs à Polytechnique (Damry et al., 2013; Duchesneau et al., 2011; Gendron et al., 2022) et ont permis de bien reproduire les comportements structuraux des parapets.

Tableau 3-4 Propriétés des interfaces utilisées pour les modèles

Interface	K_{nn} (MN/m ³)	K_{tt} (MN/m ³)	f_t (MPa)	C (MPa)	μ (-)
dalle/parapet	5.00E+05	2.50E+04	1.8	0.5	1
dalle/coque	5.00E+05	2.50E+04	1.83	0.5	1
acier/béton	1.00E+07	1.00E+07	0.5	1	0.3
cœur/coque	5.00E+05	2.50E+04	3	0.5	1
cœur/coque réduite	8.33E+04	4.16E+03	0.5	0.5	0.3

Il est également pertinent de considérer des lois d'interfaces entre les armatures et le béton. La loi utilisée est appelée « CCRReinforcementBondMaterial » et provient du code CEB-FIB (Comité Euro-International du Béton, 1990). Les paramètres d'entrée de cette loi sont la résistance à la compression du béton, le type de barres (avec ou sans crénelures), le confinement (avec ou sans) et la qualité de l'interface (bonne ou mauvaise). La loi est illustrée à la Figure 3-13 pour un béton ordinaire (f'_c de 50 MPa).

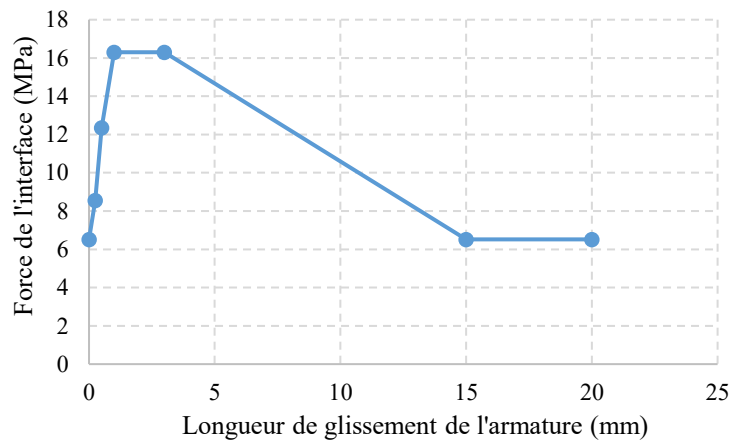


Figure 3-13 Comportement de l'interface des barres d'armatures et du béton

3.4 Modélisation du cas de chargement 1 – Retrait restreint de la coque en BFUP

Cette section porte sur l'étude du retrait restreint de la coque. La présence du moule intérieur lors du retrait du BFUP au jeune âge génère une restrainte importante, il est alors essentiel de vérifier que le retrait restreint n'endommage pas la coque de façon importante.

3.4.1 Présentation du modèle

La Figure 3-14 présente une vue globale de la coque modélisée sur ATENA. Les sous-sections suivantes expliquent les choix de modélisation.

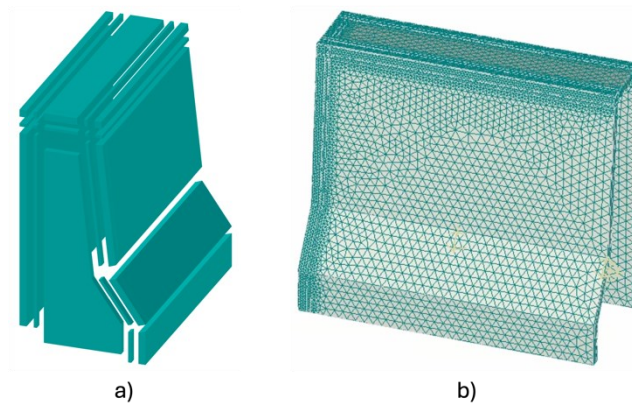


Figure 3-14 Modèle pour étudier le retrait restreint de la coque, a) Macro-éléments, b) Maillage

Le modèle comporte aussi des chanfreins visant à réduire la concentration de contrainte dans les coins et ainsi la fissuration. La Figure 3-15 illustre la position et les dimensions du chanfrein retenu. Les chanfreins mesurent 13 mm de part et d'autre du coin intérieur de la coque. Il est difficile de reproduire le chanfrein arrondi dans les modèles d'où l'utilisation de deux droites.

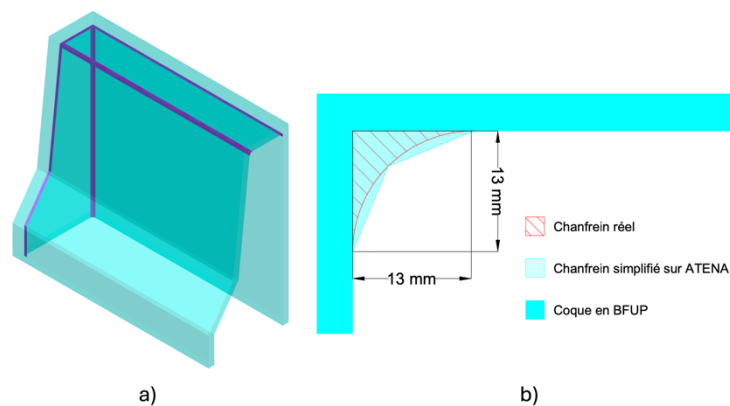


Figure 3-15 Chanfrein modélisé dans la coque en BFUP, a) Position, b) Dimensions

3.4.1.1 Maillage et matériaux

La coque est divisée en différents macro-éléments distincts pour assurer la compatibilité du maillage entre chaque élément (Figure 3-14a). Tous les macro-éléments sont modélisés avec des éléments tétraédriques à 4 nœuds avec points d'intégration de Gauss linéaires.

Bien que les éléments cubiques soient plus performants, les éléments tétraédriques sont utilisés à cause des limitations de puissance de calcul et à cause des limitations du mailleur intégré dans ATENA. La coque est composée 3 éléments sur son épaisseur de 6.67, 10 et 13.33 mm pour les coques de 20, 30 et 40 mm d'épaisseur. Des éléments plaques ont également été testés et ont fourni des résultats similaires avec moins de besoins en puissance de calcul. Les éléments cubiques ont cependant été conservés, car ils permettent ensuite plus facilement l'étude des contraintes et de la fissuration dans le logiciel.

Les matériaux utilisés sont les deux types de BFUP du projet, soit l'un avec des fibres en acier et l'autre avec des fibres en PVA. Les lois de comportement des BFUP mesurées à 2 jours de maturité sont utilisées pour simuler l'impact du retrait restreint de la coque qui se produit dans le coffrage de 0 à 2 jours.

3.4.1.2 Conditions limites

Pour accélérer les calculs, seulement la moitié de la coque est modélisée (Figure 3-16). La symétrie est appliquée sous la forme d'un support avec les déplacements hors plans bloqués.

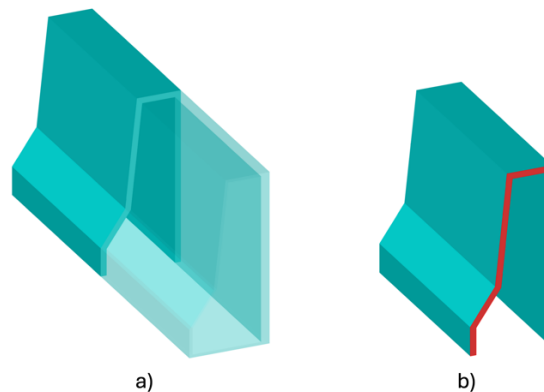


Figure 3-16 Utilisation de la symétrie dans le modèle de retrait restreint, a) Partie modélisée, b) Surface avec application de la symétrie en rouge

Le retrait est restreint par le coffrage, il faut donc modéliser cette restriction sous forme de blocage. Deux méthodes ont été explorées pour bloquer les déplacements aux nœuds : à l'aide de supports ou avec des ressorts. Les deux solutions mentionnées ont été priorisées

par rapport à l'interface de contact, car elles utilisent moins de paramètres et sont plus faciles à modéliser. Le ressort est configuré pour bloquer les déplacements dans une direction, par exemple pour empêcher le béton de traverser le coffrage mais, dans la direction opposée, il peut permettre au béton de se décoller ou de glisser sur la surface du coffrage comme il pourrait le faire dans la réalité. Autrement dit, seul le déplacement normal entrant dans le coffrage est bloqué par le ressort. La Figure 3-17 suivante montre comment le comportement d'un ressort est plus représentatif du comportement réel du coffrage à l'inverse de bloquer les déplacements avec un support.

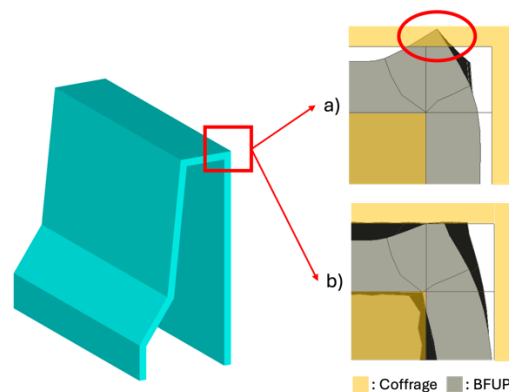


Figure 3-17 Déformation causée par le retrait avec deux conditions frontières différentes, a) Blocage incorrect des déplacements avec un support, b) Blocage adéquat des déplacements avec un ressort

La retenue procurée par un blocage complet des déplacements hors plan et dans le plan est trop sévère (Figure 3-17a). Le béton ne peut pas se décoller du coffrage. Le blocage des déplacements avec un ressort permet de seulement bloquer la direction dans le plan et de permettre au matériau de se décoller du coffrage. Les ressorts sont retenus, car ils permettent de modéliser la retenue exercée par le coffrage de manière plus adaptée.

Le Tableau 3-5 suivant montre les caractéristiques du ressort. Un guide préparé par ATENA recommande de prendre une contrainte positive 1000 fois inférieure à celle négative (Pryl & Červenka, 2020). Une pénalité très grande en compression (contrainte négative) et très petite en traction (contrainte positive). Une étude de sensibilité démontre que pour des contraintes en compression 1000 fois supérieure ou plus aux contraintes en

traction, le déplacement est bien bloqué dans une seule direction. Il n'y a aucune pénalité sur le déplacement tangentiel.

Tableau 3-5 Propriété du ressort qui agit comme un support

Déplacement relatif (m/m)	Contrainte (MPa)
-1	-50000
0	0
1	50

3.4.1.3 *Chargement*

Le chargement doit reproduire le retrait restreint de la coque dans le coffrage. Le retrait est appliqué en 10 pas de calculs. Une valeur représentative du retrait au jeune âge est difficile à estimer avec précision, car le BFUP montre une phase de gonflement thermique et de retrait d'hydratation au cours des deux premiers jours d'hydratation. Il est difficile de les dissocier. De plus, la rigidité du matériau évolue beaucoup pendant cette période et seule la partie du retrait survenant lorsque le BFUP a une rigidité suffisante génère une restreinte. Or, le modèle ne considère que le retrait avec une rigidité constante. Dans ce contexte, l'amplitude du retrait choisi est assez grande pour essayer de prévoir de manière conservatrice le retrait observé. Un retrait libre de 500 mm/m est appliqué sur le BFUP de la coque.

3.4.1.4 *Moniteurs considérés*

Deux moniteurs sont considérés dans cette phase de calculs. Le premier est la fissuration maximale qui indique la plus grande fissure relevée dans tous les éléments. Le deuxième est la déformation mesurée sur une distance de 1 mètre sur la face inclinée de la coque. La déformation est mesurée au même emplacement que la jauge à fibre optique de 1 m qui sera installée dans la coque lors de sa production. La Figure 3-18 présente la position de la jauge pour chaque épaisseur de coque.

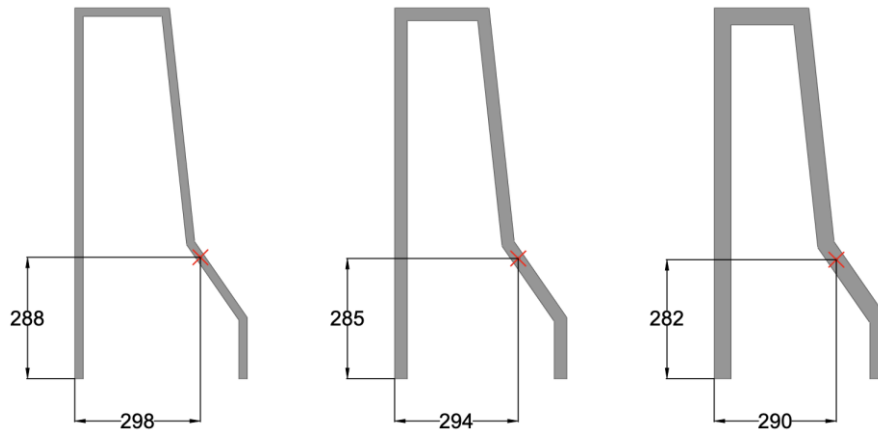


Figure 3-18 Position de la jauge selon l'épaisseur de la coque

Le chanfrein et certains macro-éléments adjacents affichent une fissuration locale due à une concentration de contraintes à la jonction des deux droites du chanfrein. La Figure 3-19 illustre la fissuration locale dans les macro-éléments à proximité du chanfrein. Parmi l'ensemble des modèles analysés, il a été constaté que la fissuration qui se développe à gauche du chanfrein, si l'on fait abstraction de celle créée directement au chanfrein, est équivalente à celle qui se forme en haut à droite du chanfrein. Ainsi, pour négliger l'effet de la concentration de contrainte au joint du chanfrein, une zone de macro-éléments a été retirée de l'analyse des résultats (encadré orange, Figure 3-19). Le post-traitement des résultats évalue donc l'ouverture de fissure maximale dans la coque en BFUP en négligeant cette zone.. Il est ainsi possible d'estimer l'endommagement dû au retrait restreint de manière plus réaliste en faisant abstraction de la concentration de contrainte dans le chanfrein intérieur fortement influencé par les limitations de maillage. La Figure 3-20 illustre les macro-éléments retirés pour le calcul de la fissuration.

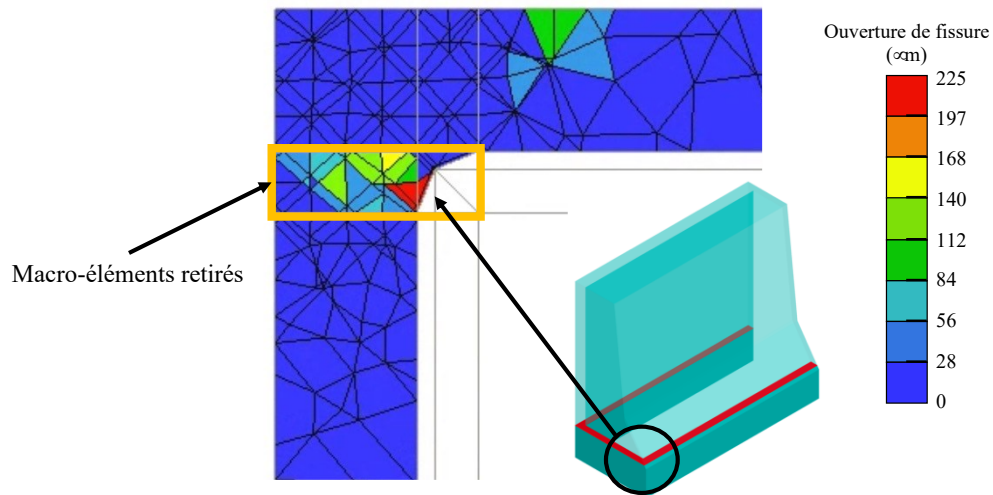


Figure 3-19 Fissuration à proximité du chanfrein pour un retrait libre appliqué de 500 µm/m

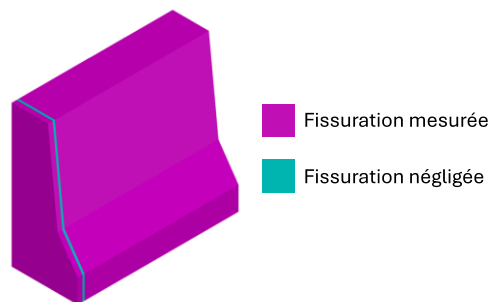


Figure 3-20 Macro-éléments retirés pour mesurer la fissuration due au retrait restreint

3.4.2 Résultats

Les modèles d'éléments finis fournissent deux jeux de données importants pour la conception de la coque. La Figure 3-21a présente la différence entre le retrait restreint effectif mesuré dans la coque et le retrait libre appliqué dans le modèle. La Figure 3-21b montre l'ouverture de fissure maximale mesurée en fonction du retrait libre appliqué pour les différentes épaisseurs de coque.

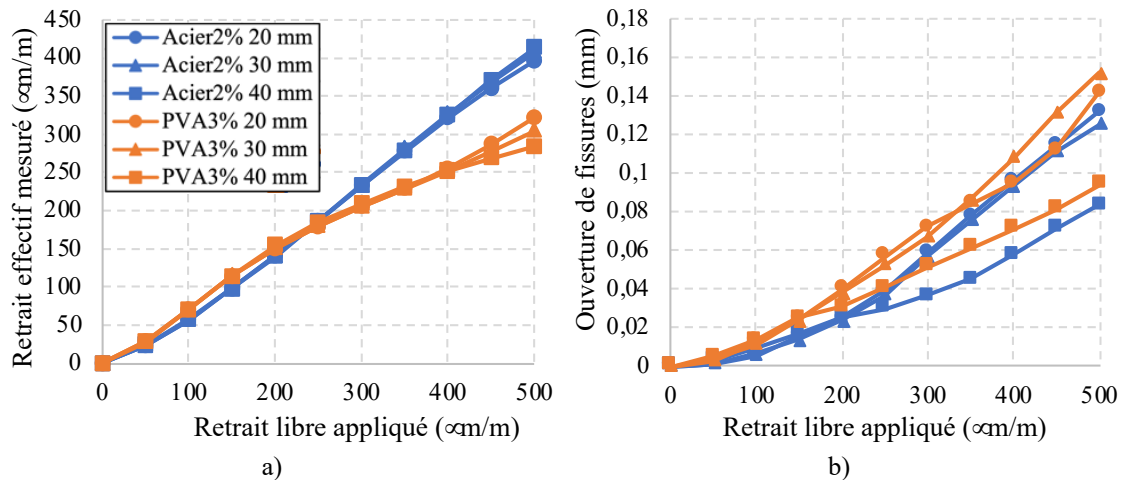


Figure 3-21 Retrait de la coque selon l'épaisseur et le type de fibres dans le BFUP, a) Retrait effectif, b) Ouverture de fissure selon le retrait libre appliqué

Le retrait effectif maximal mesuré est de 400 $\mu\text{m/m}$ ce qui indique que le coffrage restreint environ 20 % du retrait libre appliqué de 500 $\mu\text{m/m}$. Donc environ 80 % du retrait imposé se transforme en déformation dans l'épaisseur de la coque et en fissuration. Il aurait été attendu que le retrait effectif soit légèrement plus grand à la Figure 3-21a. Cependant, les courbes pour les trois épaisseurs de coques sont superposées. On note que la fissuration maximale créée dans les coques plus minces est légèrement plus grande que pour la coque épaisse de 40 mm (Figure 3-21b). L'ouverture de fissure est un peu plus élevée dans les coques en BFUP avec fibres en PVA.

Les courbes de fissuration de la Figure 3-21b indiquent que la fissuration atteint plus de 0.1 mm pour certaines épaisseurs de coques. Cependant, des essais menés par Abid (2021) sur des spécimens de BFUP avec 2 % de fibres en acier indiquent que l'amplitude du retrait libre se situe entre 200 et 300 $\mu\text{m/m}$ pour le BFUP entre 0 et 48 heures. Pour cette plage de retrait, les modèles indiquent que la fissuration est inférieure à 0.1 mm pour toutes les épaisseurs de coque et tous les BFUP. Seule la microfissuration très fine apparaîtra donc dans les coques avec le retrait et aura un effet négligeable sur le comportement structural et la durabilité.

La fissuration principale est située au même endroit pour chaque coque, peu importe l'épaisseur ou le type de fibres dans le BFUP. La fissuration d'une coque en BFUP soumise

à 350 $\mu\text{m}/\text{m}$ de retrait libre est illustrée à la Figure 3-22. La microfissuration est surtout située dans les chanfreins et elle n'est pas traversante. De la microfissuration est aussi présente dans les extrémités où il y a une grande restrainte. Comme mentionné précédemment, la fissuration reste inférieure à 0.1 mm dans les coques pour un retrait libre appliqué inférieur à 350 $\mu\text{m}/\text{m}$.

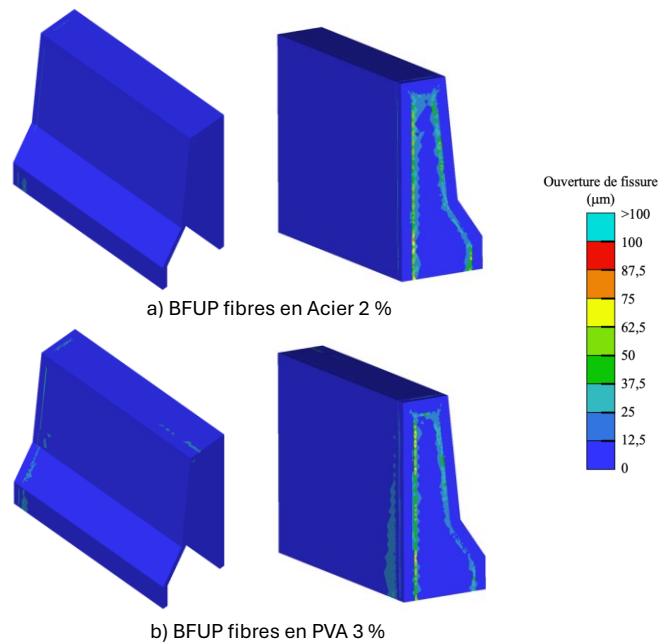


Figure 3-22 Fissuration due au retrait observée dans les coques de 30 mm avec un retrait libre de 350 $\mu\text{m}/\text{m}$

3.4.3 Conclusion

Cette première étape de conception a démontré, pour une restrainte d'environ 20 % du retrait, un retrait libre appliqué inférieur à 350 $\mu\text{m}/\text{m}$ et des lois de matériaux conservatrices, que toutes les épaisseurs de coques avec les deux types de BFUP demeurent microfissurées ($w \leq 0.1 \text{ mm}$) lors de la première étape de fabrication. Les modèles démontrent l'importance d'ajouter des chanfreins dans les coffrages de la coque afin de réduire la concentration de contraintes et la fissuration dans les coins intérieurs des coques. Le démoulage hâtif est aussi requis, car il faut enlever la restrainte du retrait le plus tôt possible pour faciliter le démoulage et limiter la microfissuration.

3.5 Modélisation du cas de chargement 2 – Remplissage de la coque

Cette section porte sur le remplissage de la coque en BFUP avec du béton ordinaire qui survient en chantier. La coque se comporte comme un coffrage et doit donc reprendre la pression hydrostatique générée par la mise en place du béton frais sans endommagement.

3.5.1 Présentation du modèle

La Figure 3-23 présente le modèle qui est développé sur ATENA. Les sections suivantes décrivent en détail les choix de modélisation.

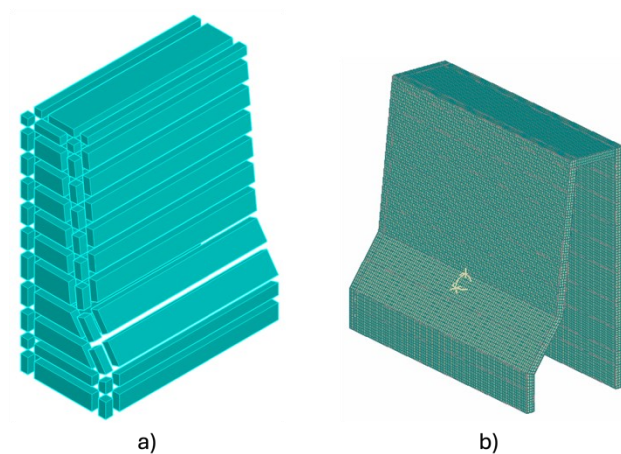


Figure 3-23 Modèle pour étudier l'effet du remplissage de la coque en BFUP par le BO en chantier
a) Macro-éléments, b) Maillage

3.5.1.1 *Maillage et matériaux*

La coque est modélisée en considérant la symétrie longitudinale comme pour le retrait. La Figure 3-23a présente la division en macro-éléments afin de pouvoir appliquer le chargement, de conserver la compatibilité de maillage et de permettre l'utilisation des éléments cubiques à 8 nœuds avec intégration linéaire. La coque a trois éléments sur son épaisseur. Les éléments ont donc respectivement des tailles de 6.67, 10 et 13.33 mm pour les coques de 20, 30 et 40 mm d'épaisseur.

3.5.1.2 Conditions limites

La coque est installée sur la dalle avec des madriers en bois (4 x 4 po) qui sont vissés sur la dalle et vissés sur les faces avant et arrière du parapet. Les conditions limites appliquées sont réalisées avec le même type de ressorts utilisés pour le retrait de la coque (surface mauve sur la Figure 3-24). Il y a un blocage de déplacement dans toutes les directions sur les faces où les madriers en bois sont en contact avec la coque (surface jaune sur la Figure 3-24). Enfin, il y a un blocage des déplacements hors plan pour la symétrie (surface rouge sur la Figure 3-24).

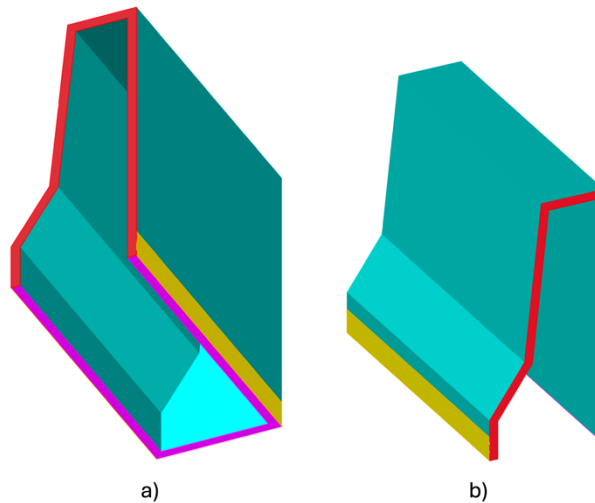


Figure 3-24 Conditions limites sur la coque pour le remplissage du béton, a) Vue de dessous, b) Vue de côté

Les matériaux considérés dans les modèles sont les BFUP avec les deux types de fibres (Acier et PVA) à 28 jours de maturité lors de leur installation sur le pont.

3.5.1.3 Chargement

Le chargement appliqué sur la coque pour cette phase est une pression hydrostatique qui est illustrée à la Figure 3-25. Comme le logiciel ATENA ne permet pas l'application d'un profil de pression triangulaire, un profil de pression équivalent avec blocs rectangulaires d'amplitude variable a été développé. La pression hydrostatique est appliquée en 10 étapes, pour simuler le remplissage graduel de la coque. Chaque étape est divisée en 4 pas de calcul

pour lesquels l'amplitude de pression augmente, ce qui donne au total 40 pas de chargement.

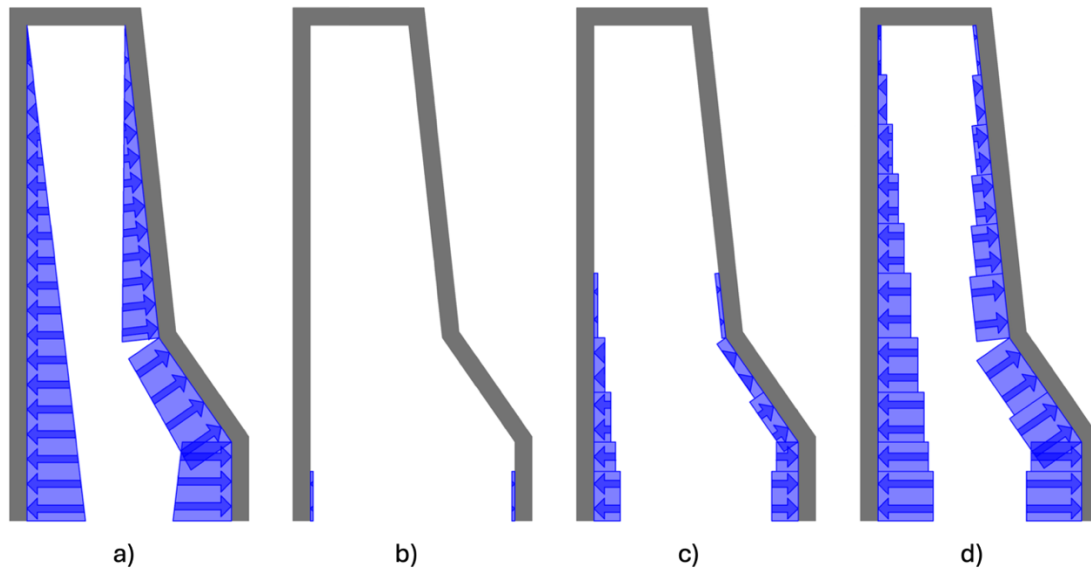


Figure 3-25 Remplissage de la coque, a) chargement réel, b) 1er pas de chargement, c) 5e pas de chargement, d) 10e pas de chargement (dernier)

Le béton est considéré de manière conservatrice comme un fluide sans thixotropie, car un béton de remplissage autoplaçant est prévu pour la fabrication en chantier. L'équation 3-1 permet de calculer la pression maximale en bas de la coque selon la hauteur de béton ordinaire coulé. La conversion de la pression triangulaire en rectangle se fait avec des ratios. La pression maximale appliquée à la surface intérieure du parapet est de 29.96 kPa.

$$P_{\max} = \rho \, h \, \phi_{\text{liquide}} \quad 3-1$$

P_{\max} : Pression maximale en bas de la coque

ρ : Masse volumique du béton = 23.5 kN/m³

h : Hauteur de béton dans la coque

ϕ_{liquide} : Facteur de pondération pour un liquide (2022) = 1.5

3.5.1.4 Moniteurs considérés

Les moniteurs considérés pour cette phase de modélisation sont les mêmes que pour la phase de retrait. La déformation dans la section inclinée de la coque et la fissuration maximale sont étudiées.

3.5.2 Résultats

La distribution de la déformation longitudinale observée dans chaque coque est très similaire, il s'agit d'un gonflement sur toute la longueur de la coque dont l'amplitude maximale est d'environ 0.9 mm à la mi-hauteur sur les faces arrière et de 0.3 mm sur la face avant.

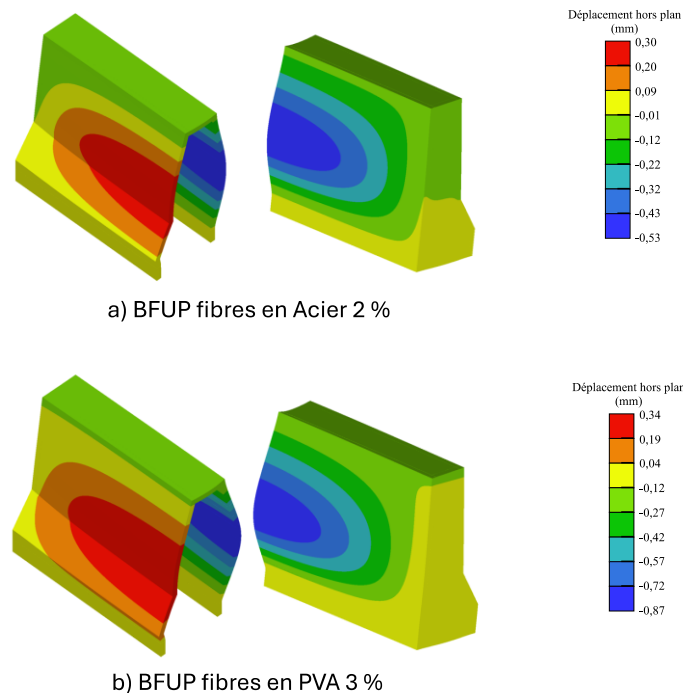


Figure 3-26 Déformation transversale lors du remplissage de BO en chantier

La Figure 3-27a montre l'évolution de la déformation maximale au centre de la face arrière de la coque selon la hauteur de béton introduit dans la coque en pourcentage, 100 % représentant un remplissage complet. La déformation longitudinale mesurée est similaire pour les coques avec la même épaisseur, peu importe le type de fibres utilisées. Ceci

s'explique par le fait que les deux BFUP étudiés ont une rigidité similaire. Cependant, la déformation longitudinale augmente pour les coques plus minces qui sont plus flexibles sous la pression du remplissage. L'ouverture des fissures mesurée selon le pourcentage de la coque remplie de béton frais est illustrée à la Figure 3-27b. Les ouvertures de fissures sont inférieures à 100 μm pour toutes les coques, sauf celle en BFUP avec fibres en PVA de 20 mm d'épaisseur où la fissuration grimpe jusqu'à 500 μm très localement. Logiquement, les ouvertures de fissures mesurées dans les coques plus minces sont supérieures à celles dans les coques plus épaisses. De plus, à épaisseurs égales, les ouvertures sont plus faibles dans les coques avec BFUP à fibre d'acier qui présentent un meilleur contrôle de fissuration. Les variations de la fissuration observées à la Figure 3-27b à niveau de remplissage élevé coïncident et expliquent les variations de déformation longitudinales montrées à la Figure 3-27a. Ces résultats indiquent qu'il serait préférable d'utiliser des coques de 30 mm d'épaisseur.

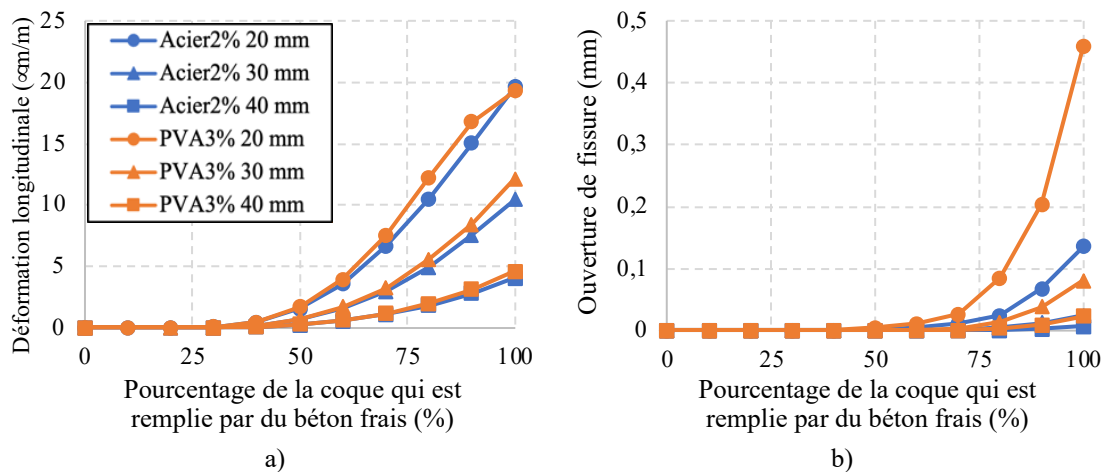


Figure 3-27 Comportement des différentes coques lors de leur remplissage avec du BO pour différentes épaisseurs de coque de BFUP, a) Déformation longitudinale, b) Ouverture de fissure

La microfissuration observée dans cette phase de conception est principalement localisée au changement de section de la face avant du parapet (Figure 3-28). Elle est située à l'intérieur de la coque et n'est pas traversante. La Figure 3-29 illustre en effet que la

fissuration observée en surface intérieure de la coque en BFUP lors du remplissage des coques par le BO n'apparaît pas à la surface extérieure.

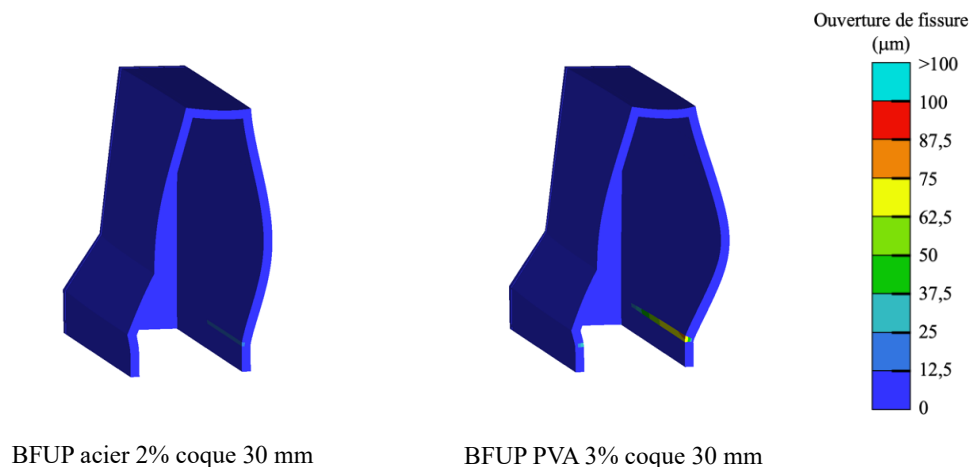


Figure 3-28 Fissuration à l'intérieur de la coque de 30 mm en BFUP lors du remplissage de BO en chantier

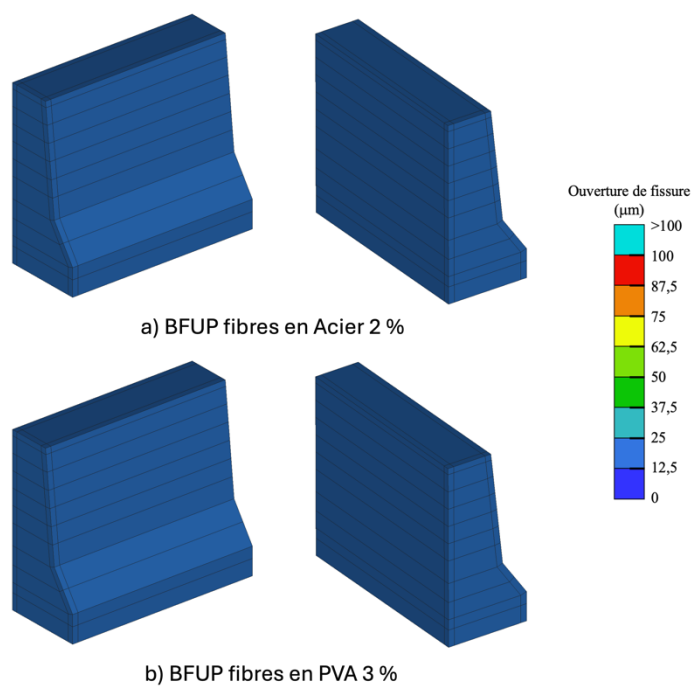


Figure 3-29 Fissuration à l'extérieur de la coque de 30 mm en BFUP lors du remplissage de BO en chantier

Enfin, la fissuration n'est pas située au même endroit pour la phase 1 (production coque en BFUP) et la phase 2 (remplissage du BO dans la coque en BFUP), il est justifiable de ne pas combiner les deux cas de chargement dans le même modèle. Les contraintes résiduelles à la fin de chacune des phases 1 et 2 sont jugées négligeables et ne sont donc pas reportés au modèle suivant qui concerne l'évaluation du comportement mécanique du parapet sous un chargement transversal de véhicule. De plus, le logiciel ne permet pas de modifier la loi de comportement du BFUP dans le temps, ce qui ne permet pas de considérer deux lois différentes pour le modèle de retrait et celui de remplissage où les BFUP sont âgés respectivement de 2 et 28 jours avec des comportements différents.

3.5.3 Conclusion

Cette deuxième étape de conception a démontré que la coque a une résistance suffisante pour le remplissage avec le BO en chantier. La fissuration est inférieure à $100\ \mu\text{m}$ pour les coques de 30 et 40 mm d'épaisseur et la déformation hors plan est inférieure à 1 mm pour toutes les épaisseurs des coques en BFUP. Pour le volet expérimental du projet, il serait intéressant de considérer une zone d'étude avec le SIC (Système d'Image Corrélée) sur une face d'un parapet pour valider les modèles. Il importe de rappeler que les modèles sont développés avec des lois de matériaux conservatrices. Une meilleure performance et une fissuration inférieure sont attendues.

3.6 Détermination de l'épaisseur de la coque

Les résultats des deux premières phases de conception et les essais d'écoulement permettent de choisir l'épaisseur pour la coque en BFUP.

Premièrement, les modèles ont permis d'étudier les effets du retrait restreint des coques en BFUP et du remplissage des coques avec le BO. Les modèles de retrait restreint ont permis de conclure que pour un retrait libre appliqué de moins de $350\ \mu\text{m/m}$ et une restrainte de 20 % des coques, les coques de 20 mm d'épaisseur ne demeuraient que microfissurées avec une ouverture de fissure inférieure à 0.1 mm. Les modèles de remplissage des coques avec le BO ont quant à eux permis de conclure que des coques d'au moins 30 mm demeuraient également microfissurées en considérant un blocage complet des déplacements au bas de la coque.

Deuxièmement, des essais d'écoulement du BFUP dans des coques de différentes épaisseurs ont été réalisés en laboratoire (Chapitre 4). Les essais d'écoulement suggèrent que des épaisseurs de 20 et 30 mm sont techniquement réalisables. Les coques avec ces épaisseurs se remplissent bien, c'est-à-dire sans vide de remplissage ou oursins de fibres apparent, et les surfaces ont un bon fini de surface. L'épaisseur retenue des coques en BFUP avec fibres en acier et fibres synthétiques pour la conception est donc de 30 mm. Dans ce contexte, uniquement cette épaisseur sera considérée pour l'étude de comportement structural du parapet avec coques en BFUP dans la section suivante.

3.7 Modélisation du cas de chargement 3 – Essais structuraux sur le parapet hybride

Maintenant que les dimensions de la coque ont été fixées pour résister aux deux premières phases de chargement, il faut vérifier si le parapet hybride avec la coque en BFUP et le cœur en BO offre un comportement structural acceptable lors de l'impact d'un véhicule. Ce nouveau concept de parapet hybride se distingue des autres étudiés précédemment à Polytechnique (Section 2.3.2) par le fait que le cœur en BO est coulé dans une coque en BFUP, alors qu'auparavant la coque en BFUP était mise en place sur le BO. La surface intérieure de la coque aura donc une surface rugueuse pour favoriser l'adhérence du BO sur cette dernière. Cet aspect sera considéré dans cette phase de modélisation.

Comme exigé dans le code CSA S6-19 (2019), le parapet hybride doit résister minimalement à des forces transversales, longitudinales et verticales (Section 2.3.1). Pour des fins de simplification, seule la force transversale est considérée. La force de conception dans un parapet TL-4 présent dans les rues et les boulevards urbains est de 100 kN. La charge ultime est calculée avec un facteur de majoration de 1.7 et prend la valeur de 170 kN. Cette valeur est ensuite divisée par un coefficient de tenue des matériaux moyen de 0.75 pour la résistance à l'effort tranchant pour le béton armé. Ainsi la charge de conception pondérée est de 227 kN.

3.7.1 Présentation du modèle

La Figure 3-30 montre le modèle du parapet hybride installé sur une dalle de pont. Il est important de mentionner que la coque en BFUP sert de coffrage permanent et de membrane

de protection pour assurer la durabilité du parapet. Comme la coque n'a pas pour objectif de renforcer le parapet, les armatures présentes dans le cœur en BO sont celles du parapet de référence MTQ201. Ainsi, aucune modification n'a été apportée aux dimensions extérieures ni au détail d'armature du parapet de référence. Les sous-sections suivantes présentent les choix de modélisation.

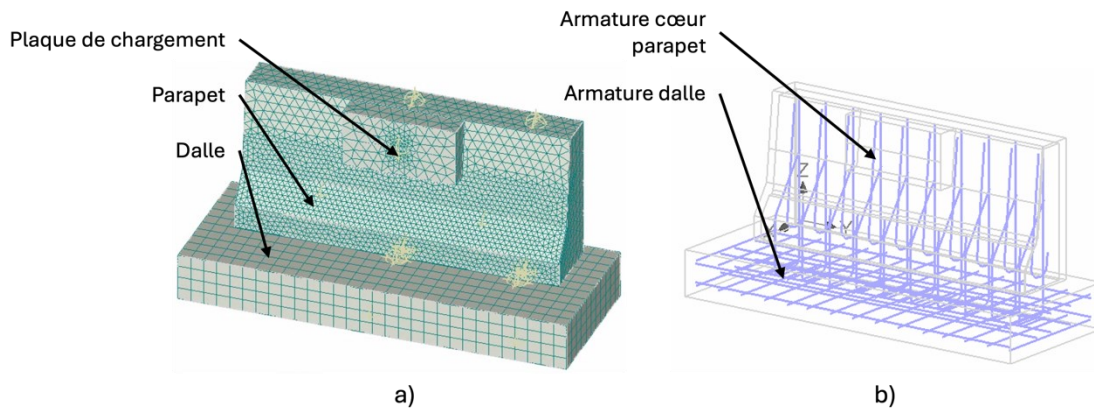


Figure 3-30 Modèle pour les essais structuraux sur parapet hybride, a) Maillage, b) Armature

3.7.1.1 Maillage et matériaux

Le Tableau 3-6 présente les caractéristiques du maillage et les matériaux retenus pour chaque macro-élément du modèle.

Tableau 3-6 Caractéristiques du maillage pour les essais structuraux

Macro-élément	Taille du maillage (mm)	Type d'élément	Matériau
Dalle	80	Cube 8 nœuds	BHP50
Parapet réf.	60	Tétraèdre 4 nœuds	BHP50
Cœur	60	Tétraèdre 4 nœuds	BO30
Coque	60	Tétraèdre 4 nœuds	BFUP
Plaque de chargement	100	Tétraèdre 4 nœuds	Acier

La plaque de chargement en acier a un maillage global de 100 mm et un raffinement de maillage au point d'application de la force. Les éléments mesurent 10 mm en ce point. Un

raffinement de maillage à 30 mm est aussi appliqué sur la surface inclinée de la coque en BFUP.

Les armatures sont configurées avec la loi illustrée à la Figure 3-11. Une loi d'adhérence est appliquée sur les armatures faisant le lien entre la dalle et le parapet, et, ailleurs dans le modèle, une adhérence parfaite est considérée. Le béton du cœur est choisi en concordance avec le Tableau 2.8-1 du tome III du MTQ (2023a) où il est recommandé un béton de type XIII. Or, ce type de béton n'est pas autoplaçant et pour le couler dans la coque en BFUP, un béton semi-autoplaçant de type XVII a été retenu (MTQ, 2023b). Ce béton a une résistance à la compression à 28 jours de 35 MPa et un rapport eau liant de 0.41. Le béton utilisé pour le parapet MTQ201 de référence sans coque en BFUP est un BHP de 50 MPa. Les caractéristiques des bétons sont déjà présentées au Tableau 3-2.

3.7.1.2 *Conditions limites*

Pour fin de simplification, l'ancrage réel de la dalle du parapet à la dalle du laboratoire par post-tension avec des barres « Dywidag », n'est pas considéré dans les modèles. La seule condition limite appliquée sur le modèle est donc la retenue des déplacements verticaux et horizontaux sur la dalle du parapet.

3.7.1.3 *Interfaces*

Puisque le modèle est constitué de différents bétons, des lois d'interfaces doivent être appliquées entre ceux-ci. La Figure 3-31 illustre où les lois d'interface mentionnées au Tableau 3-4 sont appliquées sur le modèle.

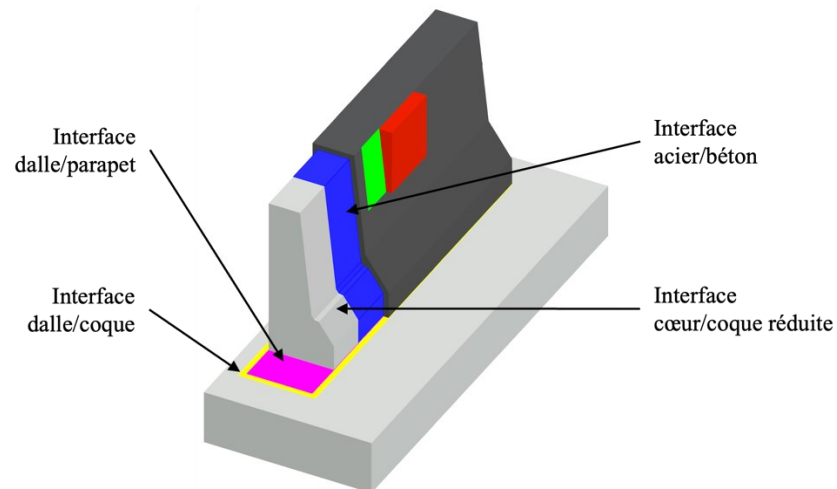


Figure 3-31 Interfaces considérées sur le parapet en conception

Comme mentionné à la Section 3.3.2, il est important de rappeler que l'interface entre le BO du cœur et le BFUP de la coque est réduite parce que la loi d'interface initiale était utilisée pour un BFUP coulé sur un BO, alors que dans ce projet le BO est coulé sur un BFUP. Le BO ayant une moins bonne adhérence que le BFUP, la loi d'interface cœur/coque est réduite par un facteur de 6 pour certains paramètres (K_{nn} , K_{tt} et résistance à la traction) et par un facteur de 3 pour le coefficient de frottement.

3.7.1.4 *Chargement*

En laboratoire, le parapet est chargé avec un vérin par l'entremise d'une plaque de transfert en acier de 700×350 mm. Dans le modèle numérique, le chargement sur le parapet est réalisé avec une plaque en acier qui applique un déplacement imposé dont le point de contrôle est au centre (Figure 3-32). Pour s'adapter à la face inclinée du parapet, la plaque est modélisée avec une épaisseur de 112 mm en bas et de 150 mm en haut. Environ 100 pas de chargement de 0.05 mm transversal sont appliqués au modèle pour reproduire le comportement structural jusqu'à la résistance maximale du parapet. Le parapet de référence est aussi soumis à un retrait de 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ en 20 pas avant d'être chargé structuralement. Le retrait est négligeable pour le cœur en BO du parapet hybride, car le béton est protégé par la coque en BFUP qui devrait limiter le retrait de dessiccation.

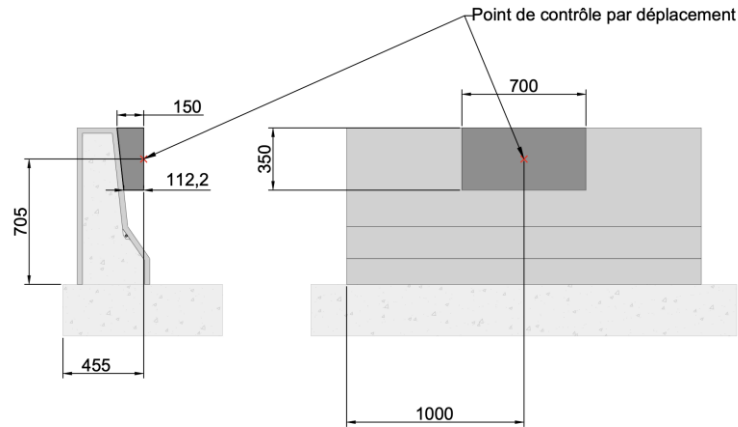


Figure 3-32 Point de contrôle en déplacement pour le chargement structural

3.7.1.5 Moniteurs considérés

Au cours de la modélisation, la fissuration dans les matériaux est analysée, en particulier celle obtenue pour la coque en BFUP, alors que les contraintes sont analysées dans les armatures en acier. Ensuite, plusieurs moniteurs (Figure 3-33) de déplacement sont introduits dans le modèle pour mesurer les déplacements de la plaque, du parapet et de la dalle et les déplacements différentiels dalle-parapet. De plus des moniteurs suivent la délamination entre le cœur en BO et la coque en BFUP, ainsi que la déformation longitudinale. Les moniteurs suivants sont basés sur l'instrumentation envisagée pour les essais structuraux en laboratoire.

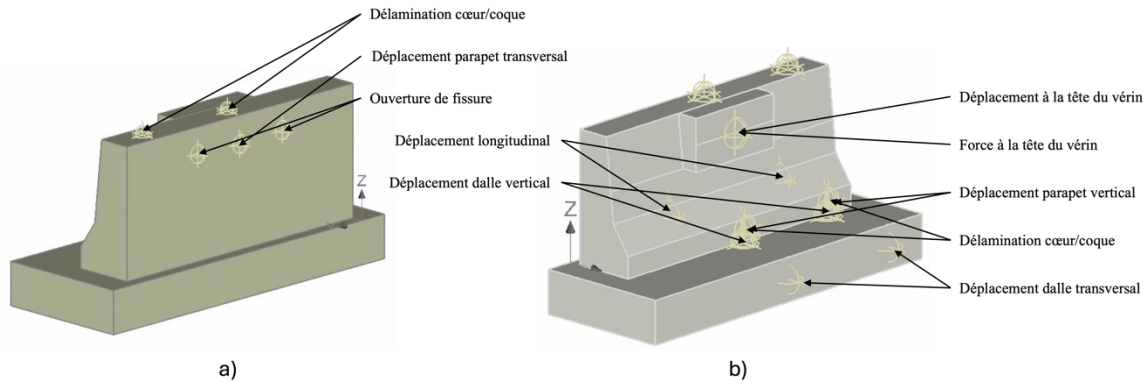


Figure 3-33 Position des moniteurs considérés pour le chargement structural en conception, a) Face arrière, b) Face avant

3.7.2 Résultats

3.7.2.1 Comportement global

Le comportement structural des parapets avec les coques en BFUP est comparé à celui d'un parapet de référence qui a la même géométrie (même armature, même dalle, mêmes dimensions) fabriqué entièrement avec du BHP et avec un retrait libre de $300 \mu\text{m/m}$ appliqué sur le BHP.

La Figure 3-34a présente le comportement des parapets hybrides versus le parapet de référence. La résistance maximale atteinte des parapets est de 360 kN. Le parapet de référence est légèrement plus résistant. Cette différence s'explique par le fait que les parapets hybrides ont un cœur en BO qui a une résistance inférieure au BHP du parapet de référence et une interface BO-BFUP qui permet un certain déplacement. Les parapets hybrides ont un comportement linéaire jusqu'à 120 kN à un déplacement de 0.5 mm. Ensuite, les parapets ont un comportement légèrement non linéaire jusqu'à 345 kN pour un déplacement de 2.25 mm. Enfin, la résistance des parapets augmente légèrement à cause de l'écroutissage en traction des armatures à la jonction de la dalle et du parapet. Les modèles sont arrêtés lorsque les critères de convergence ne sont pas atteints lors de la résolution. Pour tous les parapets, la résistance maximale dépasse nettement la force pondérée de conception de 227 kN.

La Figure 3-34b présente le soulèvement du parapet selon la force qui est appliquée sur le parapet. Tous les parapets ont un comportement similaire. Cependant les parapets hybrides

se soulèvent plus pour une même force en comparaison au parapet de référence. Cette différence s'explique par le fait que le parapet de référence a une interface BO-BO sur toute sa base, alors que les parapets hybrides ont une interface BO-BO seulement entre le cœur et la dalle et une interface BFUP-BO entre la coque et la dalle, qui est moins forte (interface procurée grâce au mortier qui joint les deux éléments). La différence dans ce comportement justifie également la résistance inférieure des parapets hybrides quant au parapet de référence.

La contrainte dans les armatures en ordonnée montrée à la Figure 3-34c permet de constater une différence dans le comportement. Normalement, il faudrait s'attendre à une contrainte égale dans les armatures pour un même soulèvement. Or, le soulèvement est légèrement supérieur dans les parapets hybrides, ce qui pourrait indiquer un léger déplacement ou endommagement dans l'interface entre le cœur et la coque, indiquant un comportement partiellement monolithique entre le cœur et la coque.

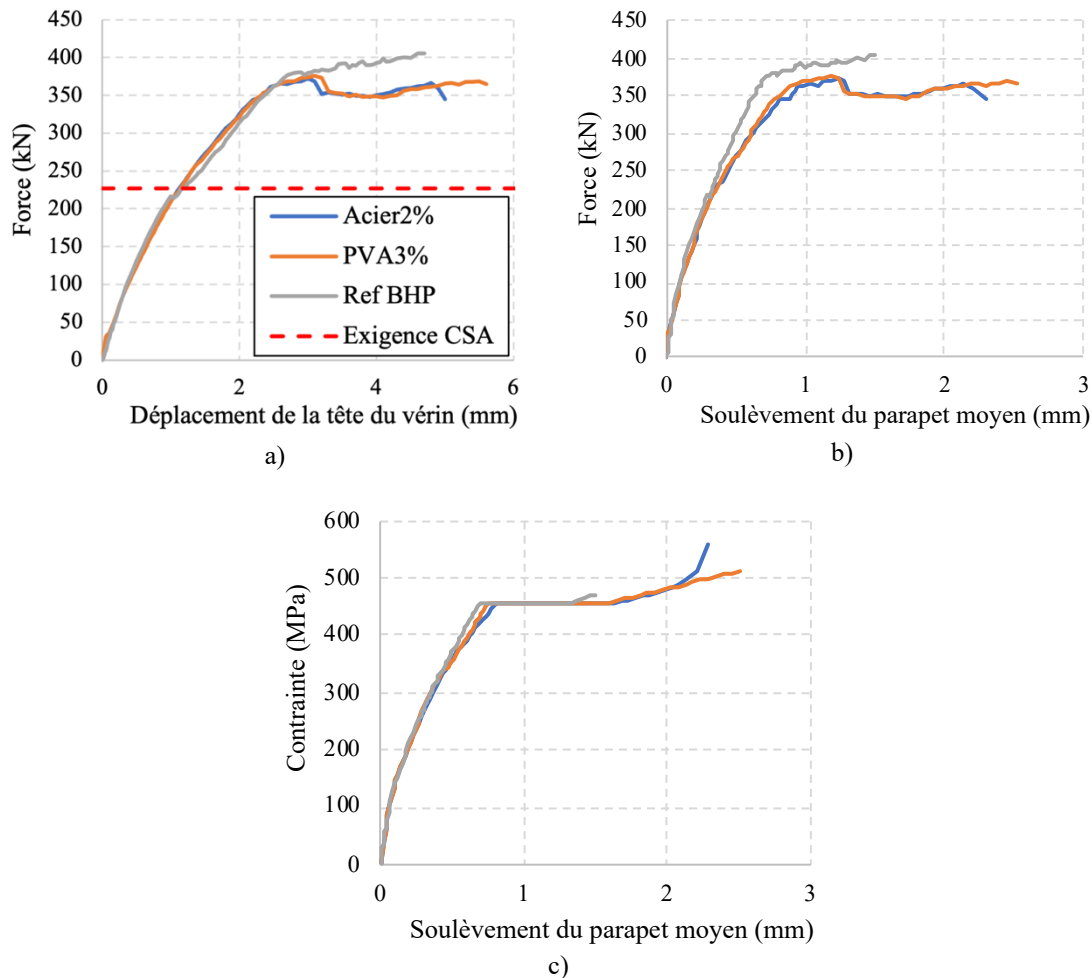


Figure 3-34 Comportement structural des deux parapets, a) Déplacement transversal dans l'axe du vérin selon la force, b) Soulèvement des parapets selon la force, c) Contrainte maximale dans les armatures selon le soulèvement du parapet

3.7.2.2 Fissuration observée

La Figure 3-35 présente le patron de fissuration sur le parapet de référence pour deux niveaux de force, exigence CSA S6-19 (2019) (227 kN) et celle de la plastification des armatures (360 kN). La fissuration est importante pour les deux niveaux de chargement où des fissures de plus de 100 μm sont observées (en turquoise). Des fissures de flexion sont bien visibles au changement de section sur le profil lors de la plastification des armatures pour les parapets en BHP dès l'atteinte du niveau de chargement ultime.

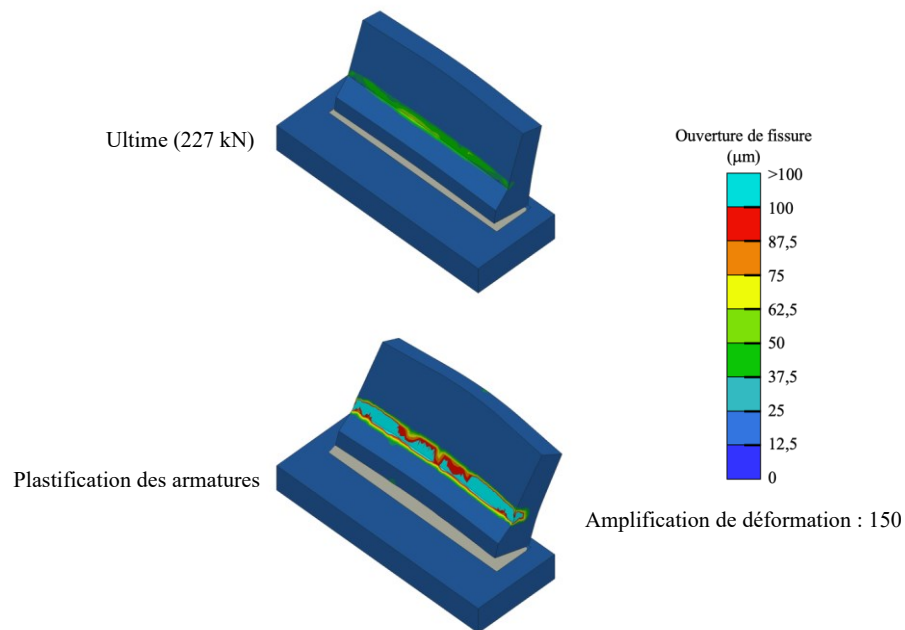


Figure 3-35 Patron de fissuration sur le parapet de référence

La Figure 3-36 présente la fissuration sur le parapet hybride avec la coque en BFUP renforcée de fibres en acier (2%) alors que la Figure 3-37 présente la fissuration sur le parapet hybride avec la coque en BFUP renforcée de fibres en PVA (3%). Les patrons sont présentés à la charge d'impact (ultime, 227 kN) et à la plastification des armatures (340 kN). La fissuration est absente pour toutes les phases de chargement sur les deux coques, ce qui distingue le comportement des parapets avec des coques de celui de référence. Le BFUP, à haute résistance de la coque, évite bien la fissuration à la surface extérieure. En revanche, le cœur en BO (sous la coque en BFUP), présente bien la même fissuration de flexion que le parapet de référence. Cette fissuration est donc bien pontée par la coque en BFUP.

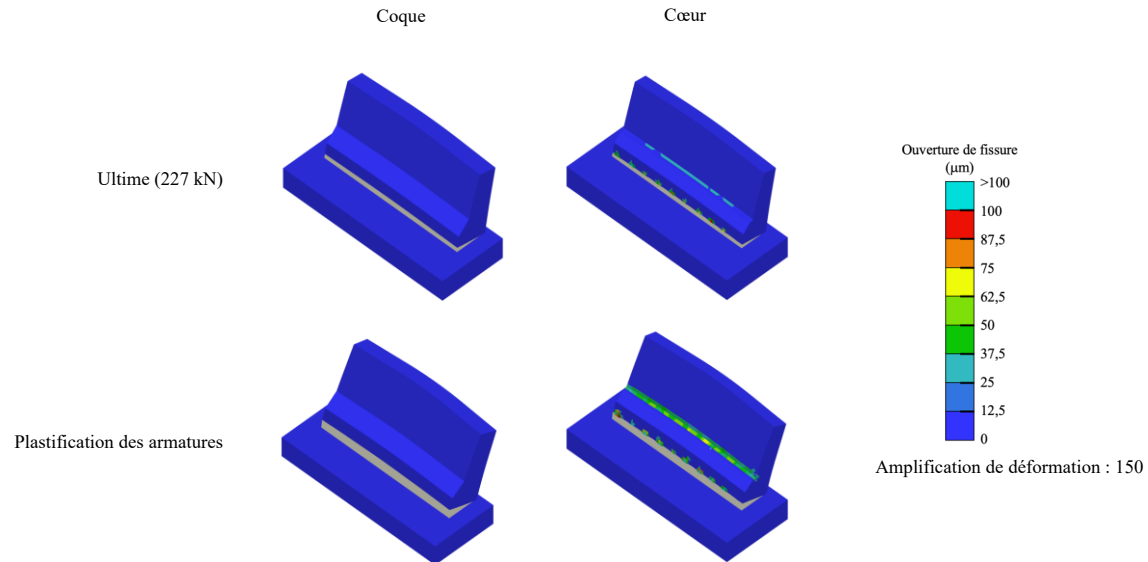


Figure 3-36 Patron de fissuration sur le parapet hybride avec BFUP fibres en acier 2 %

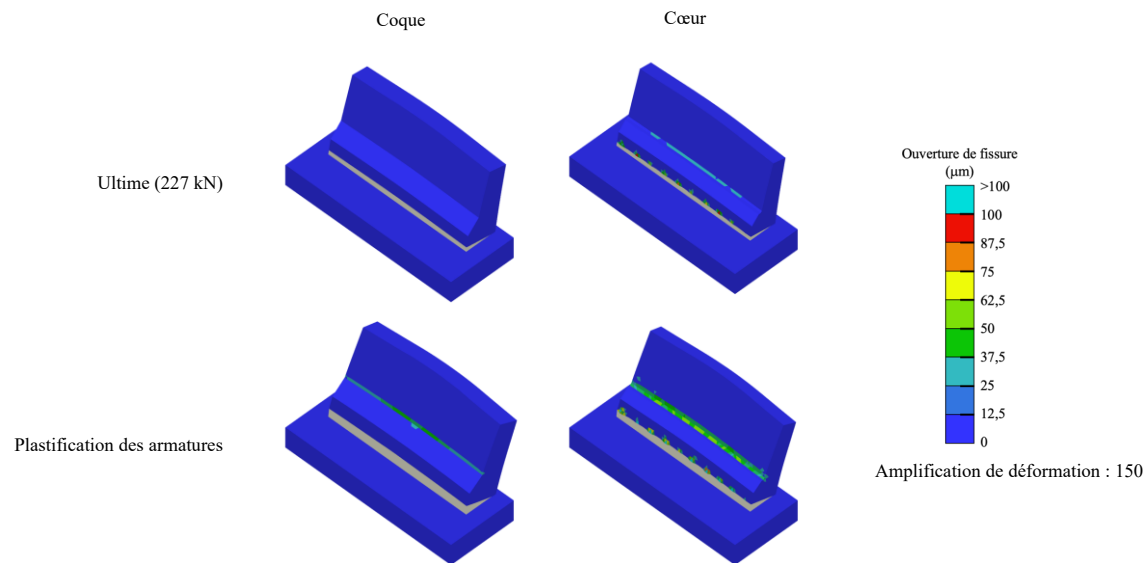


Figure 3-37 Patron de fissuration sur le parapet hybride avec BFUP fibres en PVA 3 %

Il importe de comparer la fissuration en surface des parapets pour avoir un aperçu de leur potentiel de durabilité. La Figure 3-38 présente la fissuration maximale observée en surface des parapets. Pour la charge ultime, la fissuration maximale du parapet de référence est de plus de 0.1 mm alors que celle des parapets avec coques en BFUP est moins de 0.001 mm.

La norme CSA S6-19 (2019) permet une ouverture de 0.25 mm en service pour les éléments non précontraints soumis à des produits de déverglaçage.

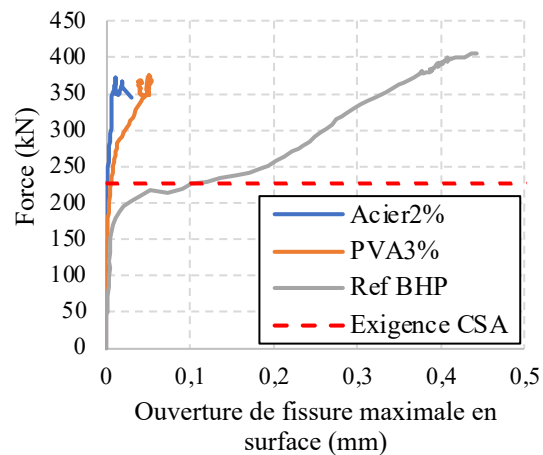


Figure 3-38 Fissuration en surface dans les parapets

Les coques en BFUP offrent donc une excellente protection au béton du cœur et aux armatures tandis que les armatures du parapet de référence ont un niveau de protection inférieur dans le BO avec des ouvertures de fissures plus larges.

3.7.2.3 Comportement des interfaces

Cette section évalue la délamination verticale et la délamination transversale de la coque en BFUP sur le cœur en BO. La Figure 3-39 présente une coupe qui illustre la délamination lors de la plastification des armatures. La délamination observée principalement à la surface avant du parapet est très faible en comparaison au soulèvement. Le léger glissement de la coque sur le cœur modifie un peu la distribution des déformations dans les parapets hybrides et explique pourquoi la plastification des armatures survient à un niveau de charge légèrement inférieur dans les parapets hybrides Figure 3-34c.

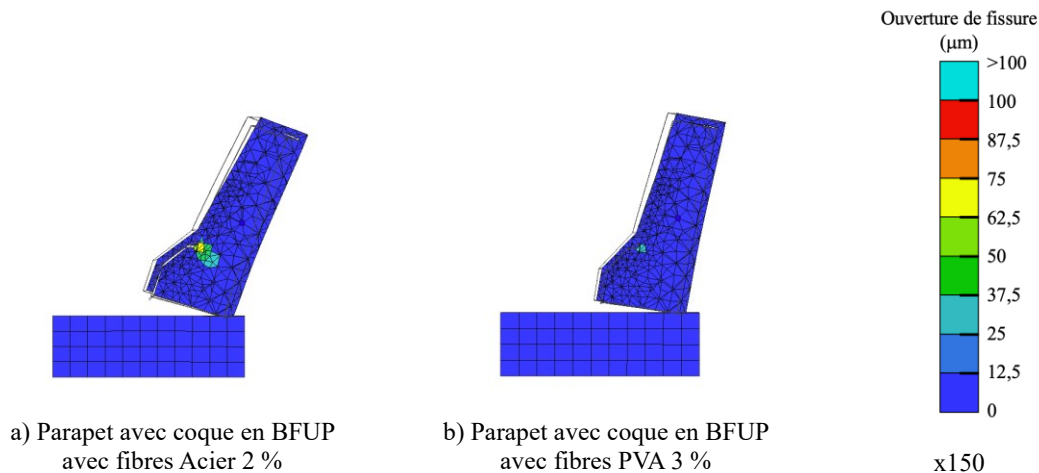


Figure 3-39 Délamination dans les parapets hybrides à la plastification des armatures en conception

La Figure 3-40 présente le déplacement à l'interface à l'avant et sur le dessus dans les différents parapets hybrides selon la force appliquée. Le déplacement est très faible et augmente jusqu'à 340 kN pour atteindre environ 0.1 mm sur la face avant et 0.02 mm sur le dessus. Ce niveau de chargement correspond environ à celui de la plastification des armatures. Ensuite le déplacement augmente rapidement jusqu'à près de 0.4 mm horizontalement et plus de 0.2 mm verticalement. Cela pourrait être dû à la redistribution des déformations à la suite de la plastification des armatures à la face avant du parapet. Le déplacement observé demeure faible avant la charge ultime et à la plastification. Dans l'éventualité où cette déformation devrait être réduite, l'ajout de quelques ancrages ou de petites clés de cisaillement pourrait être introduit dans la coque moyennant un ajout de complexité lors de la fabrication des coques.

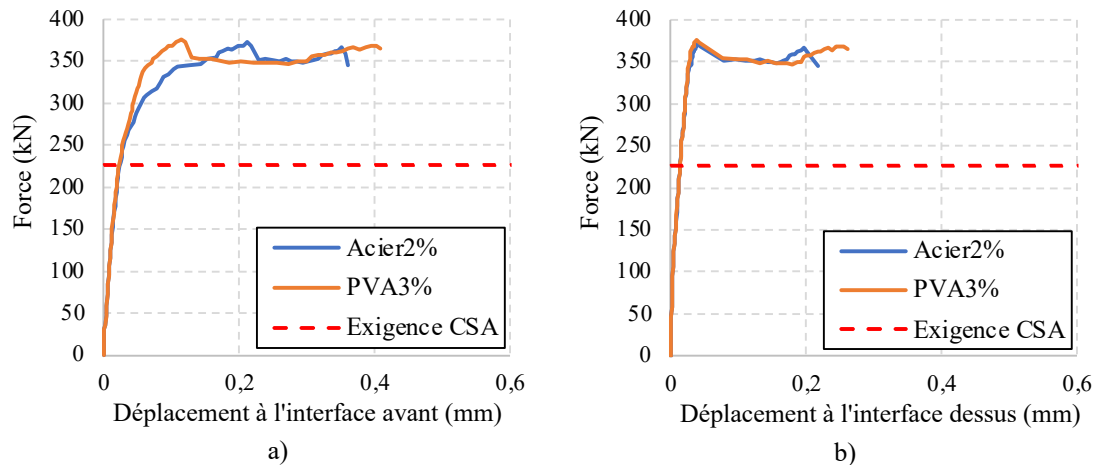


Figure 3-40 Déplacement à l'interface selon la force appliquée sur les parapets hybrides, a) Face avant, b) Dessus

3.7.3 Conclusion

Cette troisième étape de conception permet de conclure que les parapets hybrides ont une résistance supérieure à la résistance exigée par la norme CSA S6-19 (2019) de 227 kN. Les parapets hybrides ont une résistance de 360 kN. La coque en BFUP est fissurée en dessous de 0.1 mm jusqu'à la rupture ce qui permet d'assurer une durabilité améliorée au parapet. La délamination entre la coque et le cœur en BO est inférieure à 0.1 mm à l'ultime (227 kN).

3.8 Synthèse

Cette section présente une synthèse de la conception pour les 3 phases de chargement étudiées.

Pour la phase 1, le retrait restreint du BFUP provoque de la microfissuration dans les coques localisée dans les chanfreins et les extrémités de la coque. Les modèles permettent de conclure que la microfissuration sera inférieure à 0.1 mm pour un retrait libre appliqué de moins de 350 $\mu\text{m}/\text{m}$ et une restrainte de 20 % pour des épaisseurs de coque variant de 20 à 40 mm avec les deux types de BFUP. Les modèles permettent de comprendre l'importance des chanfreins dans les coffrages, notamment dans le moule intérieur, pour réduire la concentration de contraintes et la fissuration. Il faut démouler la coque le plus

tôt possible pour enlever la restrainte et éviter que le retrait libre du BFUP dépasse $350 \mu\text{m/m}$ pendant cette période. Pour confirmer les résultats des modèles, il faut quantifier le retrait libre des BFUP et le retrait effectif des coques en laboratoire.

Pour la phase 2, le remplissage de la coque en BFUP avec du BO provoque une microfissuration non traversante inférieure à 0.1 mm des coques minces de 30 et 40 mm produites avec fibres en acier et fibres en PVA. Pour confirmer les résultats des modèles, il faudrait mesurer les déformations de ces dernières lors du remplissage en laboratoire. Ces mesures dépendront de la maniabilité et de la thixotropie du mélange de BO, de même que l'efficacité de la fixation du coffrage.

À la suite des deux premières phases de conception, l'épaisseur de 30 mm peut être retenue puisqu'elle permet d'éviter l'endommagement trop important des coques lors de la fabrication des parapets hybrides. Des essais d'écoulement de BFUP dans des coffrages de coques à l'échelle réduite menés dans la phase expérimentale ont également indiqué qu'une épaisseur de 30 mm serait adéquate.

La dernière étape de la conception a démontré que le comportement structural général du parapet hybride est comparable à celui d'un parapet de référence en BHP en ce qui concerne la résistance et le mode de rupture. La résistance maximale des parapets hybrides est nettement supérieure à la force de conception pondérée de 227 kN. Comme attendu, la fissuration en surface est moins importante pour les parapets hybrides et demeure très nettement en deçà des valeurs prescrites par le code des ponts. L'interface entre le cœur et la coque du parapet hybride est surtout sollicitée après la plastification des armatures sur la face avant inclinée où on observe une légère délamination. Il faut investiguer le comportement réel en laboratoire de l'interface pour conclure si un lien mécanique entre la coque et le cœur doit être considéré en chantier.

CHAPITRE 4 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Ce chapitre porte sur tous les travaux effectués au laboratoire de structures et est divisé en trois parties. Premièrement, le chapitre présente les résultats d'une campagne expérimentale préliminaire portant sur la caractérisation des BFUP renforcés de fibres en acier et de fibres en PVA et permettant de produire les premiers modèles éléments finis présentés au chapitre précédent. Cette campagne incluait aussi des essais d'écoulement avec du BFUP dans des coffrages de forme complexe pour effectuer des choix éclairés pour la conception. Ce chapitre présente ensuite la production des parapets et décrit les enjeux et les défis liés à la fabrication de coques minces en BFUP. Finalement, la campagne expérimentale finale est décrite. Elle porte sur la caractérisation de tous les bétons du projet et sur les vérifications expérimentales reliées aux trois phases de conception.

4.1 Programme expérimental préliminaire

Il est essentiel de mener une campagne expérimentale préliminaire pour ce projet pour deux raisons. Premièrement, le BFUP renforcé avec fibres en PVA est un matériau qui n'a pas encore été étudié à Polytechnique. Il faut donc caractériser le matériau pour connaître son comportement en traction. Deuxièmement, la forme complexe du coffrage de la coque en BFUP pose aussi un défi. En effet, il faut déterminer quelle est la manière la mieux adaptée pour assurer son remplissage complet et faire le choix de l'épaisseur de la coque. Des essais d'écoulement ont été réalisés pour ces vérifications.

4.1.1 Caractérisation préliminaire des BFUP

Les essais en compression (f'_c) sur les BFUP sont réalisés avec des spécimens cylindriques de 75 mm de diamètre (ASTM-C39, CSA A.23.1 - Annexe U). La détermination du module élastique (E_c) et du coefficient de Poisson (ν) est réalisée avec des spécimens de 100 mm de diamètre (ASTM-C469).

Le Tableau 4-1 présente les propriétés en compression des BFUP testés. Le coefficient de Poisson (ν) est près de 0.2 pour tous les bétons. La résistance à la compression des BFUP avec des fibres en PVA est légèrement inférieure à celle des spécimens avec des fibres en

acier, mais toutes les valeurs sont supérieures à 120 MPa pour être considérées comme des BFUP selon le code CSA-S6 :19.

Tableau 4-1 Propriétés des BFUP mesurées dans la caractérisation préliminaire en compression

	2 jours		28 jours	
	f_c (MPa)	E_c (MPa)	f_c (MPa)	E_c (MPa)
PVA 2%	82	31 000	122	39 000
PVA 3%	80	32 000	121	40 000
Acier 2%	89	33 000	133	44 000

La campagne expérimentale sur le BFUP est menée à deux échéances. Le BFUP est testé en compression (f_c , E_c et ν) et en traction directe (f_t) à 2 et à 28 jours. Les essais à 2 jours permettent de connaître le comportement au jeune âge des BFUP notamment pour résister au retrait restreint. Les essais à 28 jours sont les essais à échéance habituelle qui permettent d'estimer le comportement au long terme des BFUP.

La résistance à la traction directe est mesurée sur des os (Beaurivage, 2009) et des tirants 100x50 mm en traction directe (Figure 4-1). L'avantage des tirants est qu'il n'y a pas de changement de section. Le changement de section est problématique puisque la fissuration se produit souvent à cet endroit, ce qui n'est pas optimal. Les os sont quand même inclus dans la caractérisation puisqu'ils sont testés pour plusieurs BFUP de différents projets afin de pouvoir les comparer.

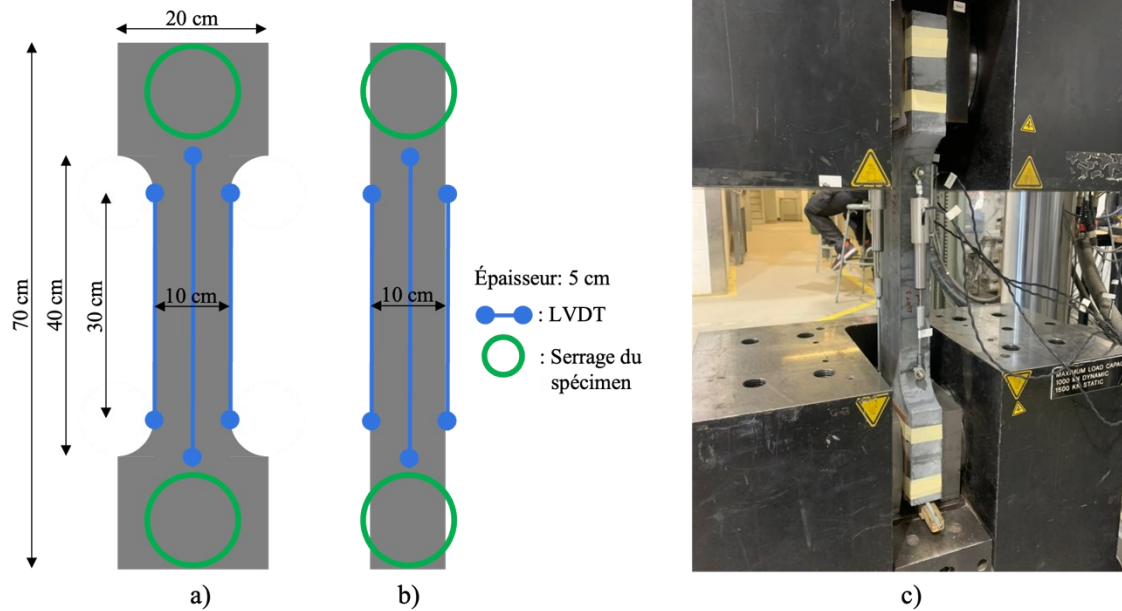


Figure 4-1 Spécimens de traction directe, a) Os, b) Tirant 50 x 100 mm, c) Montage de test

La campagne de caractérisation doit être effectuée sur le BFUP avec fibres en acier. Bien que le matériau soit bien connu, un changement dans la composition demande une validation des caractéristiques mécaniques.

Le premier mélange testé est un BFUP avec 2 % de fibres en acier. La Figure 4-2 illustre le comportement en traction des spécimens testés à 2 et à 28 jours. La résistance de la matrice est de 3.7 et 5.5 MPa alors que la contrainte maximale dans le BFUP avec fibres en acier est de 5.4 et 7.9, respectivement à 2 et 28 jours. La déformation à la fin du prépic est respectivement de 1200 et 1800 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour ces deux échéances. Pour qu'un béton puisse être considéré comme un BFUP écrouissant, la norme CSA S6-19 (2019) recommande une contrainte maximale 10 % plus grande que la résistance à la fissuration de la matrice et une déformation au pic supérieure à 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$. Le BFUP avec fibres en acier a une contrainte maximale 43 % plus grande que la résistance de la matrice et une déformation correspondante de 1800 $\mu\text{m}/\text{m}$ ce qui en fait bel et bien un BFUP écrouissant selon la norme des ponts.

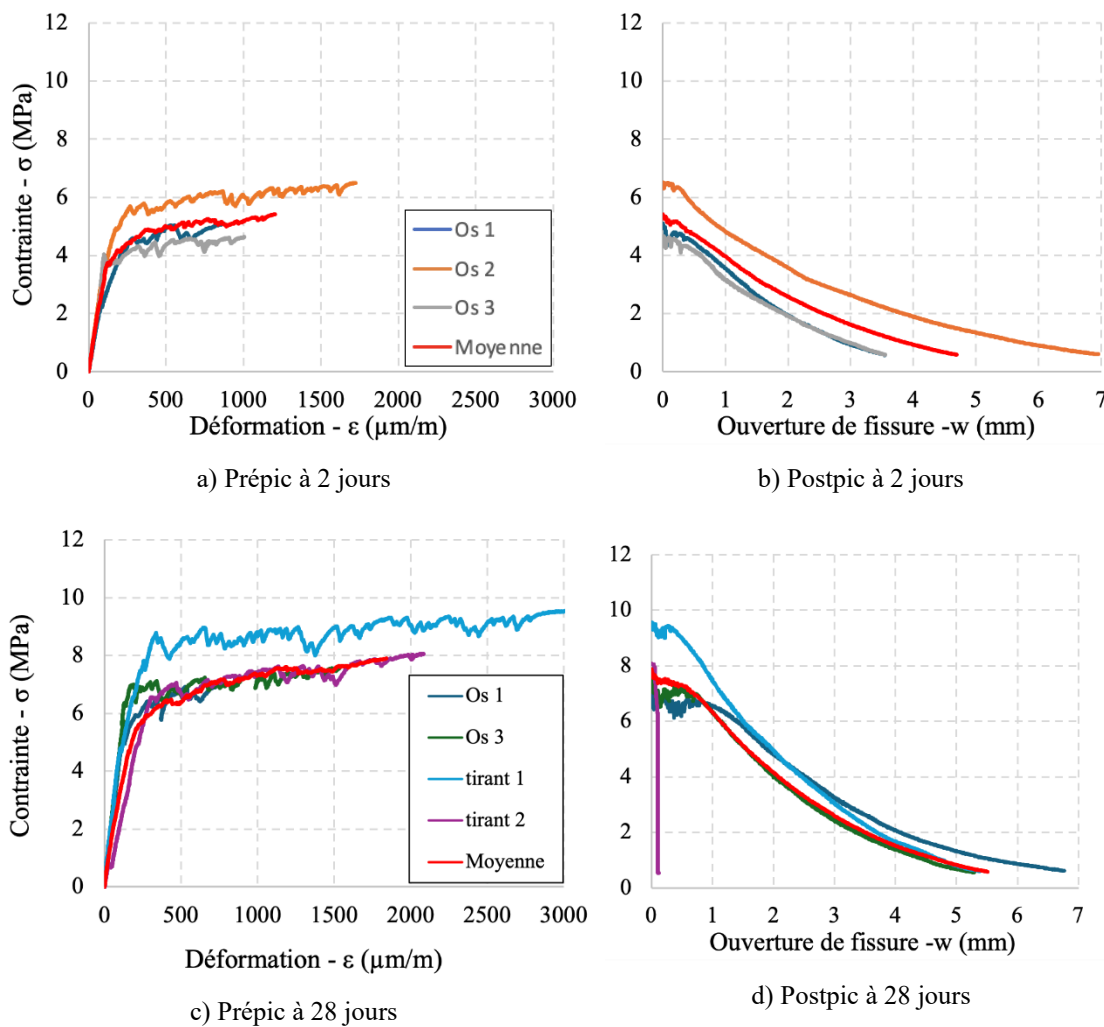


Figure 4-2 Comportement en traction du BFUP avec 2 % de fibres en acier

Le deuxième mélange testé est un BFUP avec 2 % de fibres en PVA. La Figure 4-3 illustre le comportement en traction des spécimens testés à 2 et à 28 jours. Le comportement prépic se termine lors de la première chute de charge à environ 100 $\mu\text{m/m}$ à 2 jours et à 150 $\mu\text{m/m}$ à 28 jours pour des contraintes respectives de 2 et 6 MPa. Cependant, plusieurs courbes prépic à 28 jours se terminent à 2 MPa. Il est probable que le contrôle de la fissuration soit plus difficile à capter lorsque la résistance de la matrice est atteinte avec les fibres en PVA. Ceci soulève aussi la possibilité que ce matériau ne soit pas écrouissant. Pour vérifier cette hypothèse, un BFUP avec 3 % de fibres en PVA sera testé.

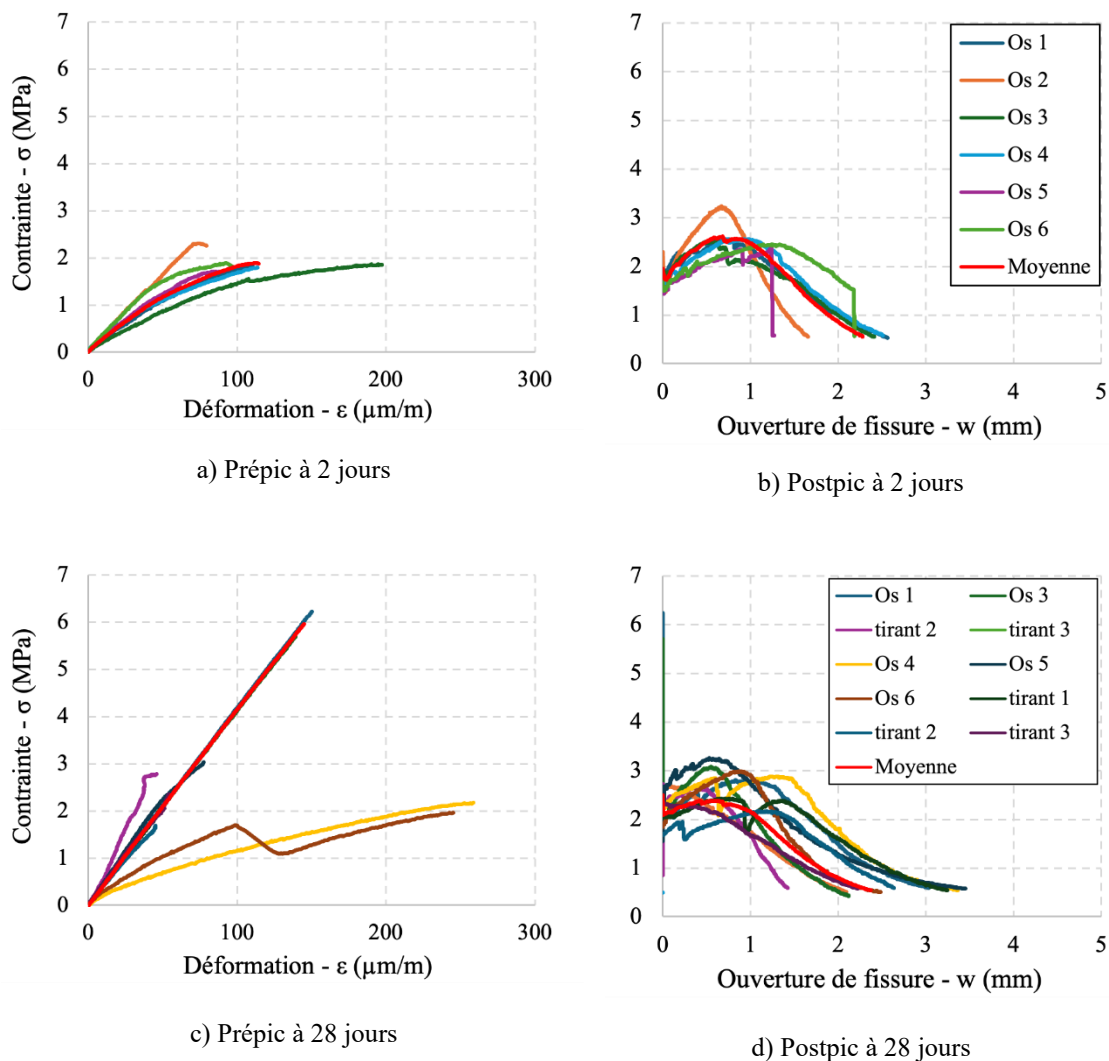


Figure 4-3 Comportement en traction du BFUP avec 2 % de fibres en PVA

La Figure 4-4 présente le comportement en traction du BFUP avec 3 % de fibres en PVA à 2 et 28 jours. La résistance en traction est similaire et parfois inférieure à celle du même BFUP 2 % de fibres. Le prépic ne semble pas être bien obtenu puisque les spécimens semblent plus fragiles. Ceci est très surprenant, car le dosage en fibres devrait améliorer le contrôle de la fissuration. Ceci semble indiquer que la procédure de chargement du BFUP avec fibres en acier n'est pas adaptée à ce BFUP avec fibres en PVA et ne capte possiblement pas toujours l'ensemble du comportement prépic. Pour le programme de caractérisation final, la vitesse de chargement sera réduite de 0.1 mm/min à 0.02 mm/min

en prépic pour caractériser le BFUP avec fibres en PVA en traction. Afin de confirmer le comportement en traction du BFUP avec fibres synthétiques, le taux de chargement en prépic sera ralenti et un SIC sera utilisé pour ces essais afin de vérifier l'évolution de la fissuration. L'évolution de la fissuration mesurée avec le SIC permettra de conclure si le matériau est écrouissant et adoucissant.

Pour les modèles numériques, la loi est modifiée pour être linéaire jusqu'à la résistance de la matrice et le comportement postpic mesuré est conservé (Figure 3-10).

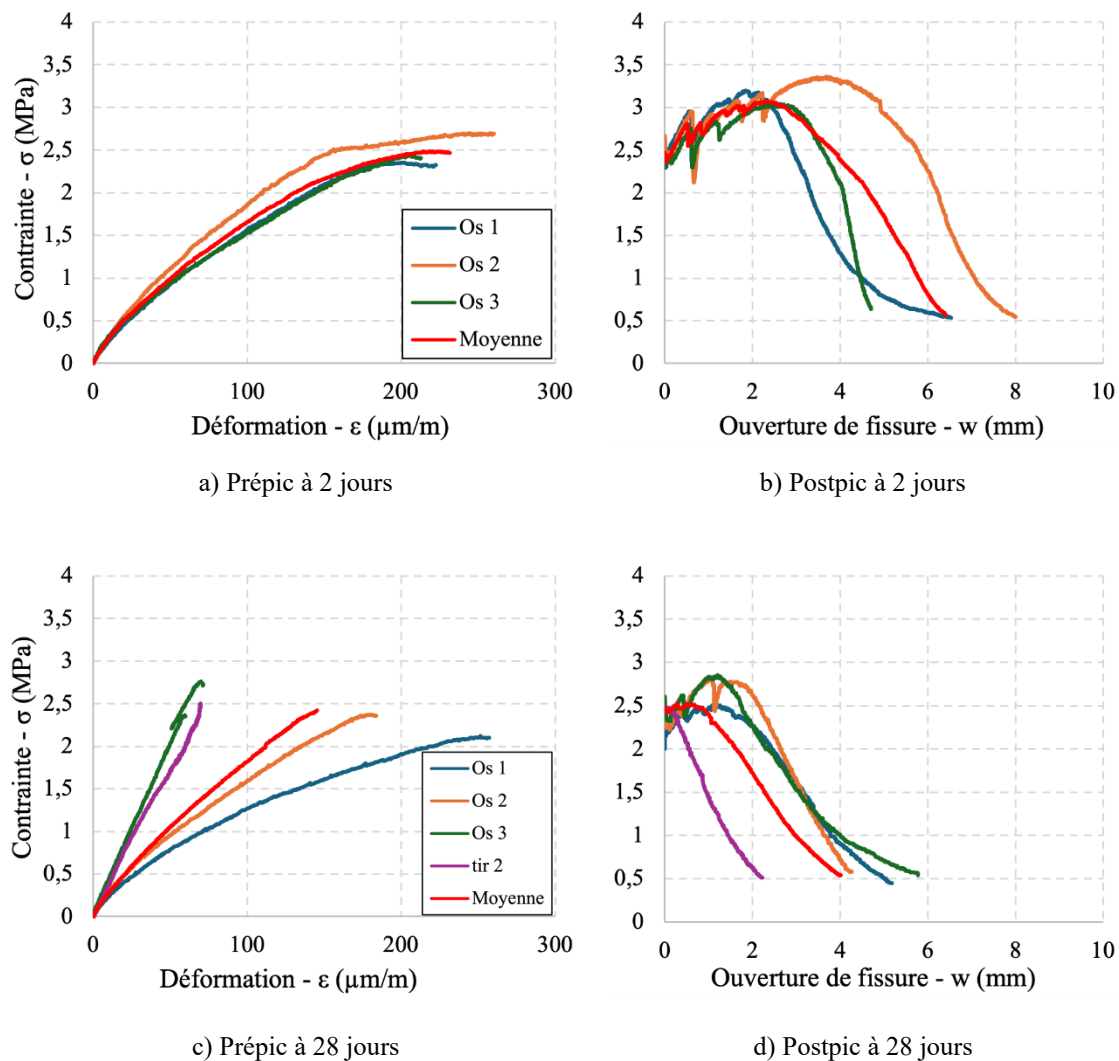


Figure 4-4 Comportement en traction du BFUP avec 3 % de fibres en PVA

Le Tableau 4-2 présente un résumé des déformations et des contraintes pour chaque BFUP aux deux échéances.

Tableau 4-2 Propriétés des BFUP mesurées dans la caractérisation préliminaire en traction

	2 jours		28 jours	
	f_{tu} (MPa)	ε_{tu} ($\mu\text{m/m}$)	f_{tu} (MPa)	ε_{tu} ($\mu\text{m/m}$)
PVA 2%	2.0	100	6.0	150
PVA 3%	2.5	200	2.4	150
Acier 2%	5.4	1200	7.9	1800

4.1.2 Essais d'écoulement

Étant donné la complexité du coffrage de la coque en BFUP, une étude préliminaire de remplissage a été réalisée pour vérifier la faisabilité de remplissage. Le matériau est visqueux et risque de bloquer dans le coffrage s'il est trop étroit. Il faut aussi s'assurer que la coque n'ait aucun vide de remplissage ou oursins de fibres apparent et que les surfaces aient un bon fini de surface. Les parties de coques produites sont des segments de 200 mm représentant le centre ou l'extrémité du parapet (Figure 4-5).

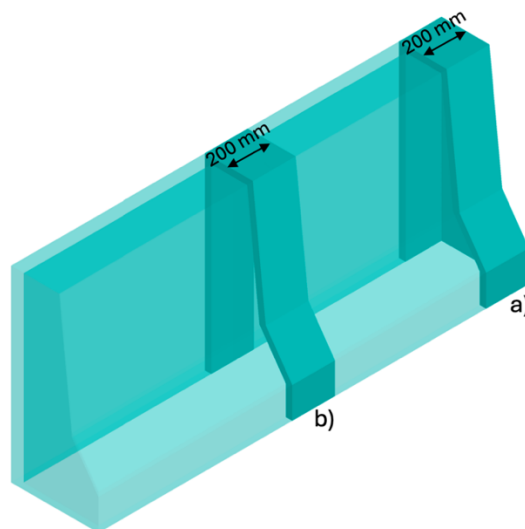


Figure 4-5 Segment de coque fabriqué a) extrémité, b) milieu

Le coffrage utilisé pour faire les coques est représenté à la Figure 4-6a. Le coffrage est ici inversé, c'est-à-dire que la base du parapet est vers le haut. Les coques avaient un petit rebord à cette étape de conception (Figure 4-6b), puisqu'il était prévu de les fixer à cet endroit. Le petit rebord facilitait la coulée. Certaines vérifications ont été faites avec une coulée dite normale où la coque est remplie par la surface supérieure de la coque. Le Tableau 4-3 illustre les particularités des quatre segments de coques fabriquées à l'échelle.

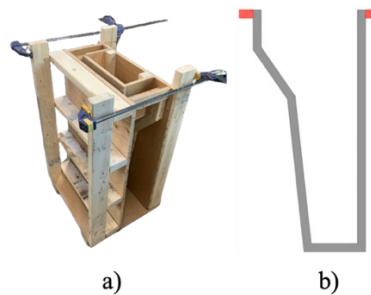


Figure 4-6 Remplissage des segments de coque, a) Coffrage utilisé pour les essais d'écoulement, b) Coque avec rebord en rouge

Tableau 4-3 Particularités des segments de coques fabriqués à l'échelle

coque	épaisseur mm	segment -	coulée -	Étalement du BFUP ¹ mm
a	30	extrémité	inversée	285
b	20	milieu	inversé	260
c	20	milieu	normal	230
d	20	milieu	normal	260

¹ : essai au mini-cône

La Figure 4-7 présente une photo de chaque coque coulée, un schéma du mode de coulée et de la section produite et enfin l'épaisseur de la coque. Dans la Figure 4-7a, la coque de 30 mm produite de manière inversée est bien remplie notamment puisque le BFUP peut bien se déplacer d'une face à l'autre. Dans la Figure 4-7b, la coque s'est remplie partiellement d'un côté. L'intérêt de remplir les coques d'un seul côté est de favoriser l'écoulement dans une seule direction, ce qui a comme effet d'améliorer l'orientation des fibres dans le sens de l'écoulement. La coque n'est pas remplie au complet ce qui démontre que si l'écoulement se fait seulement d'un côté, le BFUP ne traverse pas facilement de

l'autre côté. La Figure 4-7c, montre une coque de 20 mm remplie par le dessus. Le moule se remplit bien, mais la surface n'est pas très lisse et beaucoup de bulles d'air sont présentes sur la surface extérieure de la coque. Le moule de la coque n'était pas bien placé et l'étalement du BFUP était faible, de sorte qu'il a été décidé de fabriquer une dernière coque. Ainsi, la Figure 4-7d montre la dernière coque de 20 mm remplie par le dessus. Le moule est bien rempli, mais la surface comporte encore quelques bulles d'air.

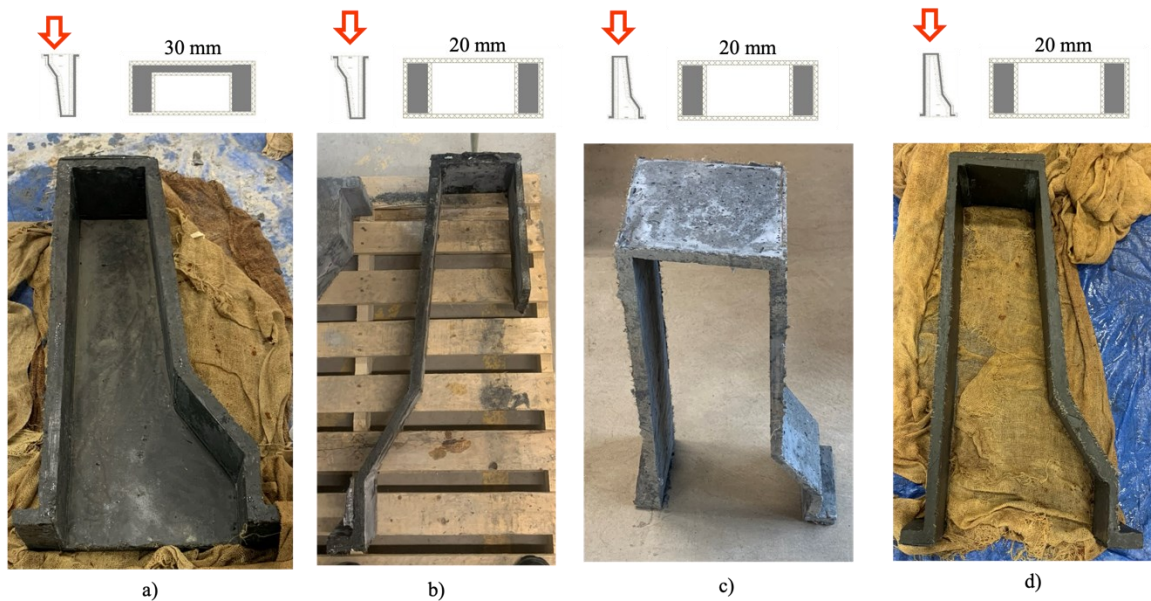


Figure 4-7 Photos de chaque coque coulée

La Figure 4-8 présente les bulles d'air présentes sur la surface du coffrage de la Figure 4-7d. La solution à ce problème serait d'appliquer un agent de démoulage. Une autre solution serait d'ajouter une membrane de décoffrage qui permettrait à l'air de sortir du coffrage plus facilement et d'avoir une meilleure finition. Un contre-plaqué de coffrage plus lisse ou mieux huilé pourrait aussi aider. Les coques de 30 mm, plus épaisses, avaient une surface avec moins de bulles de remplissage.



Figure 4-8 Bulles d'air présentes sur la surface du dernier segment de coque coulé

Les coques de 20 mm sont réalisables, mais elles doivent être remplies par le dessus et elles nécessitent quelques corrections afin d'améliorer la finition de surface. Cependant, pour favoriser l'interface entre le BO du cœur coulé dans la coque, il faut prévoir une façon d'ajouter une texture sur l'intérieur de la coque qui est très lisse et sur laquelle le béton frais risque de ne pas se lier suffisamment. L'ajout d'une texture réduit l'épaisseur initiale de la coque. Donc, la difficulté de remplissage et l'ajout d'une texture mènent donc au choix d'une section de coque de 30 mm d'épaisseur.

Quelques options se présentent pour créer une texture sur l'intérieur des coques en BFUP. Une membrane de décoffrage texturée qui pourrait être enlevée au coffrage et favoriserait l'adhérence entre le deux bétons. Une autre option serait d'appliquer un retardateur de prise sur le moule intérieur des coques. Dès que le BFUP est assez résistant, le moule intérieur est retiré et un jet d'eau sous pression est appliqué pour enlever une mince couche de pâte et exposer le sable et les fibres. Ceci permet d'avoir une surface rugueuse sur laquelle le béton peut s'accrocher. La Figure 4-9 illustre ce concept, les fibres exposées ajoutent assez de rugosité.

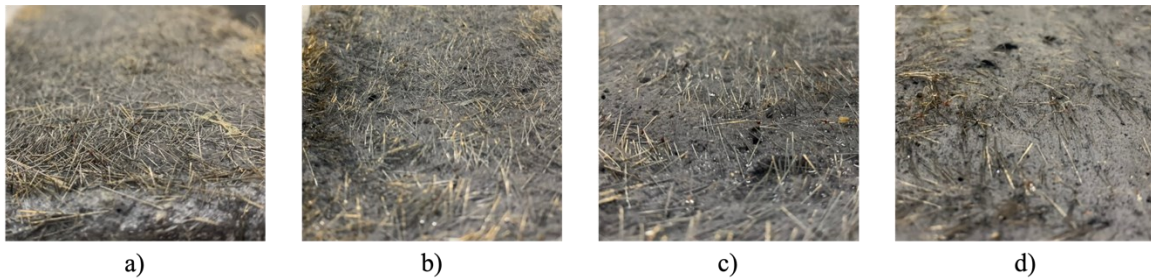


Figure 4-9 Surfaces avec fibres exposées après, a) 22 h, b) 24 h, c) 26 h, d) 28 h depuis la coulée

La surface préparée avec le retardateur de prise est facile à mettre en œuvre, c'est donc la solution retenue. Puisqu'une épaisseur de 1 à 2 mm de BFUP est enlevée avec le nettoyage du retardateur, la sélection précédente d'une coque de 30 mm est bel et bien le bon choix.

La méthode de coulée inversée est également retenue. En effet, elle permet d'avoir accès à l'intérieur de la coque afin d'enlever le moule intérieur rapidement après la prise du BFUP pour atténuer la restrainte du retrait du BFUP. L'accès à l'intérieur de la coque permet aussi d'appliquer le jet d'eau sous pression pour créer la surface avec fibres exposées. La coque pourra ensuite être retournée du bon côté dès que sa résistance le permet.

4.2 Production des parapets

La suite du projet consiste à fabriquer et tester les parapets hybrides sur une dalle de pont réduite. Cette section aborde d'abord les plans préparés et envoyés en production à l'usine de préfabrication. Par la suite, la fabrication des coques est abordée avec des commentaires sur les difficultés rencontrées et les solutions trouvées. Finalement, la coque en BFUP est remplie avec le BO comme prévu en chantier.

4.2.1 Plans préparés

Les moules de la coque en BFUP seront produits par BPDFL et le BFUP sera fabriqué et coulé au laboratoire de Polytechnique Montréal. La dalle sera produite par BPDR. Tous les plans préparés sont présentés à l'Annexe B.

La Figure 4-10 et la Figure 4-11 présentent le plan général des coques. La coque a trois trous sur la surface supérieure pour le remplissage de béton en chantier. Une surépaisseur est ajoutée à l'endroit où sera placée la jauge de retrait.

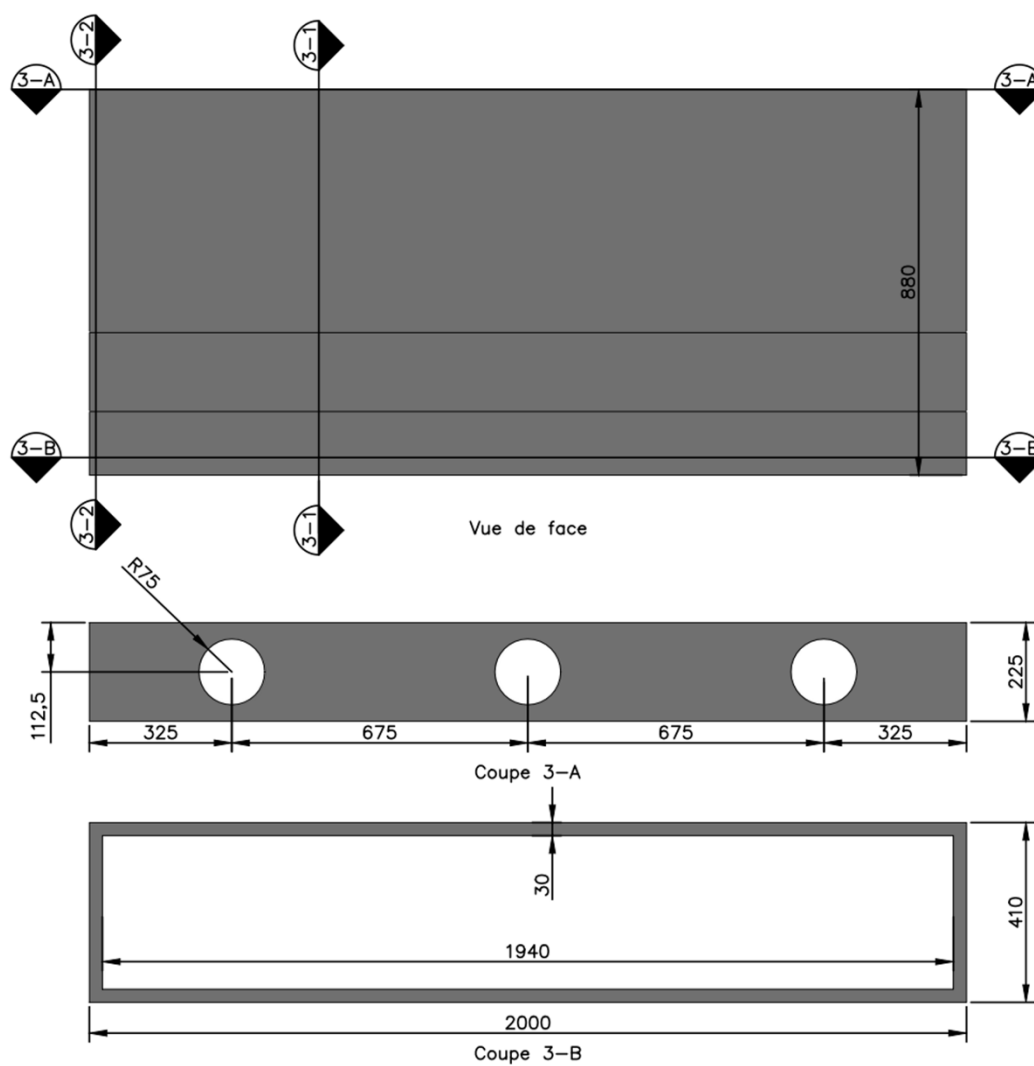


Figure 4-10 Vue de la coque de face avec les dimensions extérieures et intérieures

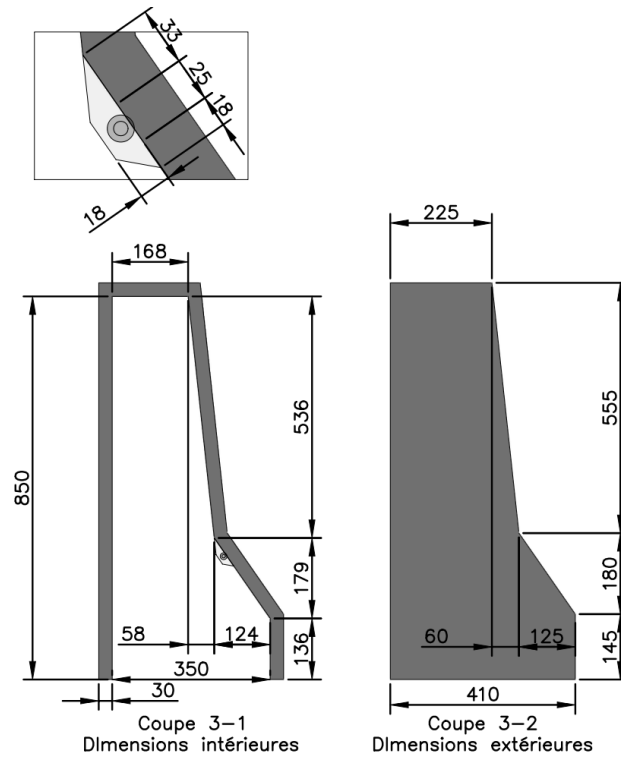


Figure 4-11 Vue de la coque de côté avec les dimensions extérieures et intérieures et la position du capteur SOFO

La Figure 4-12 présente la dalle avec armatures en attente. Une préparation de surface rugueuse est demandée à l'endroit où sera coulé le cœur en BO afin de favoriser l'adhérence du béton du cœur à la dalle.

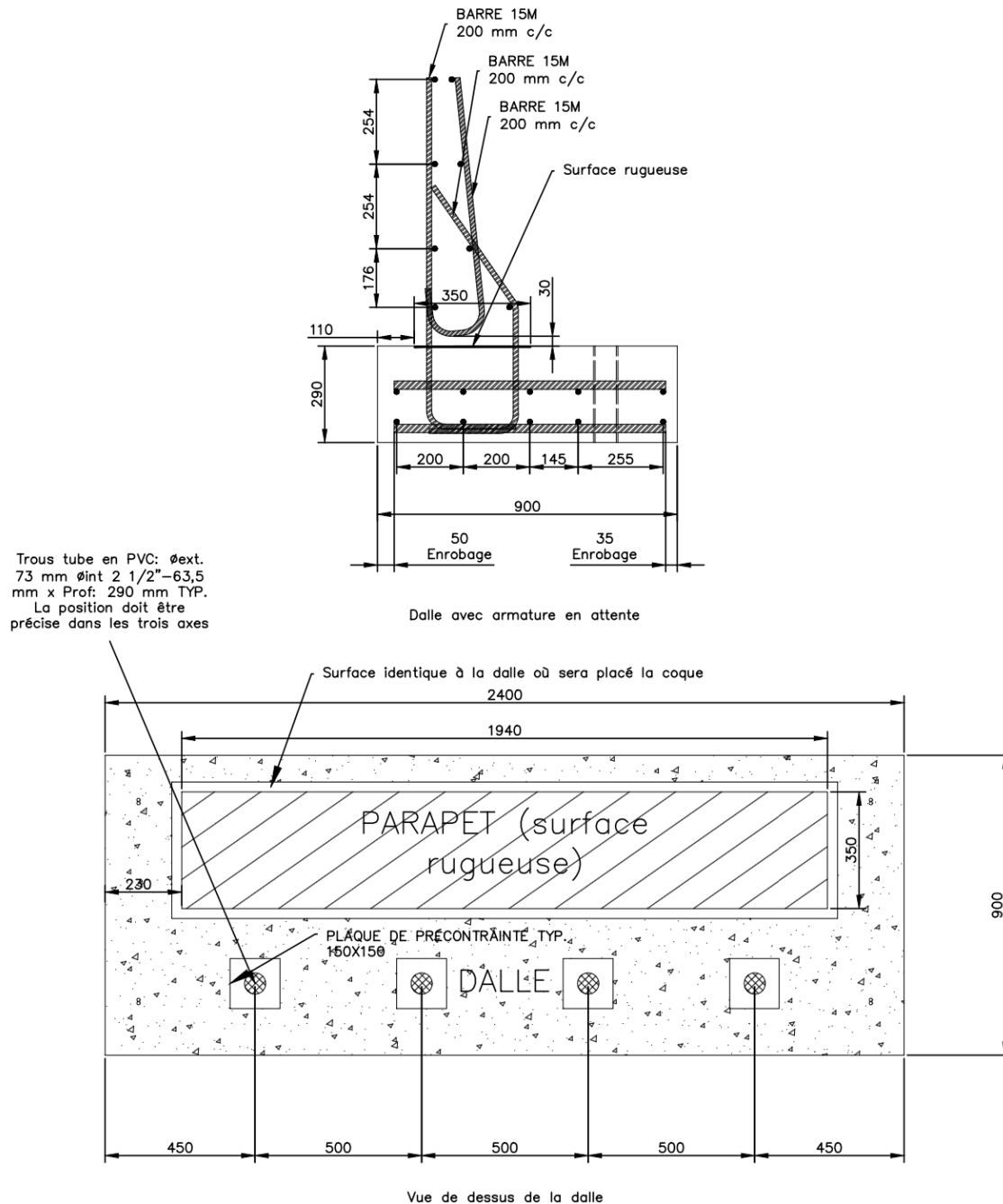


Figure 4-12 Dalle avec armature en attente

La Figure 4-13 présente les dalles avec armature en attente fabriquées par BPDR. Chaque dalle mesure 2.4 m par 0.9 m et 0.29 m de hauteur.



Figure 4-13 Dalle fabriquée à BPDR

Quelques ajouts ont été apportés à la coque en BFUP pour faciliter la production et permettre d'insérer de l'instrumentation pour les essais. D'abord, des trous ont été prévus dans la coque afin de pouvoir la remplir avec le BO en chantier (Figure 4-14). Les trois ont un diamètre de 150 mm et ils sont espacés de 675 mm. Le béton sera rempli par le trou central alors que les autres trous servent à voir si le béton remplit bien la coque, pour vibrer le béton et ajouter du béton si le trou central est plein, mais pas le parapet. Le BO du cœur devrait être un béton autoplaçant qui devrait remplir la coque sans trop de difficultés et les trois trous prévus devraient être suffisants.

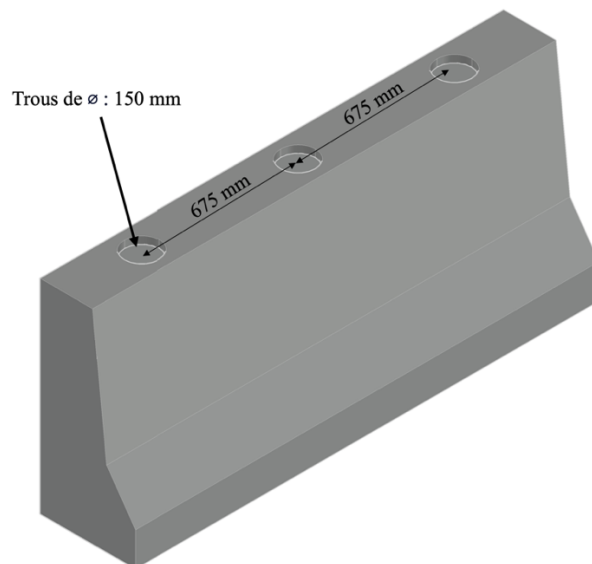


Figure 4-14 Trous prévus dans la coque pour le remplissage

BPDL prévoit ajouter un chanfrein d'un demi-pouce dans les coins pour diminuer la concentration de contraintes dues au retrait et faciliter le démoulage dans le coffrage central et extérieur.

Un autre ajout est un changement dans la géométrie afin de pouvoir couler une fibre optique (Figure 4-15) dans le BFUP et mesurer son retrait restreint. La fibre optique a un diamètre variant de 8 à 15 mm par rapport à l'épaisseur de la coque de 30 mm. Ainsi une surépaisseur locale sera prévue à l'endroit où la fibre sera placée pour éviter de bloquer le flux de BFUP lors du remplissage ou encore pour créer une zone de faiblesse dans la coque. La fibre optique sera placée au changement de profil dans la face avant du parapet. Cet emplacement permet de démouler le moule central sans complexifier le coffrage. L'avantage de la fibre optique SOFO est qu'elle est composée de deux brins de fibres optiques, un tendu et l'autre libre. La fibre permet de mesurer l'effet de la variation de la température sur l'équipement qui peut être ensuite automatiquement retirée de la mesure de la fibre tendue.

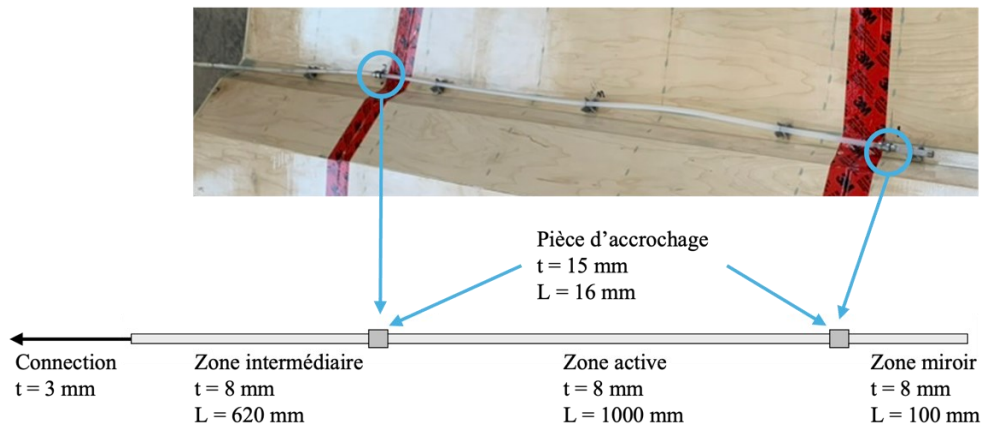


Figure 4-15 Fibre optique SOFO fixée sur le moule intérieur de la coque en BFUP

4.2.2 Fabrication des coques

La Figure 4-16 illustre le coffrage fabriqué par BPDFL pour la production de la coque. Le coffrage est rigide pour être retourné avec la coque en BFUP sans l'endommager. Le moule extérieur est en acier et le moule intérieur est en bois et démontable en trois morceaux pour être enlevé plus facilement au démoulage.

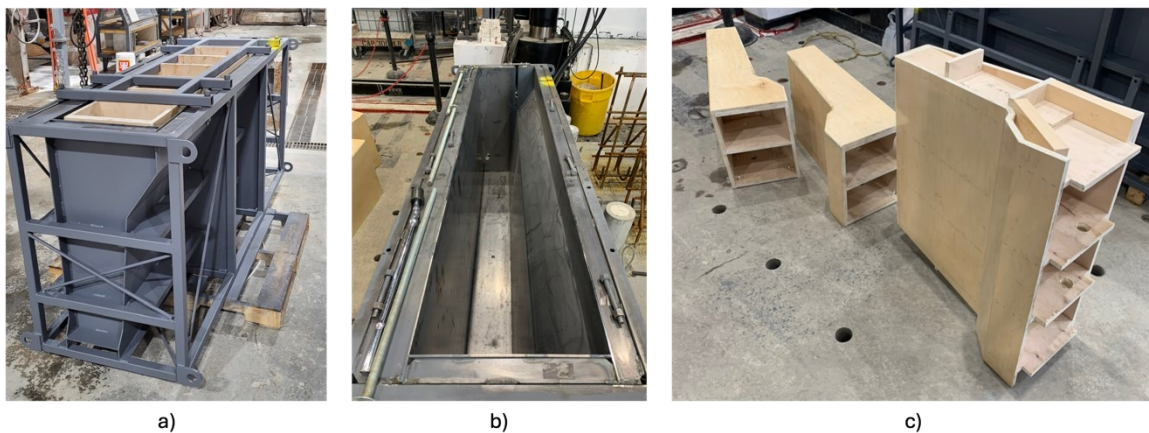


Figure 4-16 Coffrage utilisé pour couler les coques en BFUP, a) Vue assemblée, b) Moule extérieur en acier, c) Moule intérieur démontable en bois

Trois coques sont fabriquées au laboratoire. Le décoffrage des coques s'est avéré être une tâche très ardue. Une première coque est produite, mais lors du démoulage, celle-ci était très difficile à retirer du coffrage. Pour cette raison, le moule intérieur en bois est retiré

après 48 heures. Le délai pour enlever le retardateur de prise était dépassé. Le moule extérieur en acier a aussi été très difficile à enlever et la coque a été endommagée lors du retrait du moule. La coque produite est jugée inadéquate pour les essais et le coffrage est renvoyé à l'usine BPDFL pour ajustement. Ensuite, deux autres coques ont été produites avec succès au laboratoire pour le programme expérimental. Ces deux coques ont été installées sur les deux dalles avec armatures en attente et testées ultérieurement au laboratoire.

4.2.2.1 *Étapes de fabrication des coques en BFUP*

La fabrication des coques commence par la préparation du moule. Le retardateur de prise (« Concrete Surface Retarder F » de Euclid) est appliqué sur le moule en bois (Figure 4-17). Le retardateur est toxique et crée des vapeurs inflammables. Le produit est donc appliqué dans une salle de peinture avec une très bonne ventilation et les personnes qui appliquent le produit doivent avoir les équipements de protection individuels appropriés. Le moule en bois est laissé dans la salle de peinture avec la ventilation pendant une nuit pour laisser le produit sécher et il est retourné au laboratoire pour les prochaines étapes de préparation.



Figure 4-17 Moule en bois avec le retardateur de prise

Le moule extérieur en acier est ensuite huilé. La jauge SOFO est fixée sur le coffrage intérieur en bois et une jauge « TML » est aussi utilisée pour mesurer le retrait restreint et comparer avec la jauge SOFO.

Par la suite le coffrage est assemblé (Figure 4-16a). Les pièces du moule intérieur en bois sont vissées sur le moule extérieur en acier et vissées avec un cadre en acier.

Le remplissage du moule avec le BFUP se fait en deux gâchées. En effet, le malaxeur du laboratoire peut produire 140 litres, alors que la coque a un volume de 130 L et les spécimens de caractérisation ont un volume de 70 L alors qu'il faut considérer des pertes de 20 % pour un total de 240 L (Tableau 4-4).

Tableau 4-4 Volume de BFUP pour fabriquer une coque

Élément	Nombre	Volume unitaire L	Volume total L
Coque 30 mm	1	130.00	130.00
Cylindres 75 mm	9	0.68	6,12
Cylindres 100 mm	3	1.62	4,86
Tirants 50 x 50 mm	6	1.75	10.50
Os	6	7.00	42.00
Spécimen retrait libre	1	0.12	0.12
Spécimens état frais	1	5.00	5.00
Total (sans les pertes)			200.00
Pertes (20 %)			40.00
Total (avec perte)			240.00

Le moule intérieur de la coque est retiré le plus tôt possible. En théorie, dès que le BFUP a eu sa phase d'échauffement maximal (environ 10 heures), le moule intérieur devrait être retiré. Cependant, au laboratoire, les horaires de travail permettent de retirer le moule après au minimum 18 heures. Par la suite, le jet d'eau sous pression est appliqué sur la surface intérieure de la coque avec retardateur de prise pour créer la surface rugueuse. La coque est ensuite mise en cure humide avec des tissus de jute imbibés d'eau pendant 5 jours.

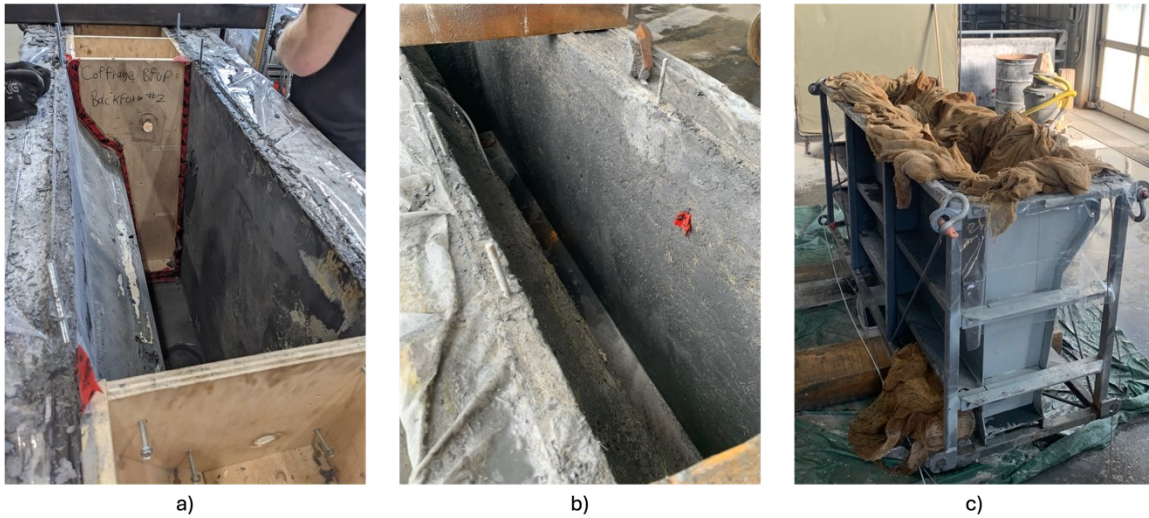


Figure 4-18 Étapes de production de la coque, a) Démoulage du moule intérieur, b) Surface rugueuse, c) Cure

Une fois la cure terminée, la coque est retournée. Le coffrage est suffisamment rigide pour ne pas endommager la coque durant cette opération.



Figure 4-19 Procédure de retournement de la coque

Dès que la coque est retournée, le moule extérieur est enlevé. Par la suite, la coque est remise en cure afin d'avoir une cure totale de 7 jours.

4.2.2.2 Fabrication de la coque 1

La première coque était une coque en BFUP avec 2 % de fibres d'acier pour tester la procédure de production et faire des corrections pour les prochaines coques. Le BFUP a eu un étalement de 280 mm au mini-cône, le matériau est donc autoplaçant. Pour cette coque, la première gâchée sert à remplir une moitié du volume des spécimens de caractérisation et environ 80 % de la coque. La deuxième gâchée sert à remplir le 20 % restant du volume de la coque et terminer les spécimens de caractérisation. La coque est remplie par la face arrière du parapet (Figure 4-20) afin de favoriser l'orientation des fibres. Cependant, la préparation de la deuxième gâchée laisse le temps au BFUP de figer légèrement. Pour remplir le moule, il faut donc ajouter du BFUP par les faces avant et arrière de la coque ce qui crée deux zones où le flux d'écoulement de BFUP est perturbé par la rencontre de la couche précédente. Ceci peut créer une zone d'interface plus faible avec moins de fibres ou avec des fibres mal orientées. La face avant de la coque est plus critique, car le BFUP est en traction lors des essais structuraux et la zone avec moins de fibres pourrait fissurer prématurément.

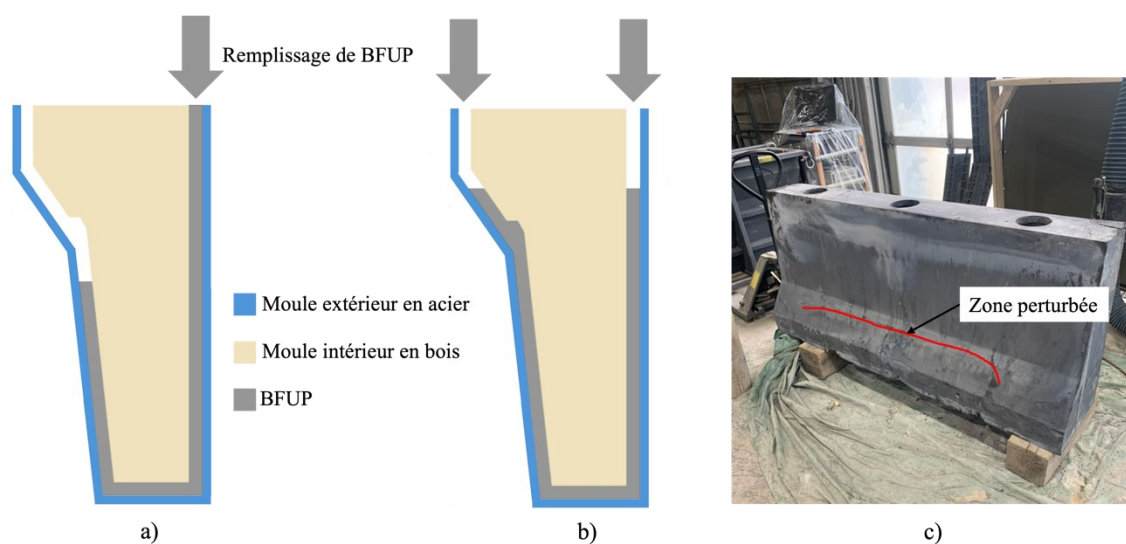


Figure 4-20 Remplissage de la coque 1, a) Première gâchée, b) Deuxième gâchée, c) Zone perturbée avec moins de fibres

Pour éviter la formation d'une zone perturbée avec moins de fibres à la face avant, une solution serait d'utiliser la première gâchée pour remplir presque entièrement la coque. La deuxième gâchée serait pour produire les spécimens de caractérisation. La coulée doit commencer par la face avant pour remplir totalement cette face et éviter la rencontre de deux flux d'écoulement dans cette zone.

Par la suite, le démoulage de la coque a été une étape complexe. Le moule devait initialement être soulevé en tirant sur la coque, le coffrage devant rester en place sur le sol. Cependant, le moule intérieur était beaucoup plus difficile à retirer pour trois raisons. Premièrement, le retrait libre mesuré était plus important que prévu initialement et le retrait restreint du BFUP a appliqué une pression sur le moule intérieur. La solution à ce problème a été de fixer le moule extérieur en acier sur la dalle du laboratoire et soulever le moule intérieur avec le pont roulant (Figure 4-21).



Figure 4-21 Démoulage du moule intérieur

Deuxièmement, la forme du moule intérieur crée un blocage lors du décoffrage. Les surfaces parallèles du moule coincent la coque en BFUP. Le moule intérieur en bois devrait

être levé parfaitement à la verticale pour ne pas bloquer ce qui est difficile à réaliser. La solution à ce problème a été de modifier la géométrie du moule intérieur afin d'éliminer le plus de surfaces parallèles possible dans le moule intérieur en bois.

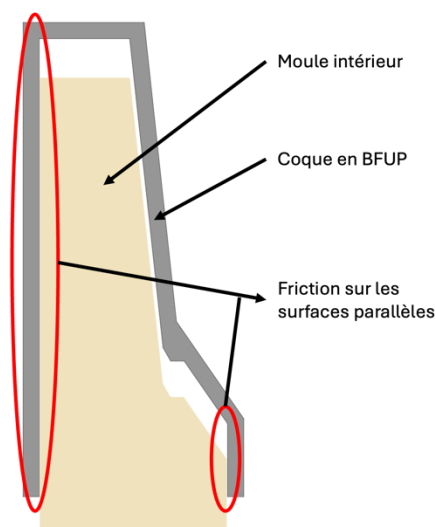


Figure 4-22 Frottement lors du démoulage du moule intérieur

Troisièmement, le retardateur de prise complexifie le démoulage, car il laisse le BFUP dans un état de pâte très visqueux en surface du moule intérieur. La pâte de BFUP colle sur le moule et rend le démoulage très difficile. Normalement, un agent de démoulage ou de l'huile permet de faire glisser le coffrage, mais, dans ce cas, le mélange du retardateur de prise et d'un produit facilitant le démoulage n'est pas possible. La solution à ce problème est d'utiliser un agent de démoulage ou une pellicule plastique compatible avec le retardateur de prise qui permettrait au moule de glisser.

Enfin, le retournement de la coque et du moule se déroule sans problème. Le démoulage du moule en acier extérieur est aussi très difficile. La coque en BFUP était censée glisser facilement sur le moule extérieur, mais pour la même raison que le moule intérieur, les surfaces parallèles créent beaucoup de frottement. Aucun point d'ancrage dans la coque ne permet de la fixer au sol pour soulever le moule extérieur et lutter contre le frottement. La première coque s'est ainsi endommagée pour permettre de la sortir du moule. Des trous sont percés dans la coque afin de passer des barres d'armatures fixées sur la dalle du

laboratoire (Figure 4-23). Le moule extérieur est retiré en le soulevant avec le pont roulant. La solution est de pouvoir démonter le moule en acier ce qui réduit le nombre de surfaces parallèles et d'ajouter des fixations dans la coque en BFUP à l'état frais pour la fixer sur la dalle du laboratoire.

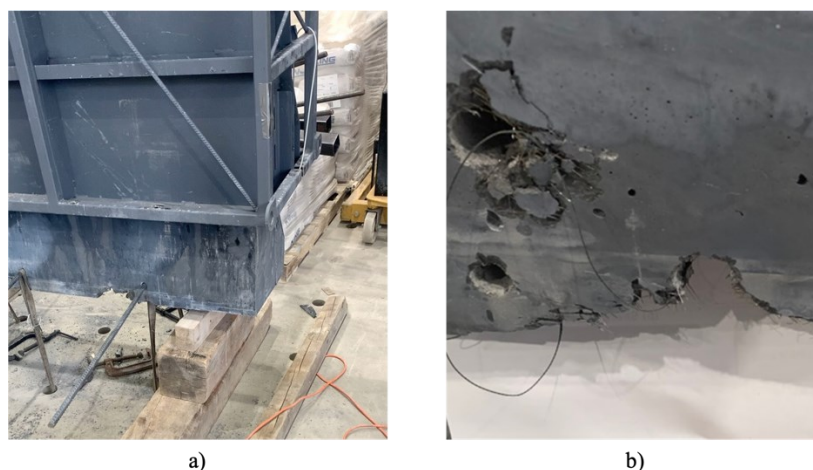


Figure 4-23 Démoulage du moule extérieur, a) Fixation sur la dalle, b) Endommagement créé lors du démoulage

4.2.2.3 Corrections sur la méthode de production

La production de la première coque a permis de mieux comprendre les enjeux liés à la production de coques minces. Les modifications à la procédure de production sont les suivantes :

- couler la coque en une gâchée par la surface inclinée;
- démouler le moule intérieur le plus tôt possible;
- réduire les surfaces parallèles dans le moule intérieur et extérieur;
- fixer la coque sur la dalle du laboratoire et retirer les coffrages avec le pont roulant.

BPDL a récupéré le coffrage et effectué les modifications suivantes. Premièrement, la surface avant verticale du moule intérieur en bois est sablée à 7° afin d'enlever la section parallèle à la surface arrière (Figure 4-24).

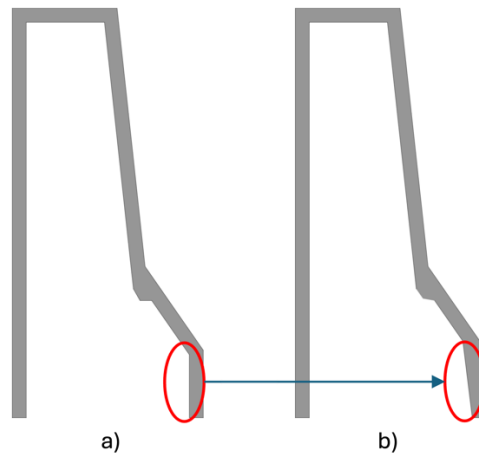


Figure 4-24 Changement sur la face avant de la coque, a) Géométrie initiale, b) Géométrie finale

Deuxièmement, l'extrémité du moule extérieur en acier devient démontable (Figure 4-25) ce qui enlève le frottement de ces deux grandes surfaces parallèles. Pour rappel, la géométrie extérieure de la coque ne peut pas être changée pour respecter la norme CSA S6-19 (2019). Pour les autres surfaces parallèles du moule extérieur, de la graisse sera appliquée au lieu de l'huile, car elle accroche mieux aux parois du moule et permettra au béton de glisser plus facilement.



Figure 4-25 Extrémité démontable dans le moule extérieur

Troisièmement, le cadre en acier utilisé pour fixer le moule intérieur est adapté pour permettre l'ajout de tiges filetées qui seront coulées dans le BFUP (Figure 4-26). Le cadre en acier permet de fixer la coque sur la dalle.

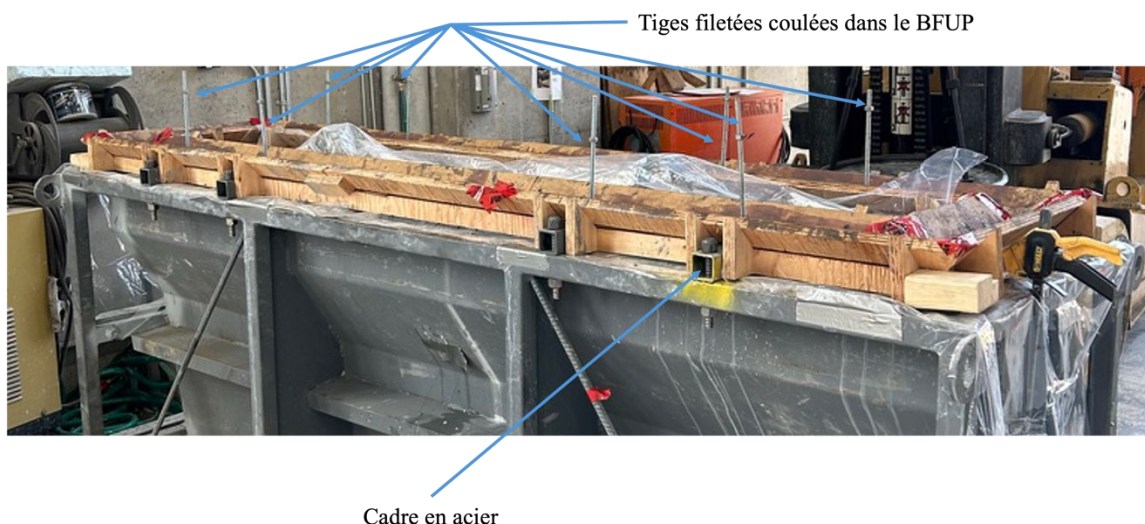


Figure 4-26 Tiges filetées coulées dans le BFUP et fixées dans le cadre en acier

4.2.2.4 Fabrication de la coque 2

La deuxième coque est fabriquée avec un BFUP contenant 2 % de fibres d'acier. La coque est fabriquée avec le coffrage modifié. Le BFUP a un étalement de 320 mm au mini-cône. Aucun problème n'est rencontré dans la fabrication de la coque. Le moule est bien rempli et la coque a une belle finition de surface excepté quelques bulles en surface (Figure 4-27). Le capteur SOFO pour mesurer le retrait est cependant endommagé lors du démoulage et ne sera pas utilisable pour la suite du projet.



Figure 4-27 Deuxième coque en BFUP

4.2.3 Fabrication de la coque 3

La troisième coque est fabriquée avec un BFUP contenant 3 % de fibres synthétiques en PVA. Le BFUP a un étalement de 230 mm au mini-cône soit une valeur inférieure à celle prévue. Malgré tout, la mise en place du BFUP se déroule sans encombre. Cependant, le démoulage du moule intérieur a été réalisé trop tôt. La coque n'était pas assez résistante et une fissure traversante est apparue lorsque le coffrage intérieur est retiré (Figure 4-28). La longueur de la fissure mesure environ 2 m (0.75 m sur la surface avant et sur l'extrémité et 1.25 m sur la surface arrière).

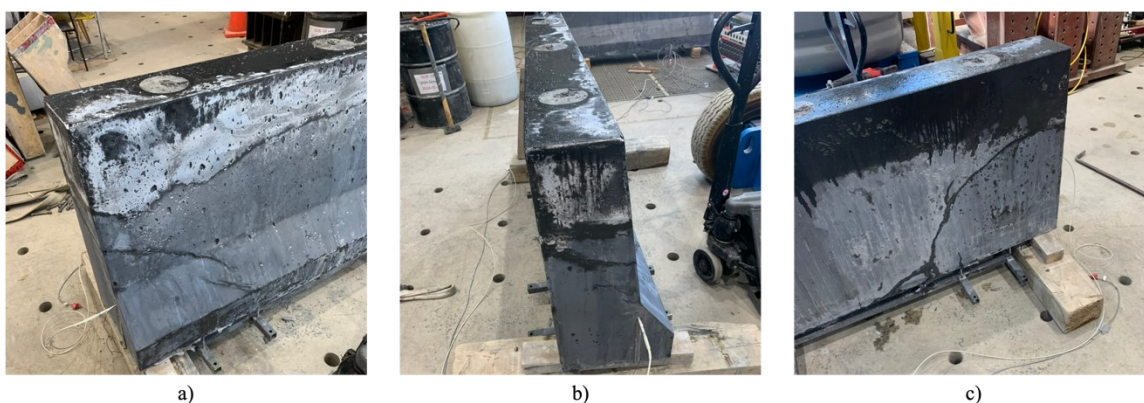


Figure 4-28 Troisième coque en BFUP, a) Face avant, b) Extrémité, c) Face arrière

La fissure a une ouverture moyenne de 2.5 mm sur la face arrière de la coque et sur la face avant. Il a été décidé de réparer la coque plutôt que d'en produire une autre. La réparation devrait étanchéiser la coque pour la remplir avec le BO lorsqu'elle sera installée sur la dalle avec armatures en attente. L'entreprise Soconex accepte de réparer la fissure gratuitement avec une injection d'époxy (Figure 4-29). La réparation est efficace et permet de retrouver l'étanchéité de la coque requise pour la deuxième étape de production, soit le remplissage du BO.



Figure 4-29 Réparation de la fissure par injection à l'époxy

4.2.4 Remplissage des coques avec le BO

La prochaine étape est d'installer les coques en BFUP sur les dalles avec armatures en attente et de les remplir avec le BO.

La Figure 4-30 illustre l'installation de la coque sur la dalle. Un mortier « High-Flow grout » de Euclid est d'abord coulé sur la dalle du parapet et la coque y est déposée. Ensuite, les coques sont installées avec les tiges filetées sur les dalles. Des ancrages de type « drop-in » et des madriers 4 par 4 po sont utilisés pour fixer la coque sur la dalle avec des tiges filetées vissées dans les ancrages.



Figure 4-30 Coque en BFUP installée sur la dalle

Le BO du cœur est commandé à l'entreprise Demix. Le béton demandé est de type XVII (MTQ, 2023b). Ce béton semi-autoplaçant doit avoir une résistance de 35 MPa à 28 jours, un rapport E/L de 0.41, une teneur en air de 6 à 9 % et un étalement de 500 mm.

Tableau 4-5 Volume de BO pour le remplissage des deux coques

Élément	Nombre	Volume unitaire L	Volume total L
Coque 30 mm	2	400	800
Cylindres (4")	12	1.6	19.5
Cylindres (6")	3	5.5	16.4
Essais état frais	1	5	5
Total (sans les pertes)			850
Pertes (20 %)			170
Total (avec perte)			1050

La coque est d'abord remplie à partir du trou central de la coque en BFUP (Figure 4-31), le remplissage est finalisé par les trous extérieurs. Une aiguille vibrante est utilisée à la fin du remplissage par les trous pour assurer une bonne compaction du béton.

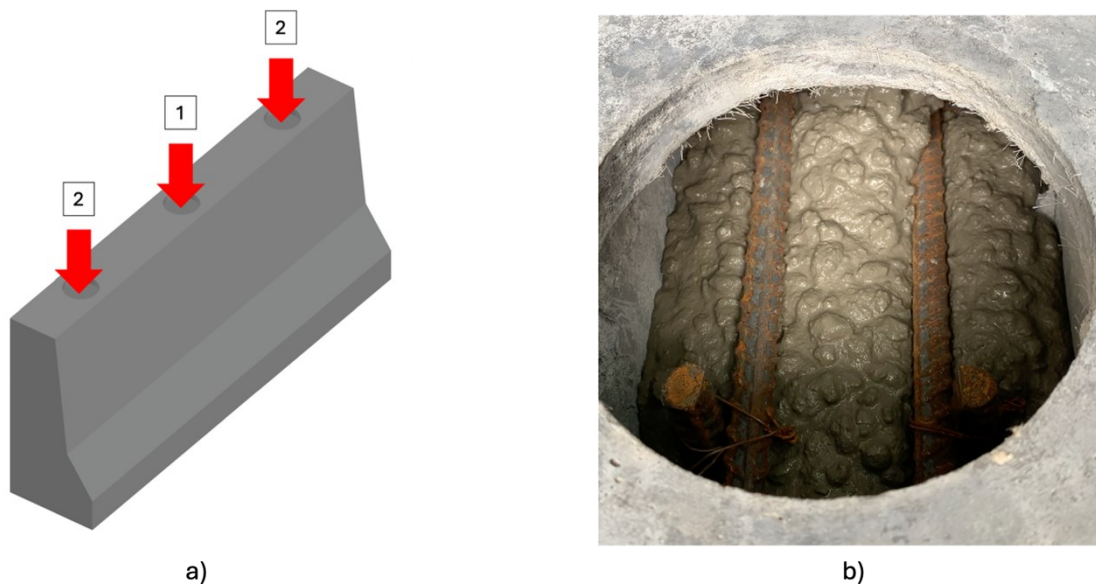


Figure 4-31 Remplissage des coques, a) Procédure, b) Armatures enrobées de BO

4.3 Campagne expérimentale finale

Cette section porte sur le montage, l'instrumentation et les résultats obtenus sur les coques et les parapets hybrides. Tous les matériaux du projet sont aussi caractérisés afin de reproduire le comportement des coques et des parapets dans des modèles numériques par la suite.

4.3.1 Caractérisation des bétons

Le Tableau 4-6 résume les propriétés mécaniques mesurées pour tous les bétons. Les normes utilisées pour les essais sont énumérées à la Section 4.1.

Tableau 4-6 Propriétés mécaniques des bétons

Matériau	Spécimen	Échéance jours	f_c MPa	E_c GPa	ν -	f_t MPa
BFUP	Parapet 1	28	135	-	-	4.5
	PVA 3%	119*	140	39	0.200	4.5
	Parapet 2	28	156	-	-	8.5
	Acier 2%	90*	166	42	0.200	9.5
BHP	Dalle 1	28	60	36	0.200	2.83
		270*	69	38	0.200	3.66
	Dalle 2	28	61	36	0.200	3.19**
		264*	66	38	0.200	3.69
BO	Parapet 1 et 2	28	45	-	-	2.39**
		50*	47	26	0.200	2.57

* Échéancier variable selon la date de production et la date de l'essai sur parapet

** Données incohérentes remplacées par des valeurs calculées avec les équations de la norme CSA A23.3 (2019)

Les BFUP respectent les attentes de résistance à la compression en ayant des valeurs bien supérieures à 120 MPa. Le BHP des deux dalles respecte aussi l'exigence de 50 MPa. La résistance du BO est supérieure à l'exigence de 35 MPa. Toutes les propriétés spécifiées étaient conformes.

La caractérisation en traction du BFUP avec fibres en acier a été réalisée avec la procédure expérimentale habituelle (Beaurivage, 2009) dont les vitesses de chargements sont présentées au Tableau 4-7. La rupture fragile prématurée du BFUP avec fibres en PVA lors de la caractérisation préliminaire a mené à une adaptation des vitesses. La Figure 4-32 illustre les points de changement de vitesse.

Tableau 4-7 Procédure de chargement pour la caractérisation en traction des BFUP

	Phase	Vitesse (mm/min)		Jusqu'à
		Fibres acier	Fibres PVA	
1	Vitesse (mm/s)	0.1	0.02	Résistance de la matrice f_{tc}
	Accélération (mm/s ²)	-	0.005	-
2	Vitesse (mm/s)	0.1	0.1	Perte de charge de 70 %
	Accélération (mm/s ²)	0.05	0.05	-

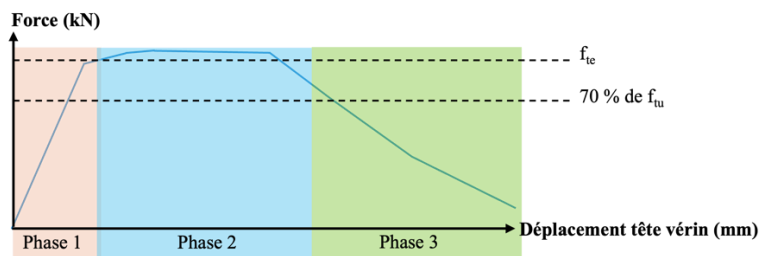


Figure 4-32 Phases de chargement sur les spécimens de caractérisation en traction

Pour avoir plus d'informations sur la fissuration des spécimens, un LVDT est remplacé par le SIC (Figure 4-33). Le SIC permet d'analyser de manière plus détaillée le patron de fissuration des spécimens. Pour chaque BFUP, trois spécimens prismatiques de 50×50 mm et trois spécimens en forme d'os de section centrale de 50×100 mm sont testés.

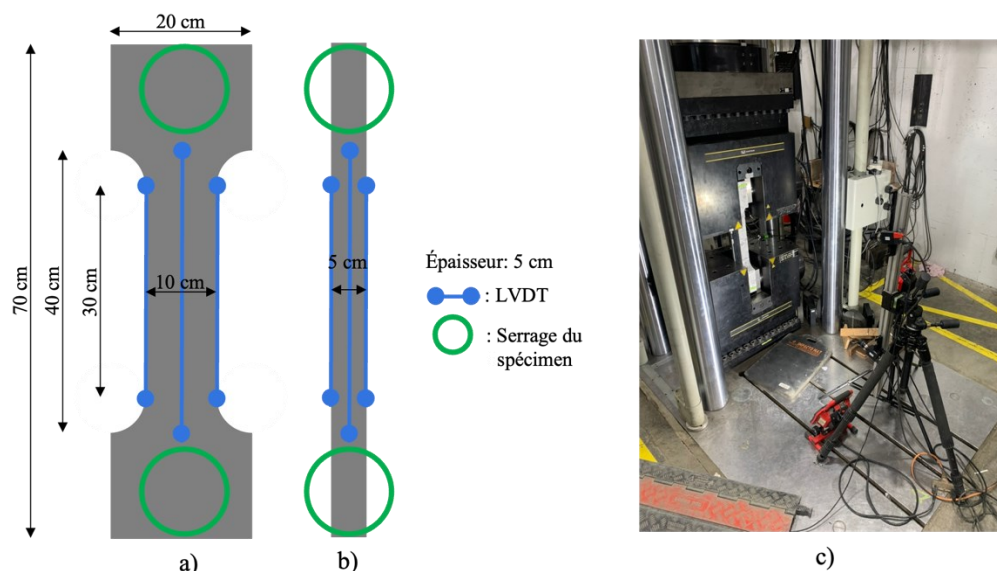


Figure 4-33 Spécimens de traction directe, a) Os 50×100 mm, b) Tirant 50×50 mm, c) Montage d'essai

Le comportement en traction du BFUP avec 2 % de fibres en acier est illustré à la Figure 4-34. La contrainte maximale moyenne est de 8.7 MPa à 28 jours et de 9.6 MPa à 113 jours. Le plateau d'écrouissage moyen est de 2750 $\mu\text{m/m}$ à 28 jours et de 3250 $\mu\text{m/m}$ à 113 jours. Ces résultats sont conformes aux attentes.

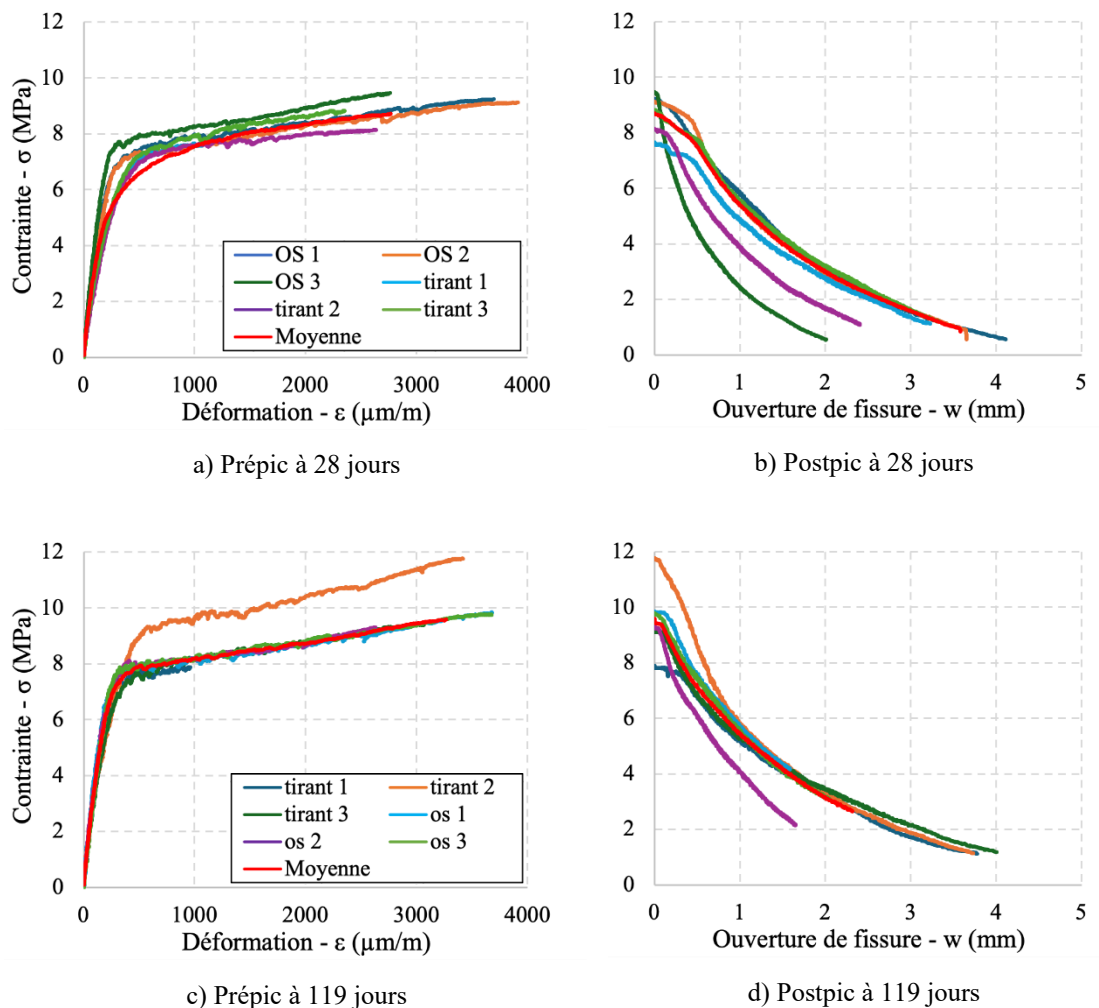


Figure 4-34 Comportement en traction du BFUP avec 2 % de fibres en Acier

Le comportement en traction du BFUP avec 3 % de fibres en PVA est illustré à la Figure 4-35. La contrainte en traction maximale moyenne est de 4.3 MPa et 4.6 MPa pour 28 et 90 jours. Le plateau d'écrouissage dépasse 8750 $\mu\text{m/m}$ à 28 jours et 5750 $\mu\text{m/m}$ à 90 jours.

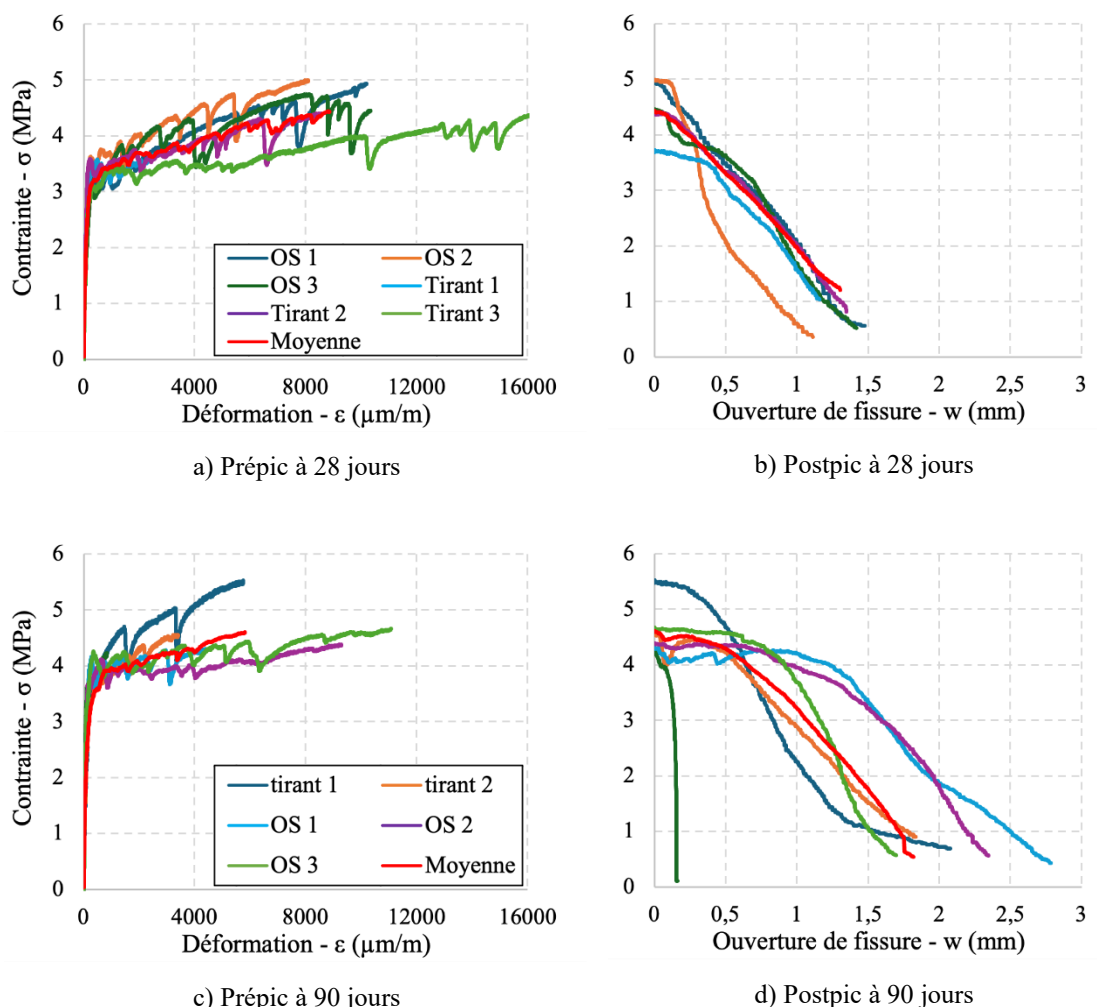


Figure 4-35 Comportement en traction du BFUP avec 3 % de fibres en PVA

L'utilisation de la procédure de chargement plus lente permet de mieux capter le comportement prépic du BFUP avec fibres en PVA (Figure 4-35). La rupture prématurée ne survient plus et un comportement écrouissant est observé. Cependant, les fissures mesurées lors de la phase d'écrouissage sont nettement plus ouvertes que pour le BFUP avec fibres en acier.

Une étude de la fissuration lors des essais en traction a été réalisée dans le cadre du stage de Legouest (2024) dans le cadre de ce projet de maîtrise. L'observation et l'analyse des données par SIC a mené aux résultats du Tableau 4-8 qui présente les ouvertures des fissures individuelles et moyennes. Ils révèlent que le BFUP avec fibres en acier montre

des microfissures maximales en moyenne de 75 μm jusqu'à la résistance maximale (f_{tu}), tandis que le BFUP avec fibres en PVA montre des macrofissures maximales en moyenne de 500 μm . Cette différence d'ouverture est très significative. Pour le BFUP avec fibres en acier, la durabilité du BFUP sera excellente en présence de microfissures (Charron, 2003), pour les fibres en PVA la durabilité sera nettement réduite. La considération du comportement écouissant en traction fait donc l'objet de réflexions. Mécaniquement, le comportement écouissant est observé, mais sa considération en conception est questionnable. Avec l'ouverture de fissure procurée par les fibres en PVA en écouissage, il est probablement plus raisonnable de considérer la localisation des fissures dans la phase d'adoucissement de la loi de traction des modèles numériques étant donné les ouvertures atteintes. Si la localisation des multiples fissures est considérée dans la phase d'écouissage, les modèles sous-estimeront nettement la fissuration. Cet aspect sera étudié au Chapitre 5 et les résultats confirmeront que la multifissuration du BFUP avec fibres en PVA doit être considérée en phase d'adoucissement.

Tableau 4-8 Ouverture de fissure dans les BFUP selon le niveau de chargement sur les spécimens de caractérisation en traction (Legouest, 2024)

type de BFUP	Numéro du spécimen	Ouverture de fissure à f_{te} (μm)			Ouverture de fissure à f_{tu} (μm)			Espace ment moyen entre les fissures (mm)
		Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	
acier	1	0.00	45.00	9.88	22.48	80.20	24.82	58.29
	2	0.00	14.20	4.84	35.97	47.70	43.20	42.74
	3	0.00	81.90	1.74	36.61	52.67	41.63	47.94
	4	0.00	5.53	0.93	0.37	94.93	48.76	53.16
	6	0.00	9.32	1.98	32.29	97.16	63.84	55.78
	moyenne	0.00	31.19	3.87	25.54	74.53	44.45	51.58
PVA	1	0.01	31.00	6.33	6.01	494.68	228.92	56.14
	4	0.00	2.46	0.54	0.01	411.29	190.04	65.93
	5	0.00	24.01	4.80	2.08	309.57	120.98	55.74
	6	0.00	0.00	0.00	34.67	742.83	279.42	57.70
	moyenne	0.00	14.37	2.92	10.69	489.59	204.84	58.88

L'ouverture des fissures des BFUP avec fibres en PVA est plus importante que ceux des BFUP avec fibres en acier en prépic. Cette différence s'explique par le fait que les fibres en PVA ont un module élastique plus faible que les fibres en acier. Il faut que les fibres en PVA s'étirent davantage pour reprendre les contraintes supportées par le béton avant la fissuration (Figure 4-36). Cet allongement élastique est plus important pour les fibres en PVA qui ont un module élastique de 8.5 GPa alors que celui des fibres en acier, 200 GPa. Les fissures sont ainsi plus ouvertes en prépic et une perte de charge plus significative est observée à la création de chacune d'entre elles (Figure 4-35).

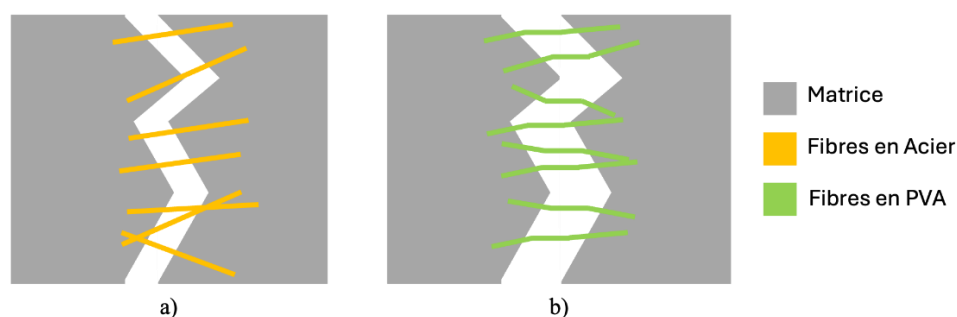


Figure 4-36 Ouverture de fissure pour avoir la reprise de la charge a) BFUP avec fibres en Acier, b) BFUP avec fibres en PVA

Le Tableau 4-9 présente un résumé des déformations et des contraintes pour chaque BFUP aux deux échéances. Le BFUP avec fibres en PVA possède une résistance en traction 50% plus faible que celle avec fibres en acier, mais son plateau d'écrouissage est 1.75 à 3 fois plus grand.

Tableau 4-9 Propriétés des BFUP mesurés dans la caractérisation finale en traction

BFUP	28 jours		échéance	
	f_{tu} MPa	ϵ_{tu} $\mu m/m$	f_{tu} MPa	ϵ_{tu} $\mu m/m$
Acier 2%	8.7	2800	9.6	3300
PVA 3%	4.4	8900	4.6	5800

4.3.2 Propriétés des armatures

Des barres d'armatures de nuance 400W de diamètres 15M et 25M sont utilisées dans le projet. Les courbes de comportement en traction sont présentées dans la Figure 4-37. La limite élastique (f_y) est de 400 et de 385 MPa respectivement pour les 15M et les 25M tandis que la contrainte de rupture est de 600 et 675 MPa.

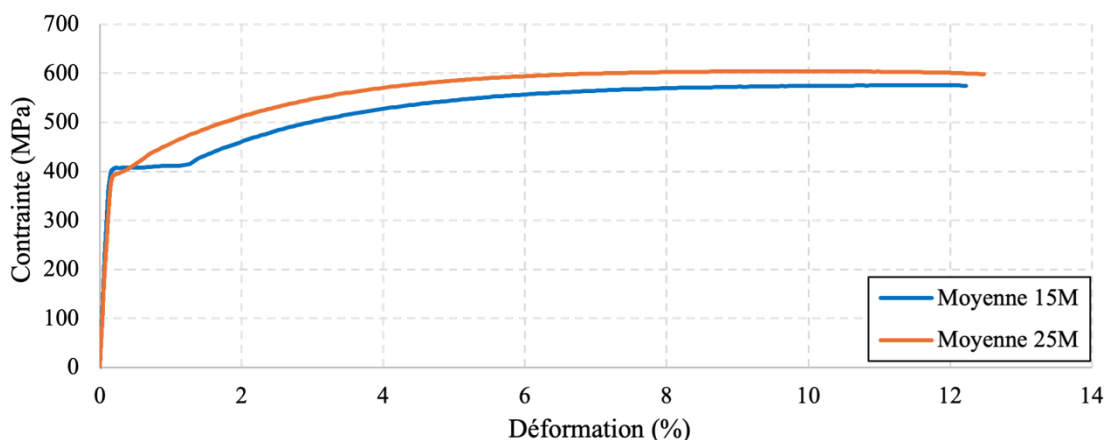


Figure 4-37 Comportement en traction des armatures

4.3.3 Cas de chargement 1 – Retrait restreint de la coque

Cette section porte sur l'étude du comportement de la coque en BFUP sous le retrait restreint. L'instrumentation est abordée, suivie des résultats.

4.3.3.1 Montage et instrumentation

La Figure 4-38a illustre comment sont positionnées les jauges SOFO et TML dans la coque pour mesurer le retrait restreint tandis que la Figure 4-38b illustre la TML dans le prisme pour mesurer le retrait libre. La fibre optique est fixée avec des chaises d'armatures dans la surépaisseur de la coque (Figure 4-11) et du fil d'acier pour la tenir en place lors de la coulée. Le prisme de retrait libre est coulé en même temps que la coque et sert à avoir une comparaison du retrait sans restriction du BFUP. Le prisme de retrait libre est démoulé en même temps que la coque en BFUP est laissée près de la coque pour reproduire la même cure.

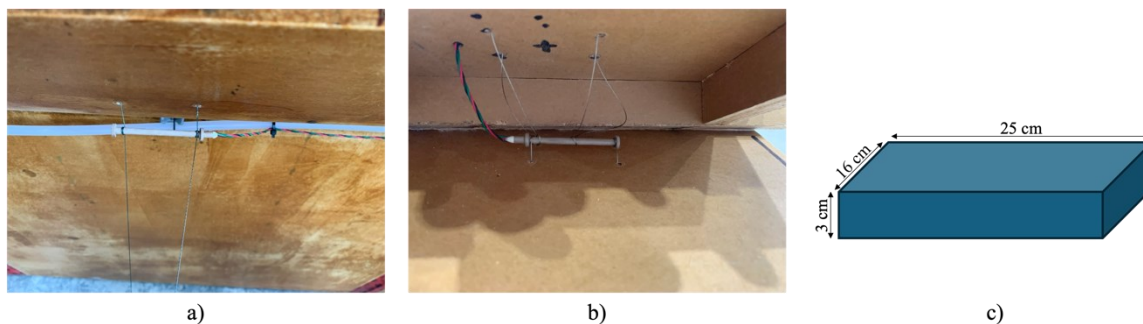


Figure 4-38 Installation des jauges dans les coffrages, a) Retrait restreint de la coque, b) Retrait libre dans un prisme, c) Dimensions du prisme

Des thermocouples sont aussi installés dans les coques et dans les spécimens de retrait libre pour mesurer l'échauffement du BFUP.

4.3.3.2 Échauffement

La Figure 4-39 illustre l'évolution de température dans les prismes de retrait libre et dans les coques de retrait restreint. La température des spécimens se stabilise à la température du laboratoire à 18 heures pour la coque avec fibres en acier et à 25 heures pour la coque avec fibres en PVA. L'échauffement observé à 17 et 22 heures correspond à la prise du BFUP respectivement avec fibres en acier et avec fibres en PVA. Ensuite la température augmente avec le démarrage de l'hydratation. Elle se stabilise à nouveau vers 40 heures lorsque la chaleur d'hydratation devient très faible. Les oscillations notées après cette période sont liées aux variations de température dans le laboratoire. Les coques sont minces de sorte que la chaleur d'hydratation demeure faible et se dissipe rapidement.

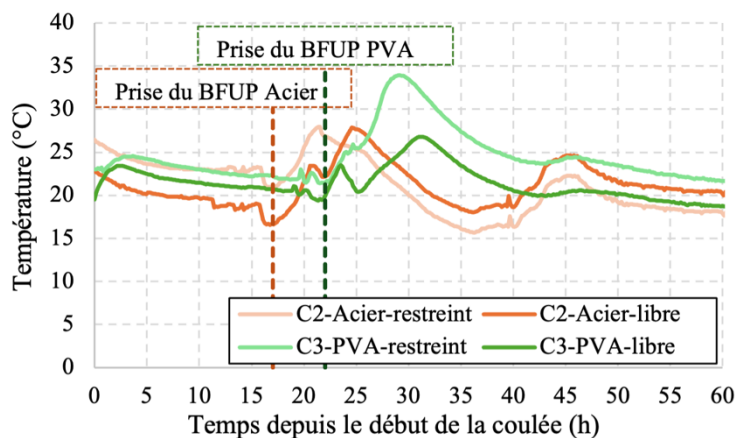


Figure 4-39 Évolution de la température pour les spécimens restreint et libre mesurée par les thermocouples

4.3.3.3 Retrait

Le Tableau 4-10 présente le déroulement de chaque gâchées de béton. Les jauges de retrait sont très sensibles aux manipulations liées au démoulage, à la cure et aux variations de température dans le laboratoire. Grâce aux informations contenues dans le tableau, les courbes sont corrigées pour enlever certains sauts liés aux manipulations.

Tableau 4-10 Déroulement des coulées

Événements depuis la fabrication des BFUP	Temps écoulé (h)		
	Coque 1	Coque 2	Coque 3
	Acier 2%	Acier 2%	PVA 3%
Contact E/C gâchée 1	0.0	0.0	0.0
Remplissage de la coque	0.3	0.5	0.3
Contact E/C gâchée 2	0.7	0.6	0.7
Remplissage du spécimen de retrait libre	1.6	1.0	1.0
Décoffrage cœur	48.1	18.1	23.2
1ère cure	51.8	24.3	25.8
Décoffrage coffrage ext.	191.8	118.2	117.4
2ème cure	197.0	122.1	120.9

La Figure 4-40 illustre le retrait effectif mesuré avec la jauge de fibre optique SOFO. Pour rappel, les effets de température dans la jauge sont compensés, ceci signifie que le signal

de la jauge n'est pas influencé par l'échauffement de la jauge. Cependant, elle mesure bien la variation de volume du BFUP causée par l'échauffement thermique d'hydratation du matériau et le retrait. Pour la coque 2, la jauge est endommagée au démoulage du moule intérieur en bois et pour la coque 1, la jauge est perdue lors du démoulage du moule extérieur en acier. Une phase de gonflement est notée jusqu'à environ 30 heures dû à l'échauffement du BFUP. Par la suite, une phase de retrait est observée dans le BFUP. L'amplitude des déformations est similaire pour les coques avec fibres en acier et fibres en PVA. La coque avec fibres en acier atteint $100 \mu\text{m/m}$ à 48 heures avant que le signal soit perdu. La coque avec fibres en PVA atteint quant à elle $400 \mu\text{m/m}$ à 160 heures.

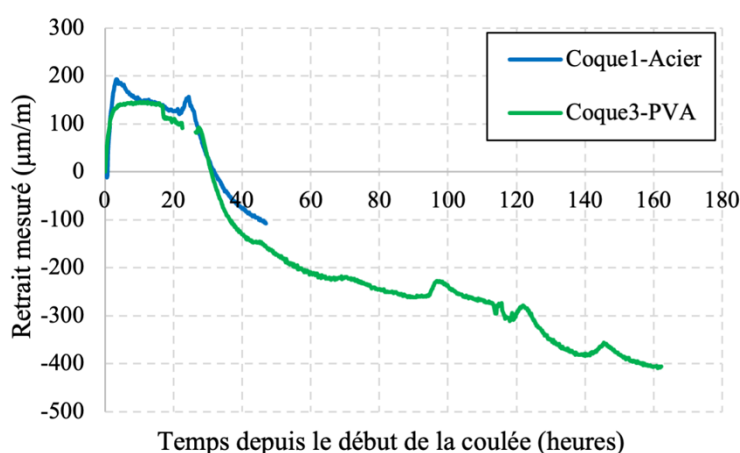


Figure 4-40 Retrait effectif mesuré par la jauge SOFO

La Figure 4-41 illustre les courbes de retrait effectif en condition restreinte dans les coques et de retrait libre mesurées avec les jauges TML. Le signal des jauges est influencé par la variation de température ce qui explique la grande différence d'amplitude de retrait entre 15 et 30 heures où la chaleur d'hydratation est élevée par rapport aux mesures de la Figure 4-40. La différence entre les courbes de retrait libre et effectif dans les coques permet d'estimer la proportion de retrait qui a été restreint par la coque. Le retrait libre se stabilise à $650 \mu\text{m/m}$ pour le BFUP avec fibres en acier et à près de $1200 \mu\text{m/m}$ pour le BFUP avec fibres en PVA. Le retrait effectif dans les coques se stabilise à $175 \mu\text{m/m}$ pour la coque avec fibres en acier et à plus de $950 \mu\text{m/m}$ pour la coque avec fibres en PVA. Ainsi, la

restreinte du retrait est de plus de 60 % par rapport aux spécimens de retrait libre pour la coque avec fibres en acier et de plus de 20 % pour la coque avec fibres en PVA.

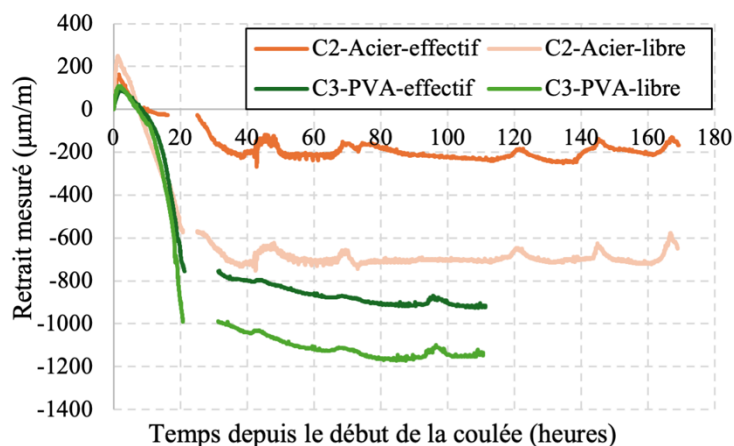


Figure 4-41 Retrait restreint et libre mesuré par les jauges TML

Le retrait du BFUP est supérieur à ce qui était prévu particulièrement pour la matrice avec fibres en PVA. La restreinte des déformations est aussi très importante. Cependant, bien que les jauges aient mesuré ce retrait libre au très jeune âge du BFUP, celui-ci ne se traduit pas entièrement en contrainte ou en fissuration puisque le durcissement du matériau s'effectue progressivement à partir d'une vingtaine d'heures. Le matériau atteint une rigidité significative lorsque l'échauffement débute dans le matériau, soit environ à 17 et 22 heures respectivement pour la coque en BFUP avec fibres en acier et avec fibres en PVA (Figure 4-39). Avant cet échauffement, la jauge a déjà capté 368 et 1030 $\mu\text{m/m}$ de retrait libre. Or, cette partie du retrait n'occasionne pas d'endommagement dans le matériau, car il n'a aucune rigidité. C'est le retrait libre qui survient entre le début d'échauffement et le démoulage qui génère des contraintes. Le Tableau 4-11 résume les valeurs de retrait dans la période ayant pu générer des contraintes, la différence correspond à la valeur du retrait libre à considérer dans les modèles.

Tableau 4-11 Retrait libre à considérer dans les modèles selon l'échauffement dans la coque

Matériau	Début de l'échauffement (h)	Retrait libre au début de l'échauffement ($\mu\text{m/m}$)	Début du démoulage (h)	Retrait libre au début du démoulage ($\mu\text{m/m}$)	Différence entre les deux retraits ($\mu\text{m/m}$)
Acier	17	368	18	414	46
PVA	22	1030	23	1160	130

Les modèles d'éléments finis de la Section 3.4 indiquaient de probables fissures dans les coins et dans les chanfreins. Or, ceci n'a pas été observé dans les coques démoulées. Il importe de rappeler que les modèles considéraient des lois de matériaux fortement réduites et critiques pour la conception. Aucune des deux coques n'est fissurée à la suite de la production.

4.3.4 Cas de chargement 2 – Remplissage de la coque

Cette section porte sur l'étude du comportement de la coque en BFUP lors du remplissage de la coque en BFUP avec le BO. L'instrumentation y est abordée, suivie par les résultats.

4.3.4.1 *Montage et instrumentation*

Les dalles avec coques en BFUP sont placées près de la porte de garage du laboratoire pour le remplissage avec du BO à l'aide d'un camion-malaxeur. Deux types d'instruments sont placés sur les spécimens pour mesurer les déplacements transversaux de la coque (Figure 4-42). La dalle avec coque en BFUP avec fibres en PVA avec la coque en BFUP avec fibres en PVA est instrumentée avec un LVDT. Ce dernier est placé au centre longitudinal et vertical de la coque. La dalle avec coque avec fibres en acier est instrumentée avec le SIC. Le SIC est intéressant, car il permet d'avoir un profil de déformations, alors que le LVDT donne seulement une valeur locale. Cependant, le SIC est très influencé par la température et il est moins précis pour des mesures hors plans. L'espace disponible près de la porte de garage ne permettait pas d'utiliser le SIC sur les deux coques.



Figure 4-42 Instrumentation lors du remplissage des coques, a) LVDT, b) SIC

4.3.4.2 Résultats

La température varie beaucoup dans le laboratoire puisque la porte est ouverte pour la livraison de béton par bétonnière (de 23°C initialement et de 14°C pour la fin de la coulée). Le camion-malaxeur a aussi déplacé les dalles lors du remplissage des coques. Les courbes de résultats sont modifiées pour enlever les pics dus aux impacts du camion. Le camion-malaxeur a déplacé la dalle 1 avec le LVDT de plusieurs centimètres et la dalle 2 de quelques millimètres. Le béton avait un étalement de 540 mm (ASTM-C1611) lors du début de la coulée.

La Figure 4-43 illustre le déplacement mesuré avec le LVDT pour la coque avec fibres en PVA. Il s'agit de la coque fissurée lors du démoulage et réparée avec de l'époxy. Elle s'est bien comportée, il n'y a pas eu de déplacement latéral important lors du remplissage et aucune fuite de béton n'a été notée. La partie non linéaire au début de la courbe correspond au remplissage du BO. Le déplacement latéral de la coque se stabilise à 1 mm.

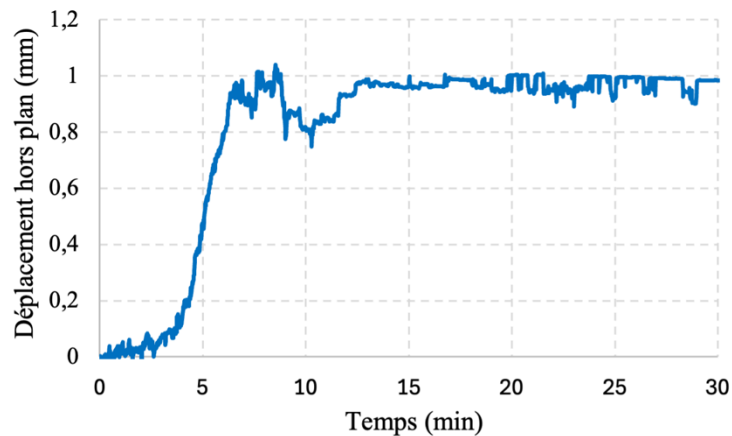


Figure 4-43 Déplacement de la coque latéral

La Figure 4-44 illustre le profil des déplacements transversaux mesurés pour la coque avec fibres en acier mesuré avec le SIC. Les déplacements sont corrigés pour prendre en compte l'impact du camion et les incertitudes dues à la température. Le déplacement corrigé est environ de 1 mm au centre vertical et longitudinal de la coque, soit une valeur similaire à celle mesurée avec le LVDT sur l'autre coque. Le profil de déplacement indique que la restrainte procurée par les madriers en bas à la jonction avec la dalle n'est pas efficace à 100 %, puisqu'un déplacement de 1.86 mm est observé au bas de la coque. Le madrier n'était pas appuyé complètement sur la coque, ce qui a permis à la coque de se déplacer légèrement.

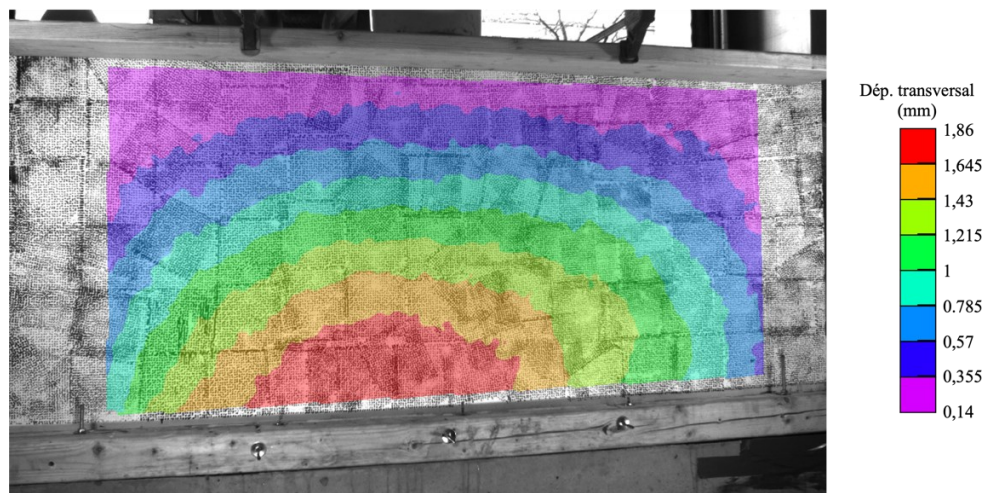


Figure 4-44 Profil de déplacements transversaux dans la coque 2 avec fibres en acier

Des jauges collées sur les barres d'armatures longitudinales dans le parapet permettent de mesurer le retrait du BO pendant son hydratation (Figure 4-45). Le retrait observé dans le BO est d'environ $200 \mu\text{m/m}$ en négligeant les variations dues au changement de température dans le laboratoire.

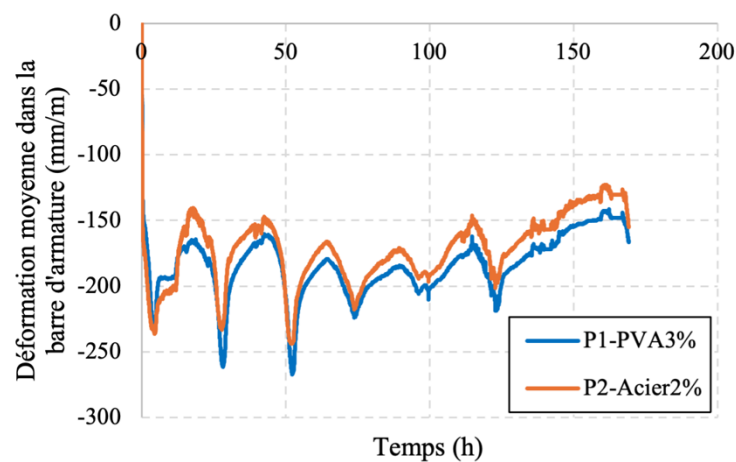


Figure 4-45 Déformation dans les barres d'armature noyées dans le BO

4.3.5 Cas de chargement 3 – Essais structuraux sur les parapets hybrides

Cette section aborde les essais structuraux menés sur les parapets hybrides. La section aborde d'abord le montage et l'instrumentation et ensuite les résultats sont présentés.

4.3.5.1 Montage et instrumentation

Le montage d'essai est présenté à la Figure 4-46. Le vérin de 1000 kN est fixé sur une colonne en acier et il est retenu avec un contrepoids vertical pour éliminer l'effet du poids du vérin. La seule charge appliquée au parapet est ainsi la force transversale appliquée par le vérin. Une dalle de butée est placée derrière le spécimen pour empêcher la dalle du parapet de se déplacer horizontalement sur la dalle du laboratoire. Les dalles sont fixées sur la dalle du laboratoire par post-tension.

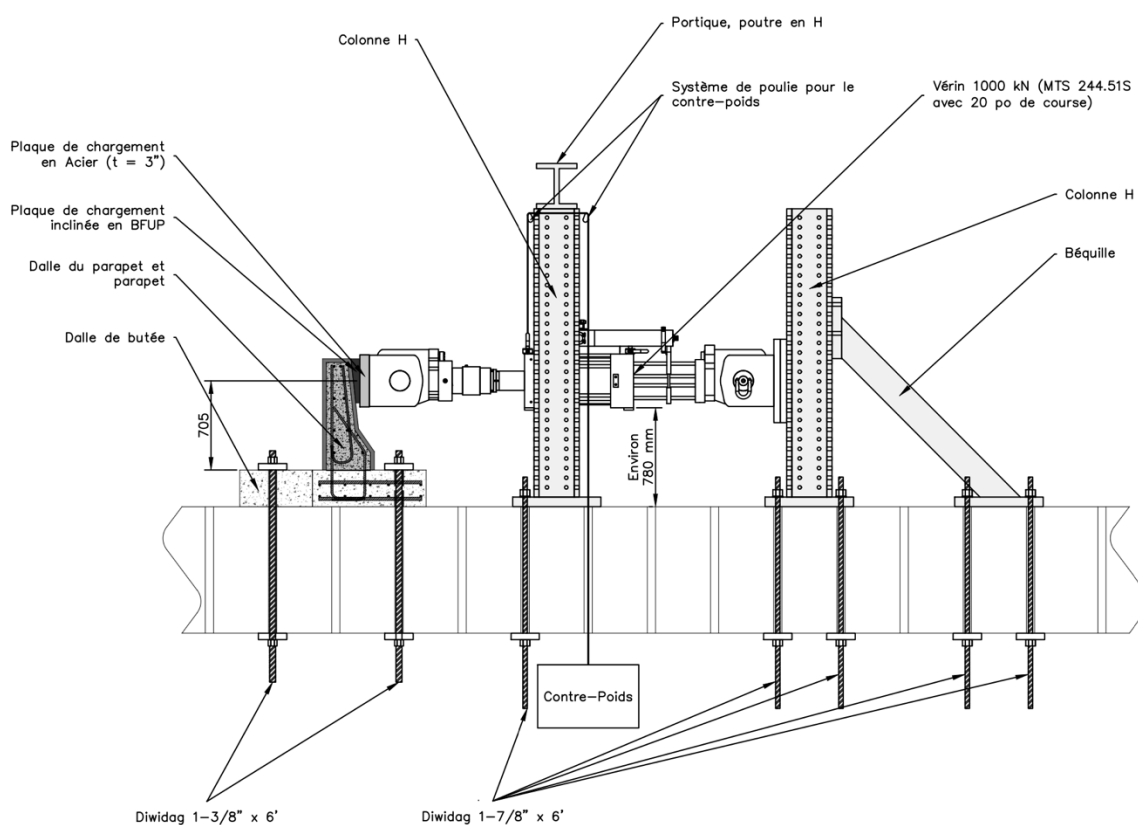


Figure 4-46 Montage pour les essais structuraux sur parapets hybrides

La Figure 4-47 illustre l'instrumentation utilisée sur le parapet en BFUP avec fibres en PVA et la Figure 4-48 illustre celle installée sur le parapet en BFUP avec fibres en acier. L'instrumentation sur les deux parapets est la même sauf les positions de certains capteurs qui changent. Le déplacement transversal à mi-hauteur de la plaque de chargement du parapet avec fibres en PVA est mesuré avec un potentiomètre linéaire. Cependant, la mesure s'est avérée imprécise en début de chargement. Ainsi, sur le parapet avec fibres en acier, le potentiomètre linéaire est remplacé par un LVDT. Une série de capteurs mesurent les déplacements transversaux du parapet par rapport à la dalle du parapet, les déplacements de la dalle du parapet par rapport à la dalle du laboratoire, du soulèvement de l'avant du parapet et la délamination entre le cœur en BO et la coque en BFUP. Enfin, le SIC enregistre les déplacements sur toute la surface inclinée des parapets. La Figure 4-49 illustre l'instrumentation installée sur une armature verticale du parapet à la jonction de la dalle et du parapet et sur une armature horizontale dans le haut du parapet. Malheureusement, les jauges sur la barre d'armature verticale du parapet avec coque en BFUP avec fibres en acier étaient endommagées et ne fonctionnent pas durant le test.

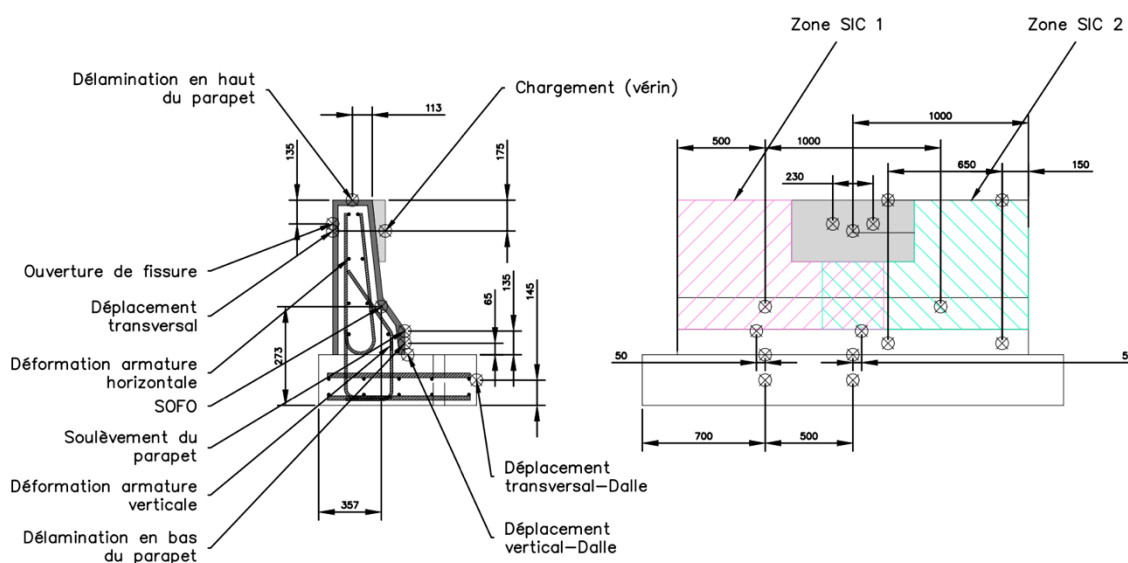


Figure 4-47 Instrumentation pour le parapet avec coque en BFUP avec fibres en PVA

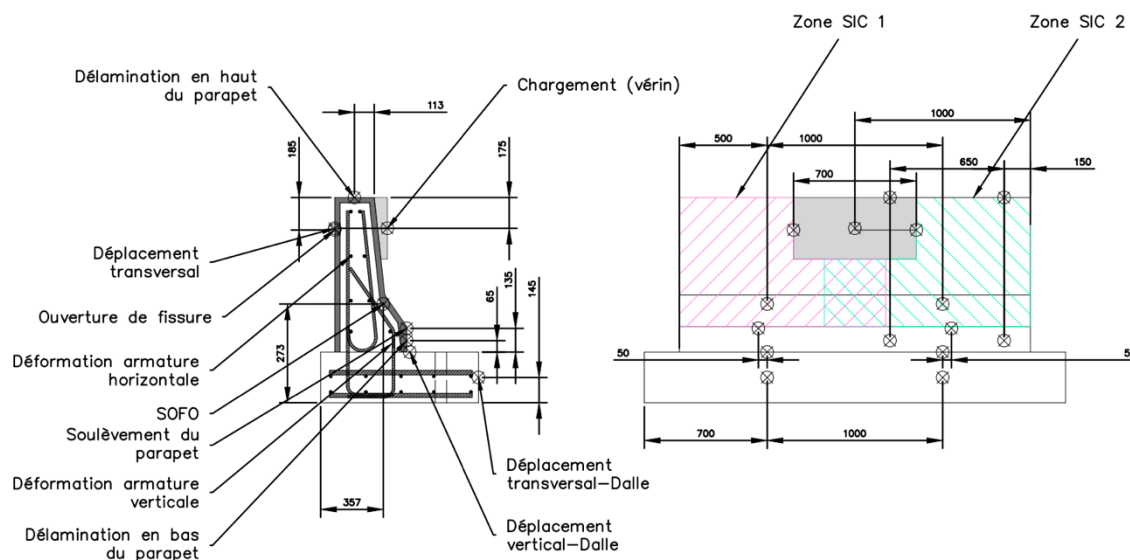


Figure 4-48 Instrumentation pour le parapet avec coque en BFUP avec fibres en acier

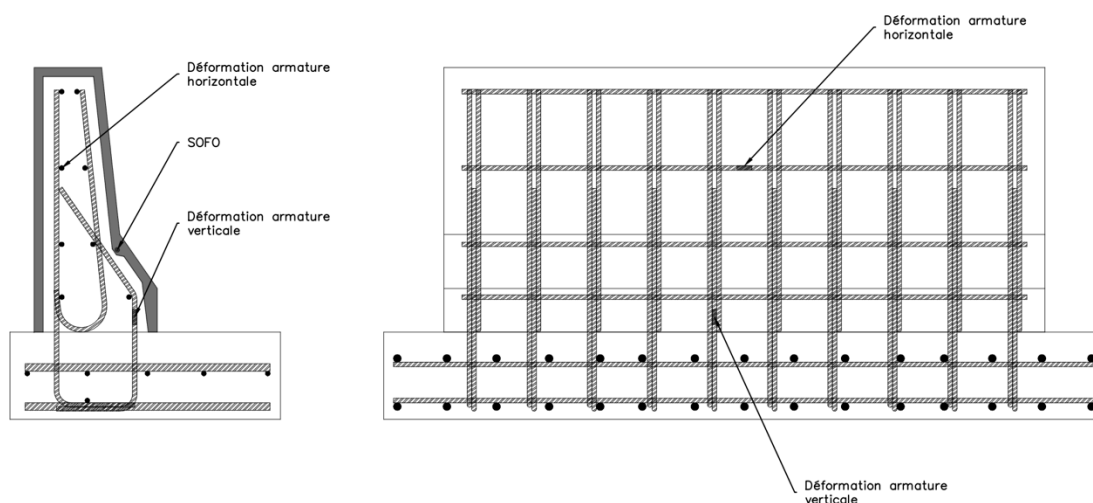


Figure 4-49 Instrumentation sur les armatures pour les deux parapets

La Figure 4-50 présente les capteurs installés à l'avant du parapet et la configuration du SIC. Les deux systèmes SIC couvrent l'ensemble de la face avant du parapet.

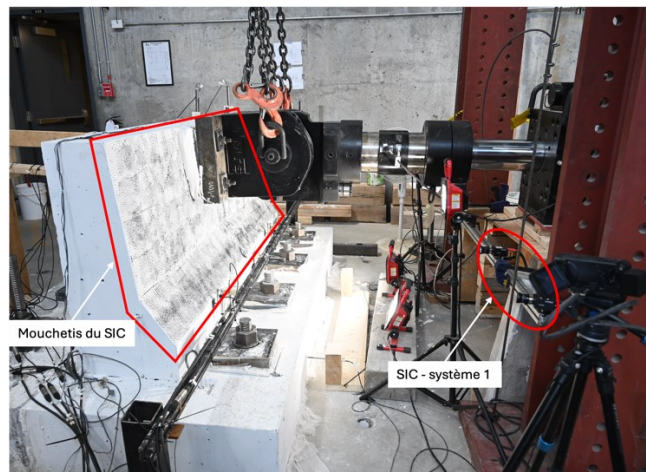
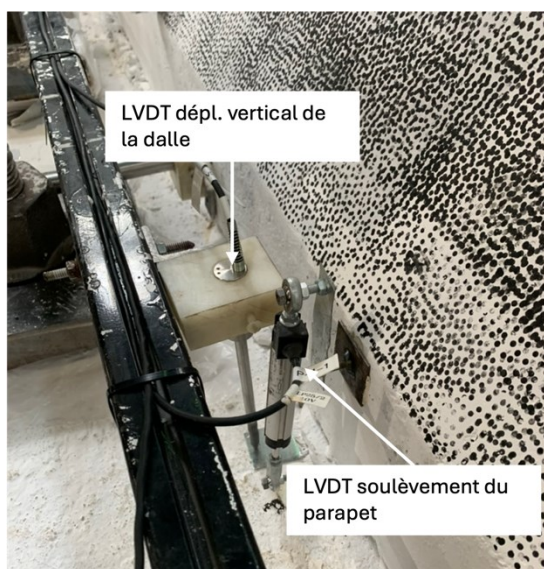


Figure 4-50 Instrumentation sur la face avant du parapet et de la dalle

La Figure 4-51a présente l'instrumentation sur la face avant du parapet servant à mesurer le soulèvement de la dalle, le soulèvement du parapet et la délamination entre le cœur et la coque. Les capteurs sur la Figure 4-51b servent à mesurer la délamination sur le haut du parapet.



a)



b)

Figure 4-51 Instrumentation sur la face avant du parapet, a) Soulèvement du parapet et de la dalle, b) Délamination sur le haut du parapet

La Figure 4-52 présente les capteurs présents à la face arrière du parapet pour mesurer le déplacement et l'ouverture de fissure causée par l'application de la charge du vérin.

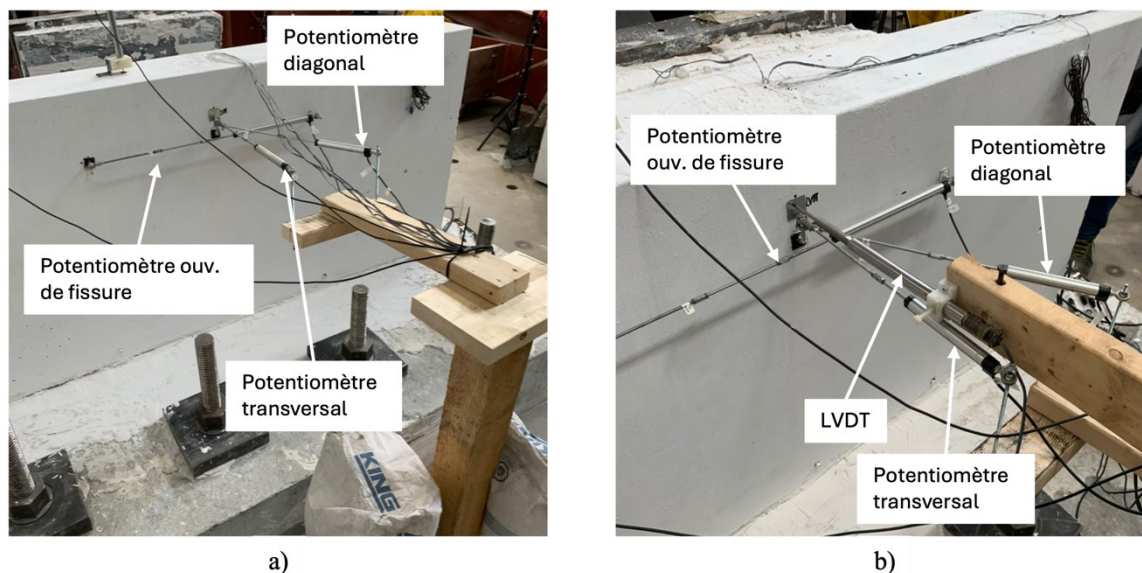


Figure 4-52 Instrumentation dans le dos du parapet, a) Parapet avec fibres en PVA, b) Parapet avec fibres en acier

4.3.5.2 Comportement structural

Certaines difficultés ont été rencontrées lors du démarrage du premier essai de chargement structural. Des corrections ont été appliquées et ont permis de poursuivre l'essai et d'analyser les résultats adéquatement. Les informations sont fournies à l'Annexe C.

Le comportement structural des 2 parapets hybrides est illustré à la Figure 4-53. Le parapet avec coque en BFUP avec fibres en PVA est linéaire jusqu'à environ 300 kN, ensuite le soulèvement et la fissuration du parapet amènent un changement de rigidité jusqu'à 325 kN. Il est important de mentionner que c'est dans cette zone de chargement (50 à 300 kN) que le préchargement avec la butée indésirable a eu lieu et a légèrement modifié la rigidité (Annexe C). La plastification des armatures verticales à l'interface parapet-dalle survient à ce niveau de charge. Ensuite la force continue d'augmenter jusqu'à 350 kN avec l'écrouissage des armatures verticales. Enfin, le déchargement est effectué pour éviter d'endommager l'instrumentation. Le comportement du parapet avec coque en BFUP avec

fibres en acier est très similaire à celui avec des fibres en PVA. Cependant, le changement progressif de rigidité entre 50 et 300 kN est plus graduel. Le niveau de résistance atteint par les 2 parapets hybrides, soit 480 kN, est largement supérieur à la force de conception pondérée de 227 kN exigée par le code CSA S6-19 (2019). Bien que le parapet avec coque en BFUP avec fibres en PVA a été préchargé et que son comportement varie entre 50 et 300 kN, le comportement d'ensemble est similaire à celui avec coque en BFUP avec fibres en acier.

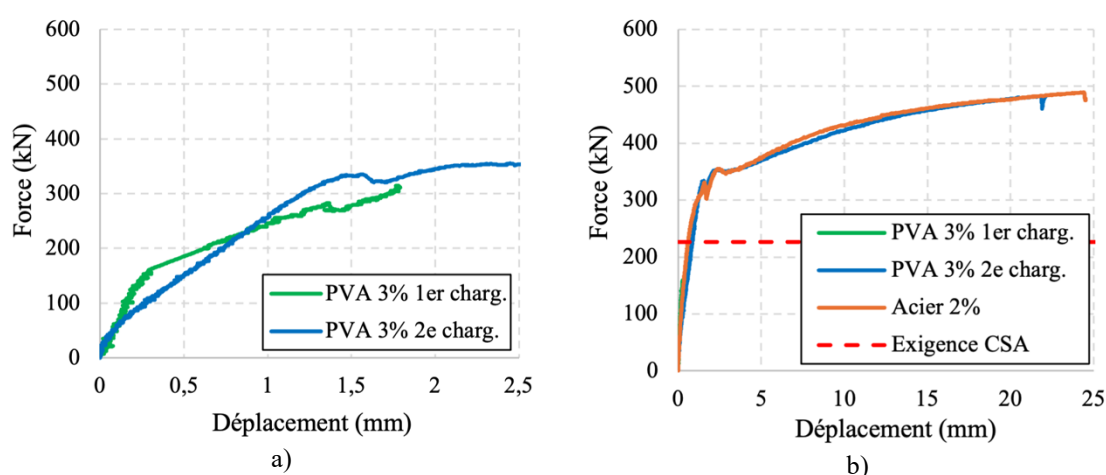


Figure 4-53 Force déplacement des parapets hybrides, a) BFUP PVA 3 % 1^{er} et 2^e chargement (zoom), b) BFUP PVA 3 % et acier 2 %

La Figure 4-54 illustre le comportement force-soulèvement des deux parapets hybrides. La Figure 4-54a montre le soulèvement du parapet avec coque en BFUP avec fibres en PVA pour les deux chargements. Cette figure illustre l'effet du blocage du soulèvement par la butée indésirable lors du premier chargement. Lors du deuxième chargement, le soulèvement reprend la même tendance que le premier chargement à partir de 300 kN. La Figure 4-54b compare le soulèvement des deux parapets hybrides. Le comportement d'ensemble est comparable. Cependant, le parapet avec coque en BFUP avec fibres en PVA se soulève moins que le parapet avec coque en BFUP avec fibres en acier parce qu'il a été légèrement pré-endommagé à la suite du premier chargement. En effet, le premier chargement avait légèrement ouvert l'interface dalle-parapet.

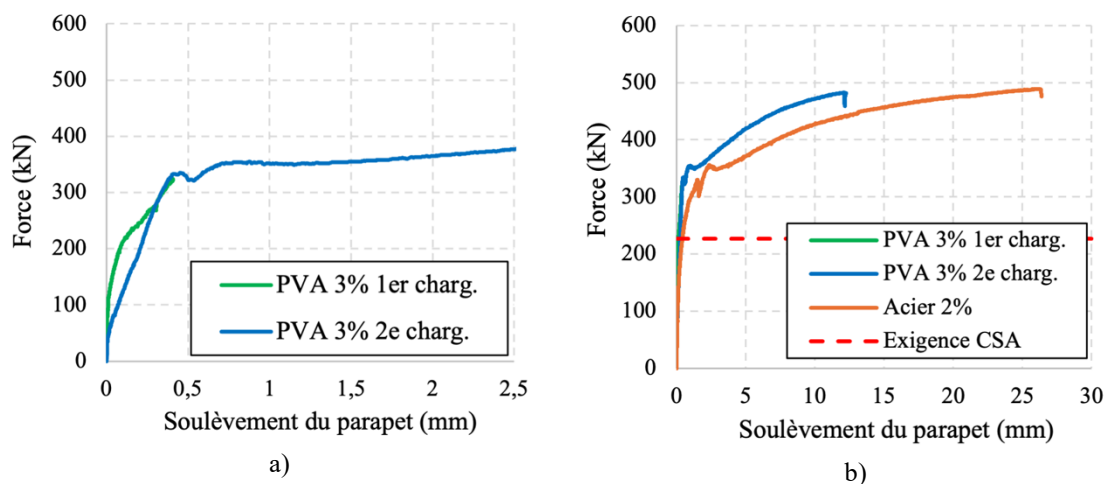


Figure 4-54 Soulèvement des parapets hybrides, a) BFUP PVA 3 % 1^{er} et 2^e chargement (zoom), b) BFUP PVA 3 % et acier 2 %

La Figure 4-55 illustre le mode de rupture final pour les deux parapets, soit le soulèvement à l'interface parapet-dalle et la plastification des armatures verticales à cet endroit. Il s'agit du même mode de rupture que pour un parapet en BHP conventionnel. L'analyse des patrons de fissuration à la section suivante complète la description de l'endommagement des parapets au cours des essais.



Figure 4-55 Mode de rupture final des parapets hybrides avec coque en, a) PVA 3%, b) Acier 2%

La Figure 4-56a présente la déformation dans la barre verticale du parapet avec fibres synthétiques, les jauges du parapet avec fibres en acier ayant été endommagées. La jauge

est à 90 mm au-dessus de l'interface parapet-dalle. Il est donc considéré que l'armature verticale a plastifié vers 330 kN directement à l'interface.

La Figure 4-56b illustre la déformation dans les barres horizontales dans le haut des deux parapets hybrides. La déformation en traction est très similaire pour les deux parapets et elle demeure faible à cet endroit. Ce résultat s'explique par la flexion longitudinale développée à l'arrière de la plaque de chargement.

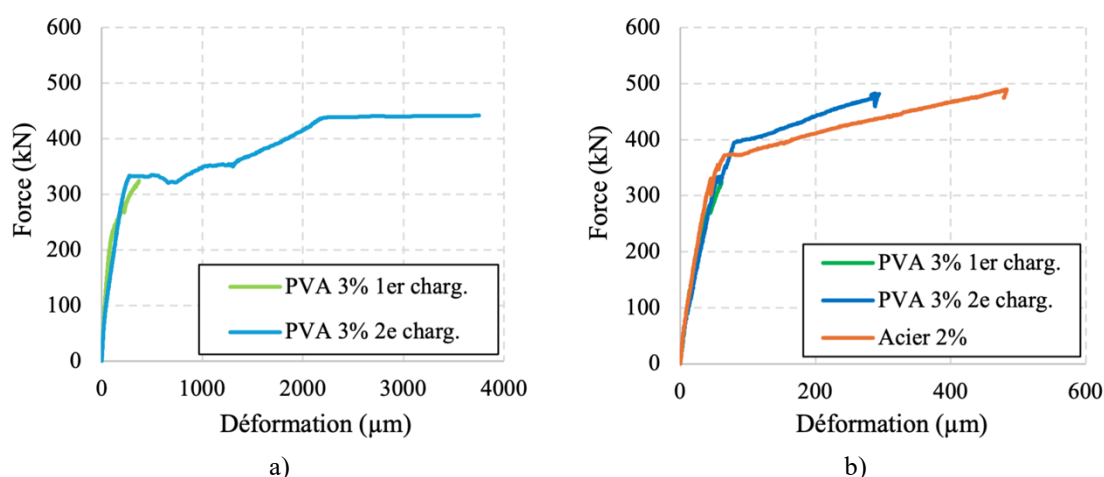


Figure 4-56 Déformation dans les barres pour les parapets hybrides, a) Barre horizontale, b) Barre verticale

Les déplacements de la dalle sont présentés à l'Annexe C. La dalle du parapet est très bien fixée sur la dalle du laboratoire pour les deux essais. Le déplacement de la dalle ne dépasse pas 50 μm dans les directions verticale et horizontale.

4.3.5.3 Fissuration et délamination

La Figure 4-57 illustre les patrons de fissuration observés par les SIC pour la charge de 90 kN, la charge ultime (227 kN) et la charge de 425 kN du parapet avec coque en BFUP avec fibres en PVA. De petites microfissures discontinues apparaissent avant 90 kN au changement de section de la face avant, ensuite des macrofissures continues sont clairement visibles à 227 et 425 kN.

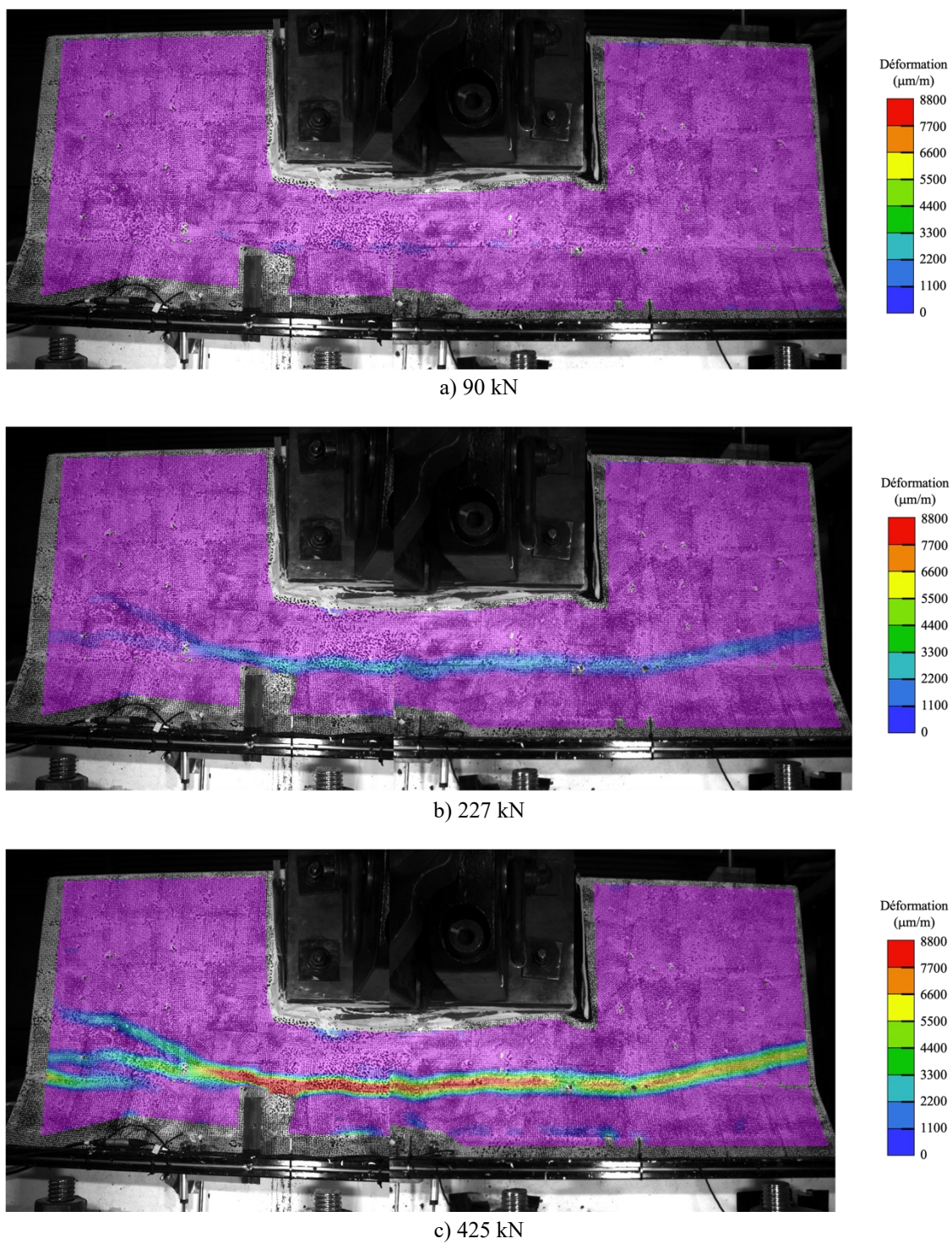


Figure 4-57 Patron de fissuration pour le parapet BFUP PVA 3%

La Figure 4-58 illustre l'évolution des ouvertures de fissures tel que mesuré par le SIC selon la force. La position des mesures des ouvertures est indiquée à la Figure 4-58a. Il importe de mentionner que plusieurs points de mesure de fissures représentent la même fissure pour identifier l'ouverture maximale. La coque en BFUP avec fibres en PVA montre une première fissure environ à 80 kN. Elle atteint une ouverture de 0.1 mm à 200 kN, soit légèrement avant d'atteindre la charge ultime de conception de 227 kN. La fissure maximale atteinte à la fin de l'essai est de 0.6 mm.

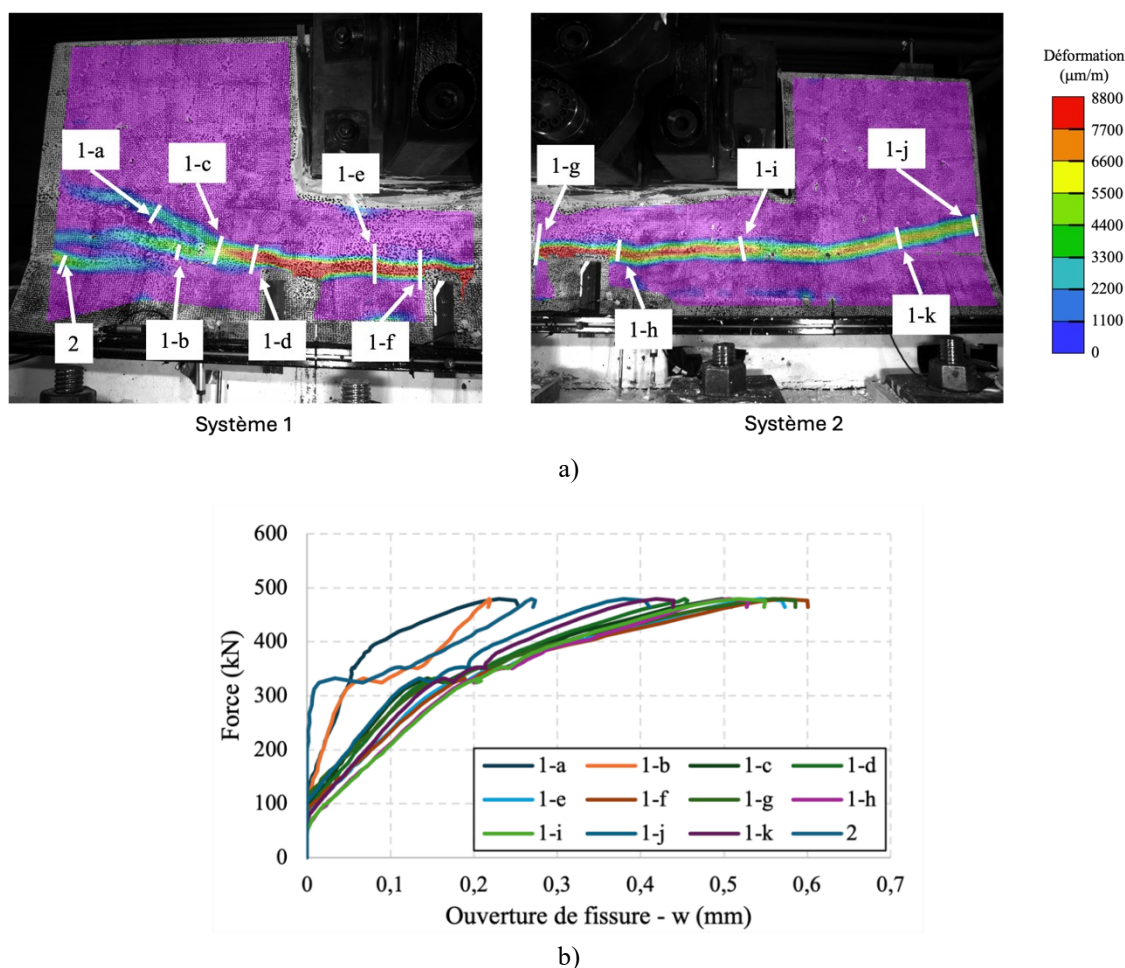


Figure 4-58 Ouverture des fissures principales mesurées avec DIC pour le parapet en BFUP PVA 3%,
a) Position de la mesure des fissures, b) Ouvertures de fissures

La Figure 4-59 illustre le patron de fissuration pour une charge de 90 kN, la charge ultime (227 kN) et la charge de 425 kN du parapet avec coque en fibre en acier. Ce matériau

permet d'obtenir plus de microfissuration en comportement pré-pic tel que discuté à la Section 4.3.1 sur le comportement en traction. Le parapet comporte quelques microfissures à proximité du changement de section, elles sont très discontinues à 90 et 227 kN. Des macrofissures continues apparaissent seulement sur la figure illustrant le niveau de chargement à 425 kN.

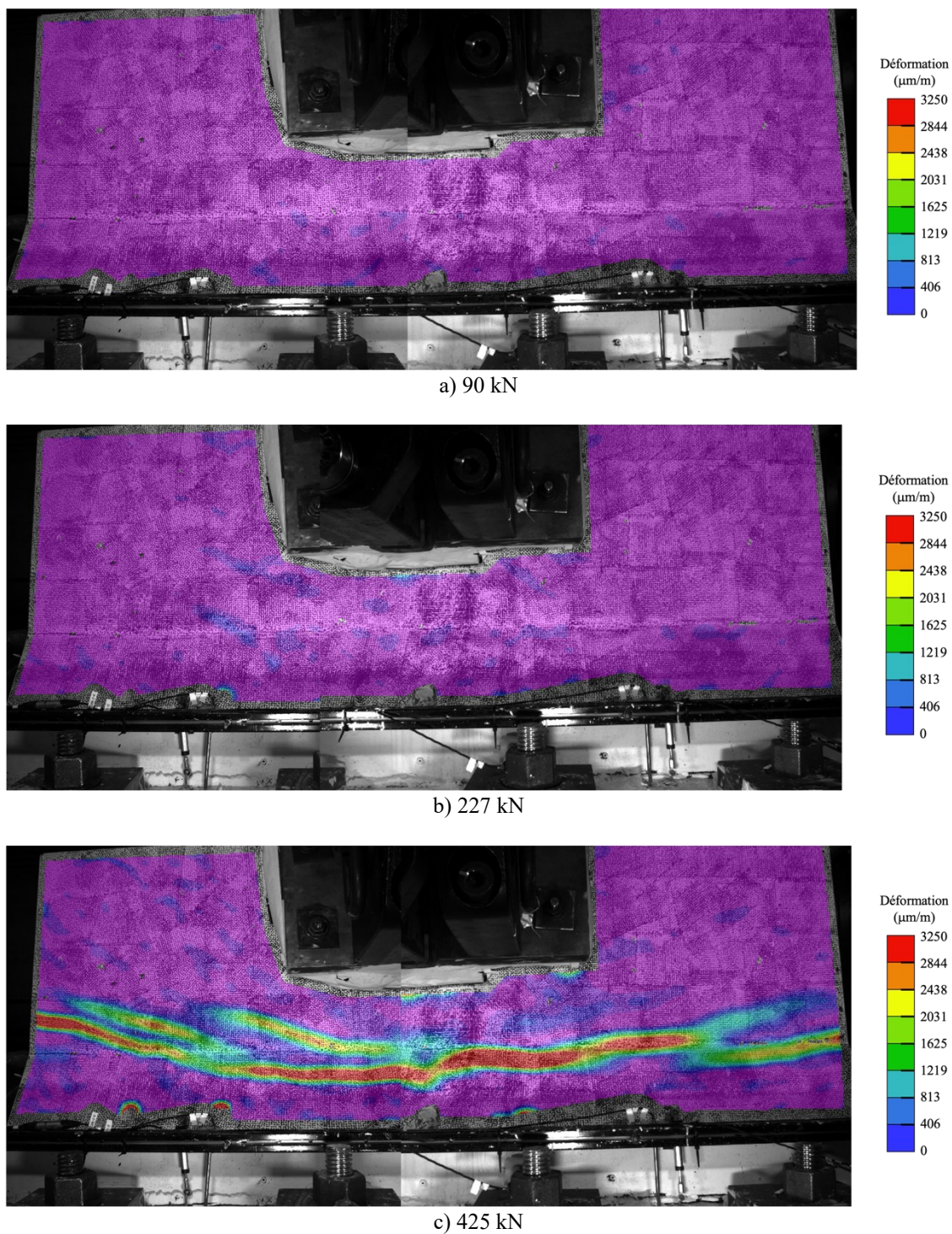


Figure 4-59 Patron de fissuration pour le parapet BFUP acier 2%

La Figure 4-60 illustre l'évolution des ouvertures de fissures mesurées par le SIC selon la force pour le parapet avec fibres en acier. À nouveau, l'ouverture est mesurée à plusieurs

positions de la même fissure pour intercepter le maximum. Les ouvertures mesurées sont inférieures à 0.1 mm jusqu'à 300 kN, il y a donc que des microfissures jusqu'à un niveau de charge supérieur à celui de conception à 227 kN. Une première macrofissure continue d'ouverture supérieure à 0.1 mm est notée à 300 kN. Il s'agit d'une différence marquée avec le parapet avec fibres en PVA qui présente une macrofissuration à partir de 200 kN. L'ouverture de fissure maximale à la fin de l'essai est de moins de 0.35 mm.

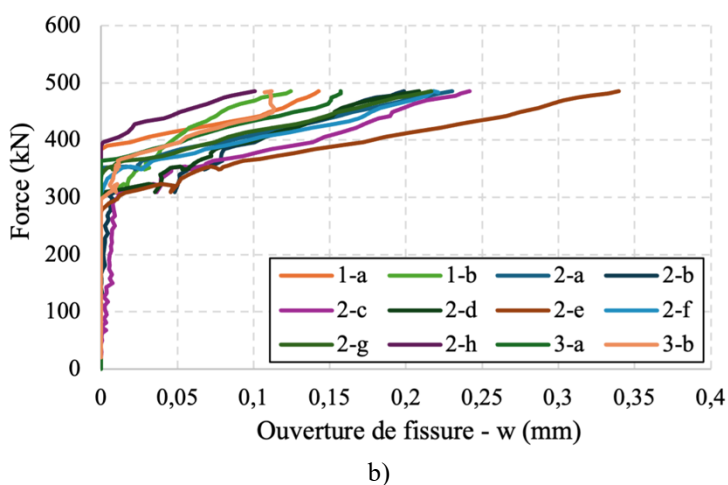
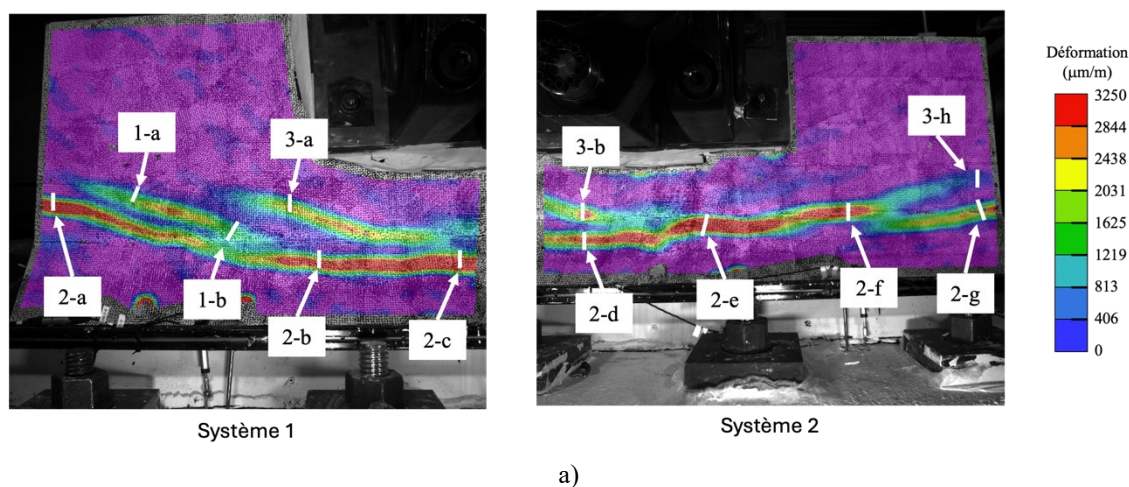


Figure 4-60 Ouverture des fissures principales mesurées avec DIC pour le parapet en BFUP acier 2%,
a) Position de la mesure des fissures, b) Ouvertures de fissure

En conclusion, la fissuration observée dans les parapets hybrides, à part le soulèvement à l'interface parapet-dalle, demeure uniquement de la microfissuration jusqu'à un niveau de

charge de 90 kN. Ceci devrait certainement assurer une durabilité prolongée aux parapets hybrides par rapport aux parapets coulés en place avec des macrofissures en service dû aux effets du retrait restreint.

La délamination entre le cœur en BO et la coque en BFUP était une préoccupation importante pour identifier le besoin ou non d'ajouter des clés de cisaillement entre les deux composantes des parapets. La Figure 4-61 illustre la délamination pour le parapet avec coque en BFUP avec fibres en PVA. La délamination est très faible et demeure inférieure à 10 μm , ce qui signifie que l'interface reste dans le domaine élastique pour tout l'essai.

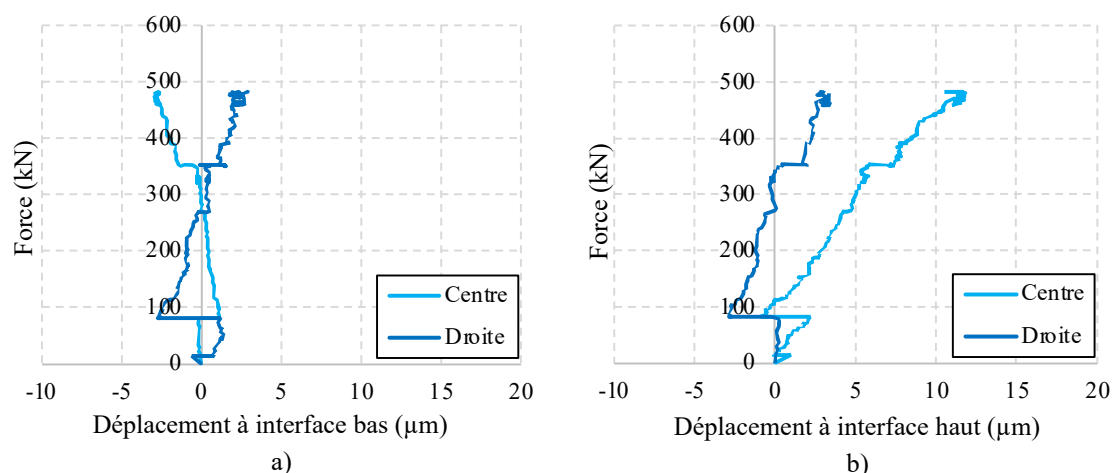


Figure 4-61 Déplacement à l'interface entre le cœur et la coque du parapet PVA 3 %, a) En bas du parapet, b) En haut du parapet

La Figure 4-62 illustre la délamination pour le parapet avec coque en BFUP avec fibres en acier. La délamination est légèrement plus élevée que celle du parapet avec coque en BFUP avec fibres en PVA en atteignant 20 μm . À nouveau, l'amplitude de déplacement est reliée surtout à un déplacement élastique.

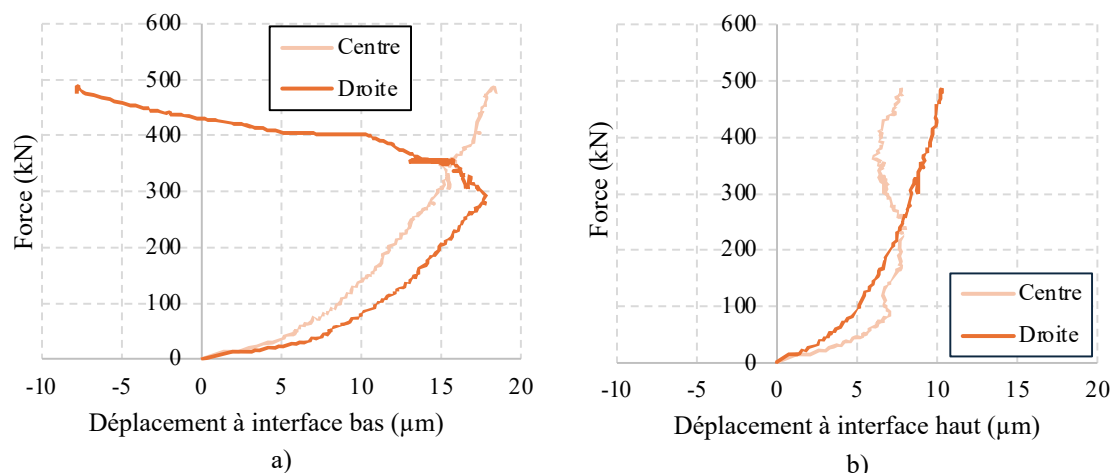


Figure 4-62 Déplacement à l'interface entre le cœur et la coque du parapet Acier 2 %, a) En bas du parapet, b) En haut du parapet

4.4 Synthèse

D'abord, un programme expérimental préliminaire est réalisé pour vérifier la faisabilité de l'écoulement du BFUP dans les coques minces et pour caractériser le comportement en traction des BFUP. Les essais d'écoulement de BFUP indiquent que des coques de 20 et 30 mm sont réalisables. Cependant, la coque de 30 mm est retenue pour tenir compte que le BFUP pourrait être moins maniable ou plus visqueux lors de la production de la coque, que l'utilisation d'un retardateur de prise réduira de 2-3 mm l'épaisseur, et pour conserver une bonne marge de résistance pour le démoulage et la manutention.

Ensuite, le programme expérimental principal vise à caractériser les matériaux utilisés pour la production des parapets hybrides et à valider les phases de productions d'un parapet hybride avec coque en BFUP et vérifier les performances.

Premièrement, les bétons et le BFUP avec fibres en acier présentent des comportements mécaniques en compression et en traction comme attendu. Les BFUP avec fibres en acier montrent un écoulement important en traction. La vitesse de chargement de l'essai en traction est modifiée pour le BFUP avec fibres en PVA pour mesurer plus précisément le comportement prépic. Les fibres en PVA permettront finalement au béton d'avoir un comportement écoulement de faible amplitude en contrainte, mais avec une très grande capacité de déformation. Les fissures créées sont de l'ordre de macrofissure avec des pertes

de charge plus notables que pour les fibres en acier. La résistance maximale pour le BFUP avec 3 % de fibres en PVA est plus de 50 % plus faible que le BFUP avec 2 % de fibres en acier, alors que la déformation d'écroutissage est 1.75 à 3 fois plus grande.

Deuxièmement, la fabrication des coques en BFUP soulève les défis de production de coques minces. Il faut éviter les surfaces parallèles dans les coffrages qui créent beaucoup de frottement lors du démoulage. Il faut prévoir des points de fixation sur le moule ou sur la coque en BFUP pour retirer les parties du moule intérieures ou extérieures. La coque en BFUP avec fibres en PVA est endommagée lors du démoulage à cause d'un démoulage hâtif. Elle est réparée par injection d'époxy afin d'être conservée dans le programme expérimental. Une grande partie du retrait du BFUP de la coque est restreint par le moule (60 % pour la coque avec fibres en acier et 20 % pour celle avec fibres en PVA). Cependant, aucune fissuration de retrait n'a été observée.

Troisièmement, le remplissage des coques en BFUP avec le BO se déroule sans difficulté. Les coques sont très rigides et elles ne sont pas endommagées par la pression de remplissage du BO. Les armatures sont facilement enrobées par le BO. Cette phase n'est pas critique dans la production de parapets hybrides.

Finalement, les essais structuraux sur les parapets hybrides installés sur une dalle de pont sont réalisés. Les parapets atteignent 480 kN et résistent largement à la charge ultime pondérée de conception exigée par la norme CSA S6-19 (2019) de 227 kN. La délamination observée dans la conception n'est pas observée durant les essais structuraux, ce qui démontre que l'interface coque-cœur est plus performante qu'attendu. Le mode de rupture des deux parapets est similaire. Un soulèvement progressif dans l'interface dalle/parapet est observé et des fissures de flexion apparaissent au changement de section. La résistance est contrôlée par la plastification des armatures à l'interface dalle-parapet. La fissuration principale observée dans les deux parapets hybrides et à l'interface dalle-parapet. La fissuration dans les coques en BFUP est quant à elle inférieure à 0.1 mm jusqu'à 300 kN pour le parapet avec fibres en acier et jusqu'à 90 kN pour celui avec fibres en PVA. Ceci devrait assurer une durabilité prolongée pour les parapets par rapport aux parapets coulés en place conventionnels qui présentent des macrofissures dues aux effets de retrait restreint.

CHAPITRE 5 ÉTUDE NUMÉRIQUE

Ce chapitre porte sur la reproduction numérique des résultats d'essais en laboratoire à l'aide des modèles numériques mis à jour avec les lois de comportement des matériaux mesurées au laboratoire et la géométrie corrigée des parapets. Par la suite, quelques études paramétriques sont réalisées avec les modèles calibrés afin de mesurer l'effet de certains paramètres sur le comportement des coques ou des parapets hybrides. Ce chapitre décrit donc la reproduction du comportement des parapets hybrides pour les 3 cas de chargement :

- Cas de chargement 1 – Retrait restreint de la coque en BFUP;
- Cas de chargement 2 – Remplissage de la coque en BFUP avec du BO;
- Cas de chargement 3 – Essai structural sur le parapet hybride.

5.1 Changements dans la géométrie

La coque en BFUP considérée en conception est une simplification de celle utilisée au laboratoire. Certaines modifications ont été apportées dans la géométrie :

- ajout des trous de remplissage dans la coque;
- ajout d'une surépaisseur dans la coque à proximité capteur SOFO;
- changement du profil de la coque à la face avant pour le démoulage.

Les trous de remplissages sont prévus dans la coque pour la remplir avec le BO (Figure 5-1). Ils doivent être considérés parce que les parois du moule créant ces trous ajoutent une restrainte additionnelle au retrait du BFUP. Les trous constituent aussi une zone de faiblesse dans la coque.

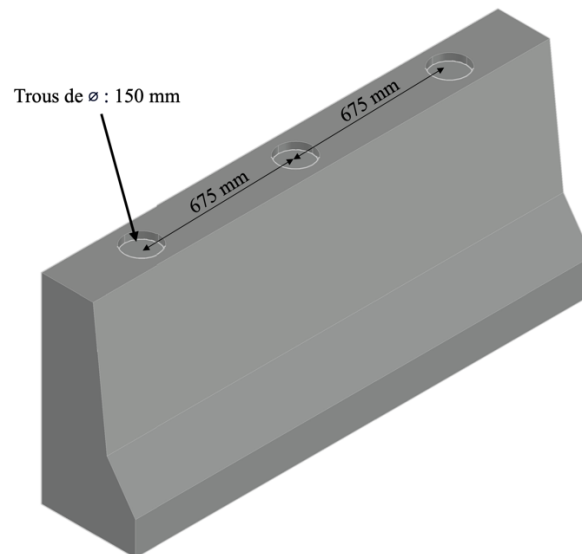


Figure 5-1 Position des trous de remplissage dans la coque

La légère surépaisseur à proximité du capteur à fibre optique SOFO ainsi que le changement de profil à la face avant de la coque (Figure 5-2) doivent être considérés dans les modèles puisqu'ils peuvent bonifier localement la résistance de la coque.

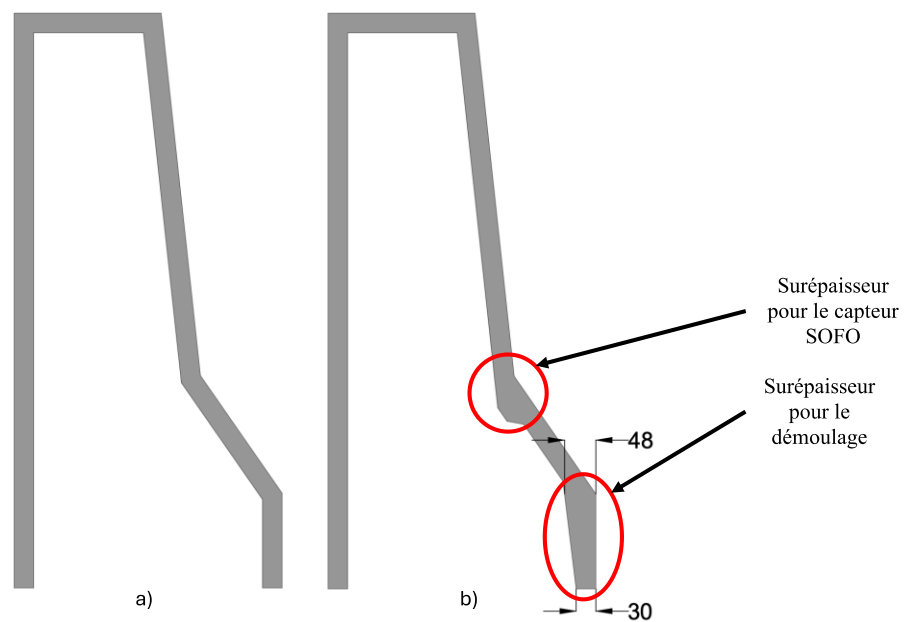


Figure 5-2 Modification de la coque, a) Géométrie initiale, b) Géométrie finale

5.2 Matériaux et interfaces

Les lois de comportement présentées au Chapitre 3 sont modifiées lorsque possible avec les courbes du comportement mesurées en laboratoire (Section 4.3.4).

La Figure 5-3 présente la loi de comportement en traction des BFUP simplifiée mesurée aux dates d'essais structuraux sur parapets à 90 et 113 jours. Celles-ci peuvent être considérées pertinentes respectivement pour les périodes de remplissage de la coque avec le BO et lors des essais structuraux pouvant représenter la mise en service du parapet. Malheureusement, il n'a pas été possible de réaliser des essais à 48 h dans la caractérisation finale pour caractériser le BFUP au démoulage, car de nombreuses activités devaient être réalisées à cette période. Les courbes en traction considérées à 2 jours sont donc celles mesurées lors du programme préliminaire. Une précision importante doit être apportée pour la loi de comportement en traction du BFUP avec fibres en PVA. Après de multiples vérifications dans les modèles numériques, il a été observé que la seule manière de reproduire correctement le comportement de ce matériau est de supprimer la phase écrouissante mesurée en laboratoire pendant laquelle des microfissures se forment. En effet, l'introduction de la phase d'écrouissage dans le comportement ne permet de reproduire que des microfissures. On n'observe ainsi pas les macrofissures qui se forment réellement pendant cette phase et donc le modèle néglige significativement les ouvertures de fissures.

La Figure 5-4 présente les mêmes lois de comportement en traction des BFUP avec une réduction des résistances et des déformations de 50 % qui sont considérées dans les modèles. La loi de comportement du BFUP est réduite afin de prendre en compte la densité et l'orientation réelle des fibres dans les spécimens en BFUP. En effet, la densité et l'orientation dans les essais de caractérisation sont considérées comme étant optimales. Or, dans les spécimens produits au laboratoire, ce n'est pas le cas à cause de la géométrie de la coque et de l'écoulement du BFUP lors de la production. Le code CSA S6-19 (2019) recommande donc une réduction de 50% pour des éléments de structure coulés en 2 dimensions (un mur par exemple). L'ouverture de fissure mesurée n'est pas réduite.

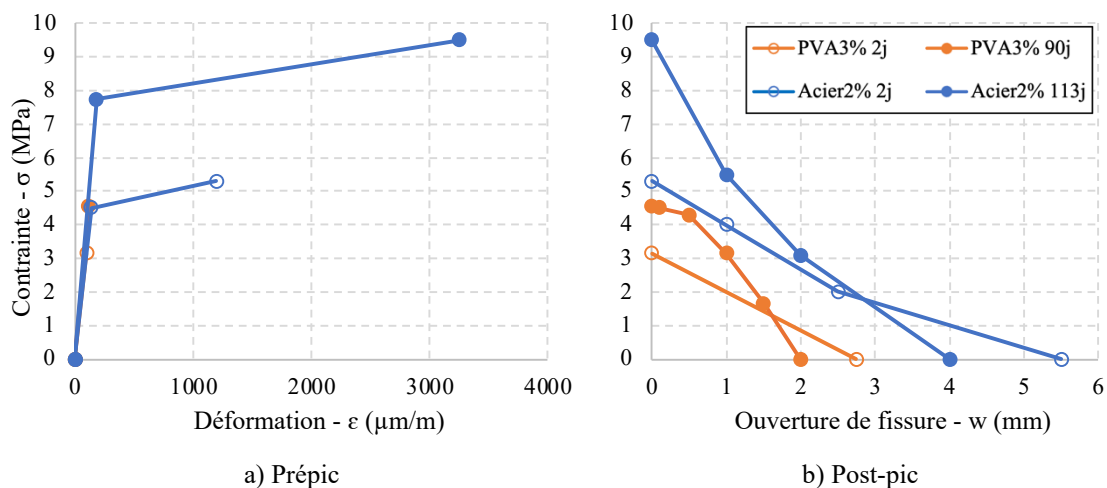


Figure 5-3 Comportement en traction simplifié des BFUP

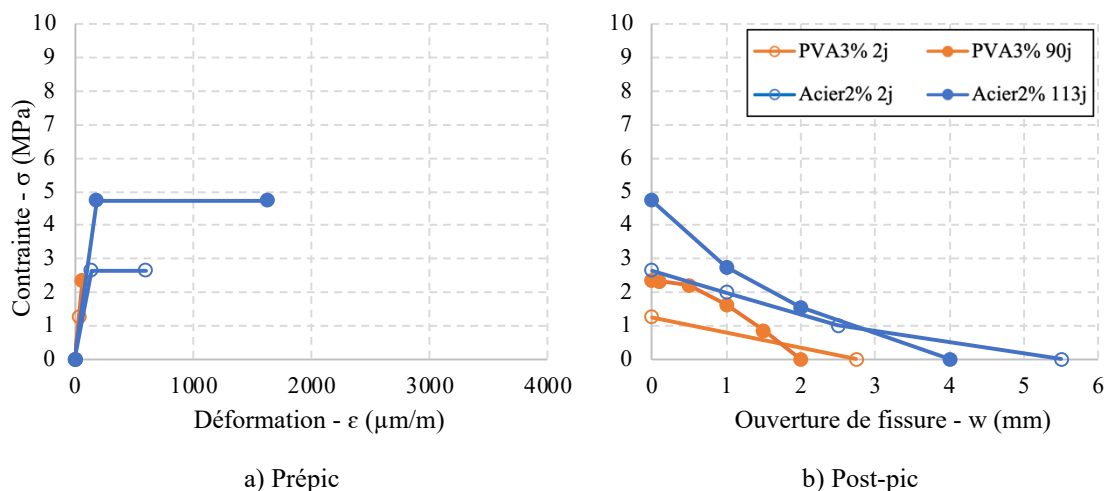


Figure 5-4 Comportement en traction simplifié et réduit de 50 % des BFUP

Les caractéristiques des interfaces sont les mêmes qu'en conception (Section 3.3.2). Selon les résultats expérimentaux, aucun déplacement à l'interface cœur/coque n'est observé. L'interface retenue dans les modèles de paramétrisation est donc l'interface normale cœur/coque au lieu de l'interface réduite.

Les lois de comportement des armatures sont aussi ajustées avec les comportements mesurés des armatures en laboratoire lors de la caractérisation finale (Section 4.3.2).

5.3 Cas de chargement 1 – Retrait restreint de la coque en BFUP

Pour l'étude du retrait restreint de la coque, l'estimation en conception était que le BFUP présenterait entre 200 et 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ de retrait libre jusqu'au démoulage de la coque. Les résultats des essais en laboratoire indiquent que les BFUP avec fibres en acier et en PVA ont atteint respectivement 700 et 1200 $\mu\text{m}/\text{m}$ de retrait libre (Figure 4-41). Cependant, comme mentionné à la Section 4.3.3.3, seulement une portion de ce retrait est effective dans les coques. Le retrait effectif expérimental est de 46 et 130 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour la coque en BFUP avec fibres en acier et celle avec fibres en PVA, respectivement.

Les modèles seront soumis à 1200 $\mu\text{m}/\text{m}$ de retrait libre, une valeur nettement supérieure à ce qui est mesuré en laboratoire pour vérifier l'endommagement de la coque à la bonne amplitude de retrait (Tableau 4-11) et aussi pour l'éventualité qu'un BFUP avec davantage de retrait soit utilisé pour la production des coques.

5.3.1 Présentation du modèle

La Figure 5-5 présente la séparation en macro-éléments et le maillage du modèle. Les trous de remplissage, la surépaisseur de la coque près du capteur SOFO et le profil de la géométrie inférieure sont modélisés. À nouveau, le chanfrein de rayon de 13 mm est ajouté dans le coffrage intérieur pour réduire la fissuration dans les coins de la coque (Figure 3-15).

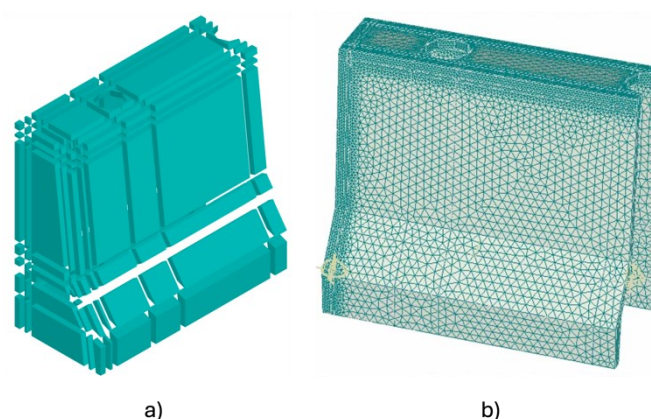


Figure 5-5 Modèle pour étudier le retrait restreint de la coque, a) Macro-éléments, b) Maillage

Les conditions limites pour le modèle sont les mêmes que lors de la phase de conception (Chapitre 3).

5.3.2 Résultats

La Figure 5-6 illustre le comportement de la coque en BFUP selon l'amplitude du retrait. Pour un retrait libre appliqué de 1200 $\mu\text{m/m}$, le retrait effectif mesuré est d'environ 900 $\mu\text{m/m}$ ce qui signifie que 25 % du retrait est restreint. La fissuration grimpe rapidement pour un retrait libre de 1200 $\mu\text{m/m}$ jusqu'à respectivement 0.95 et 0.6 mm pour les coques en BFUP avec fibres en PVA et en acier. Cependant, le retrait qui est survenu entre le début de l'échauffement et le démoulage est inférieur à 130 $\mu\text{m/m}$. Les modèles indiquent que les coques sont seulement microfissurées ($w \leq 0.1$ mm) pour des retraites libres appliqués jusqu'à 350 $\mu\text{m/m}$. Les résultats des modèles sont donc cohérents avec ce qui est observé au laboratoire puisqu'aucune fissure n'a été observée au démoulage des coques.

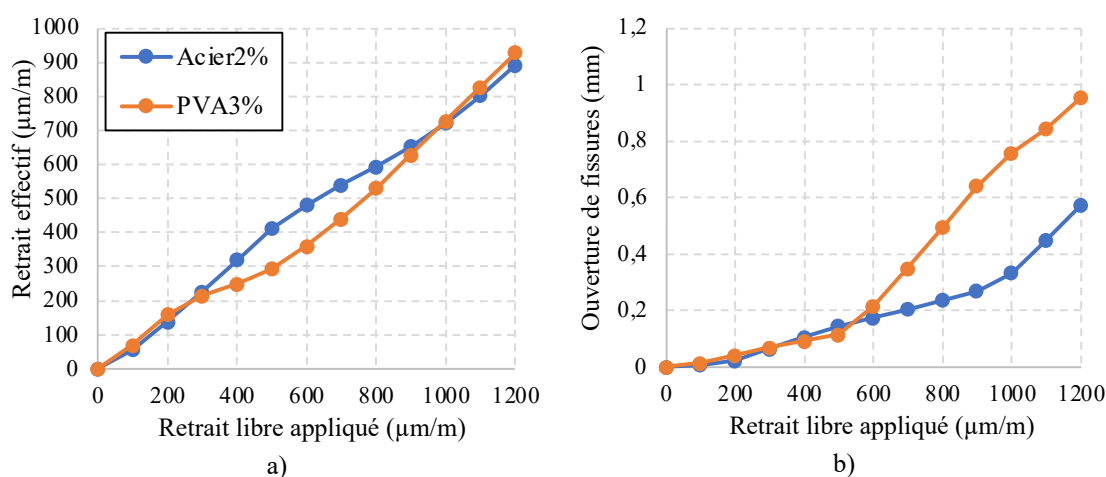


Figure 5-6 Retrait de la coque selon le type de fibres dans le BFUP, a) Retrait effectif, b) Ouverture de fissure selon le retrait libre appliqué

La Figure 5-7 illustre la microfissuration obtenue numériquement pour le retrait libre mesuré au laboratoire qui agit sur le BFUP durci. La microfissuration est très faible pour les deux modèles pour des retraites très faibles.

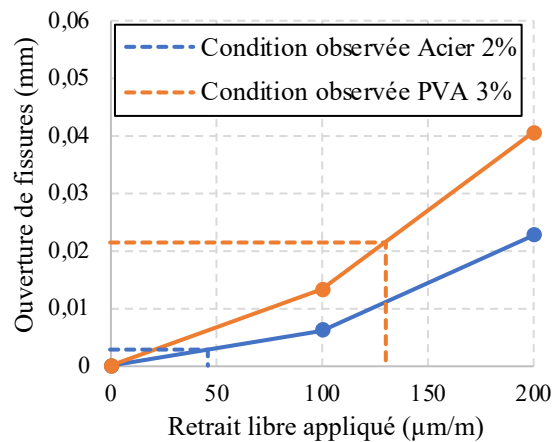


Figure 5-7 Microfissuration déterminée avec les modèles pour le retrait expérimental mesuré

La Figure 5-8 présente le patron de fissuration dans les coques avec fibres en acier et avec fibres en PVA pour un retrait de 200 $\mu\text{m/m}$. La microfissuration est située dans les extrémités de la coque où la restrainte est importante.

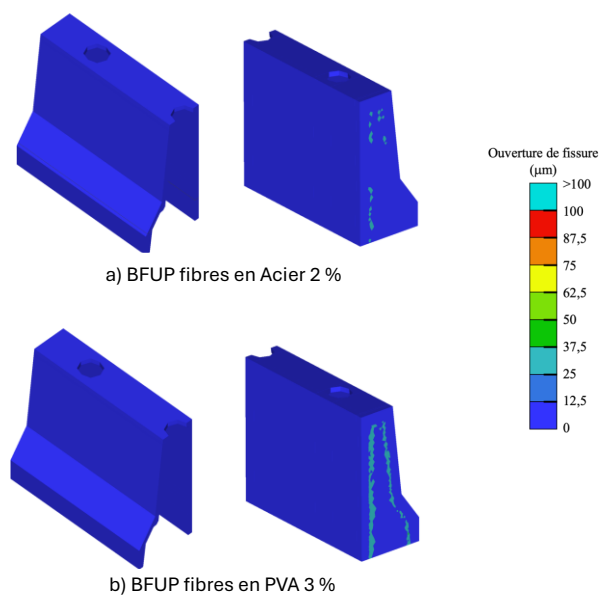


Figure 5-8 Fissuration due au retrait observée dans les coques de 30 mm

5.3.3 Conclusion

Pour un retrait libre survenu entre le début de l'échauffement et le démoulage, les modèles indiquent que les coques sont seulement microfissurées. Les modèles permettent donc de bien reproduire les résultats obtenus au laboratoire. Il faut cependant être prudent dans la fabrication de coques minces, car des BFUP avec des retraits libres plus importants pourraient endommager les coques et réduire leur étanchéité. Ces résultats rappellent l'importance de mettre les chanfreins dans le moule et de procéder à un démoulage hâtif dans la production de coques minces.

5.4 Cas de chargement 2 – Remplissage de la coque

Cette section a pour objectif de reproduire le remplissage de la coque en BFUP par le BO.

5.4.1 Présentation du modèle

La Figure 5-9 illustre le modèle utilisé pour modéliser le remplissage. Le remplissage est simulé avec la même méthode qu'en conception, c'est-à-dire que le chargement hydrostatique triangulaire du béton est simplifié par des rectangles équivalents.

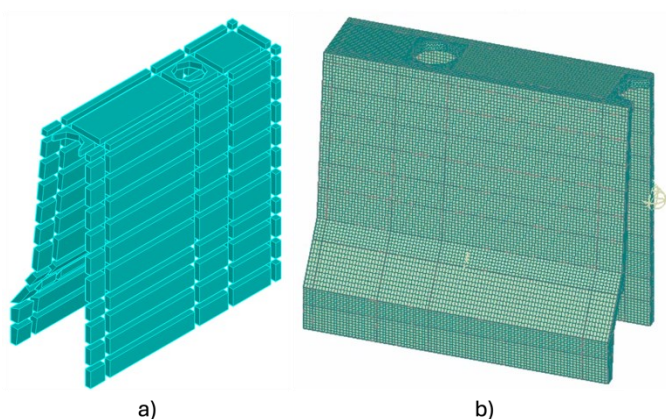


Figure 5-9 Modèle pour étudier le remplissage de la coque avec le BO, a) Macro-éléments, b) Maillage

Le déplacement vertical de la coque est bloqué sur la surface verte dans la Figure 5-10. Le déplacement horizontal (hors plan) en jaune dans la Figure 5-10 est aussi bloqué, mais le

degré de blocage sera étudié par la suite dans l'étude paramétrique. La symétrie est conservée (en rouge sur la Figure 5-10).

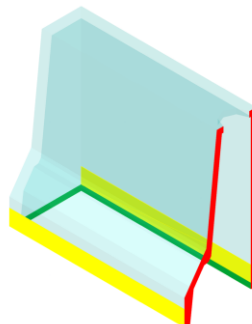


Figure 5-10 Conditions limites sur la coque pour le remplissage du béton

5.4.2 Résultats

La Figure 5-11 présente le déplacement hors plan et l'ouverture de fissure de la coque mesurée au centre de la surface droite dans le dos de la coque. Le déplacement de la coque hors plan est légèrement inférieur à 0.8 mm à la fin du remplissage dans les modèles. Le déplacement mesuré lors du remplissage de la coque au laboratoire était de 1 mm. Le blocage complet des déplacements sur le bas de la coque dans les modèles surestime donc la restrainte offerte par les madriers de fixation de la coque au laboratoire lors du remplissage. La fissuration des deux coques est très nettement inférieure à 0.1 mm, ce qui signifie que l'endommagement n'est pas significatif.

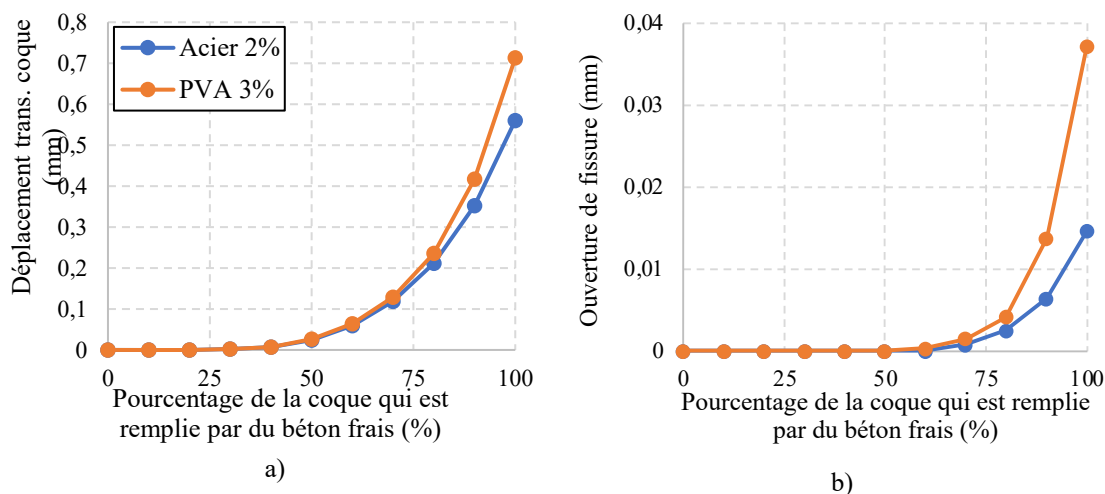


Figure 5-11 Comportement des différentes coques lors de leur remplissage avec du BO selon le BFUP, a) Déplacement transversal, b) Ouverture de fissure

5.4.3 Paramétrisation

Puisque le blocage complet des déplacements du bas de la coque sous-estime le déplacement hors plan, la restrainte est plutôt modélisée avec un ressort avec les propriétés du Tableau 5-1. Les propriétés du ressort sont obtenues avec itérations successives pour obtenir le même déplacement transversal de la coque expérimental et numérique. Ce ressort permet de reproduire la restrainte procurée par les madriers au laboratoire lors du remplissage avec le BO.

Tableau 5-1 Propriété du ressort

Déplacement relatif (m/m)	Contrainte (MPa)
-1	-1500
0	0
1	1500

La Figure 5-12 et la Figure 5-13 illustrent respectivement le comportement de la coque lors du remplissage avec le BO avec le ressort et avec le blocage complet pour la coque avec fibres en acier et la coque avec fibres en PVA. Le ressort permet de mieux reproduire le déplacement hors plan observé de 1 mm au laboratoire. La fissuration demeure toujours

nettement inférieure à 0.1 mm, ce qui signifie que le remplissage n'endommage pas la coque comme observé au laboratoire. La Figure 5-14 illustre la déformation de la coque lors du remplissage.

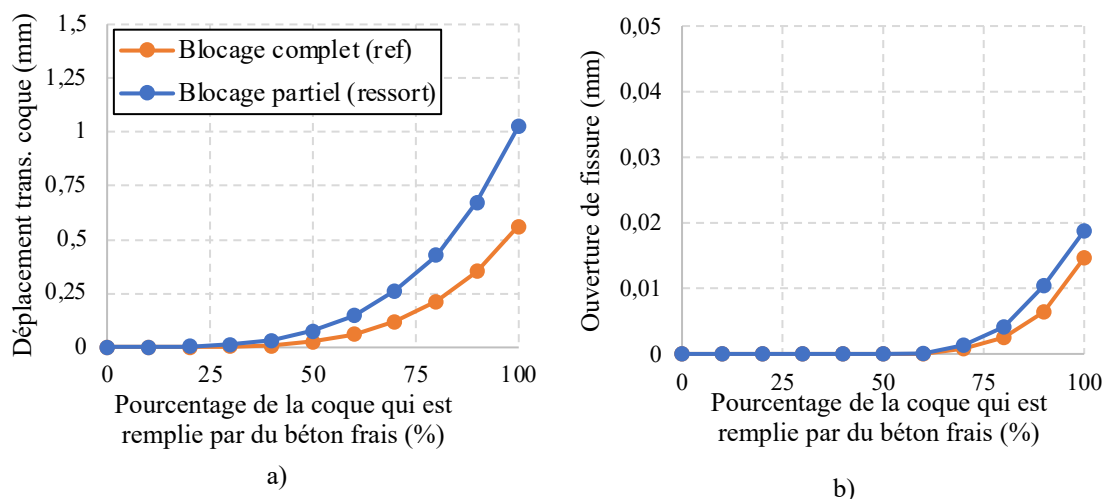


Figure 5-12 Comportement des différentes coques lors de leur remplissage avec du BO avec le BFUP avec fibres en acier pour les deux restreintes, a) Déplacement transversal, b) Ouverture de fissure

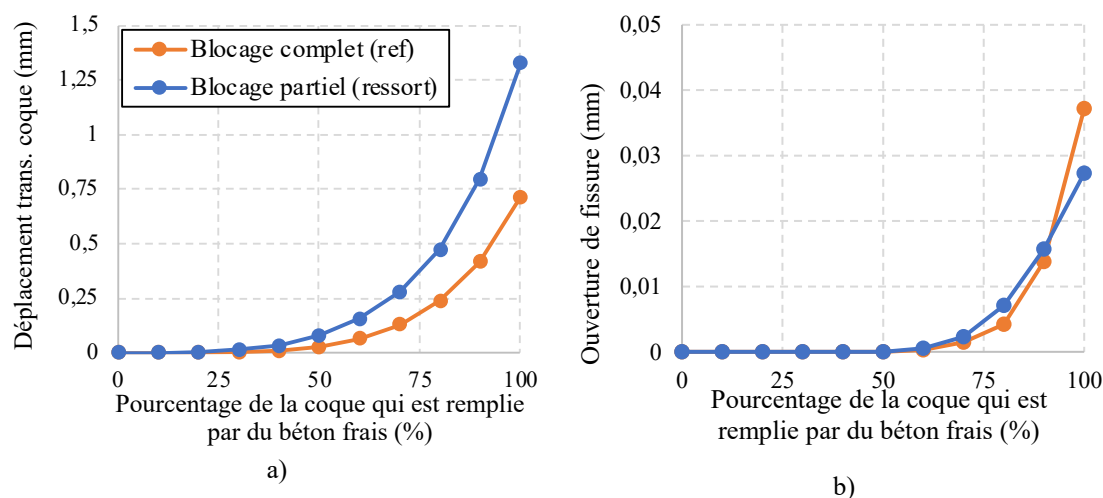


Figure 5-13 Comportement des différentes coques lors de leur remplissage avec du BO avec le BFUP avec fibres en PVA pour les deux restreintes, a) Déplacement transversal, b) Ouverture de fissure

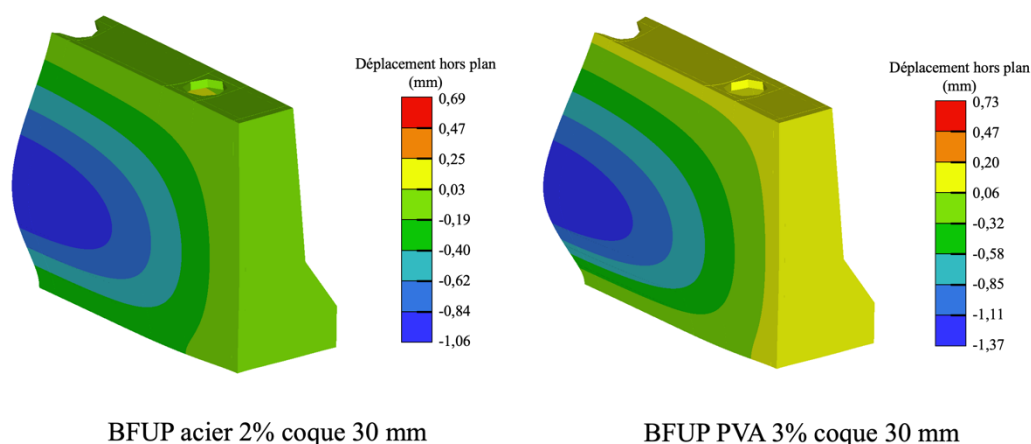


Figure 5-14 Déformation transversale lors du remplissage de BO en chantier

5.4.4 Conclusion

Le blocage partiel du déplacement horizontal à la base de la coque avec un ressort dans le modèle permet de reproduire le comportement de la coque lors du remplissage du BO observé au laboratoire. Les résultats du modèle indiquent que le remplissage induit un endommagement négligeable.

5.5 Cas de chargement 3 – Essais structuraux sur le parapet hybride

Cette section porte sur le développement de modèles qui visent à reproduire le comportement structural des parapets hybrides.

5.5.1 Présentation du modèle

La Figure 5-15 présente le modèle utilisé pour les deux parapets. Les capteurs sont placés aux mêmes endroits que les capteurs sur les spécimens. Pour ces modèles, les lois de matériaux ont été mises à jour avec celles mesurées au laboratoire et réduites de 50 % (Figure 5-4). L'interface entre le cœur et la coque retenue pour les premiers modèles est l'interface normale (non réduite), car aucun déplacement à l'interface n'a été mesuré au laboratoire (Tableau 3-4).

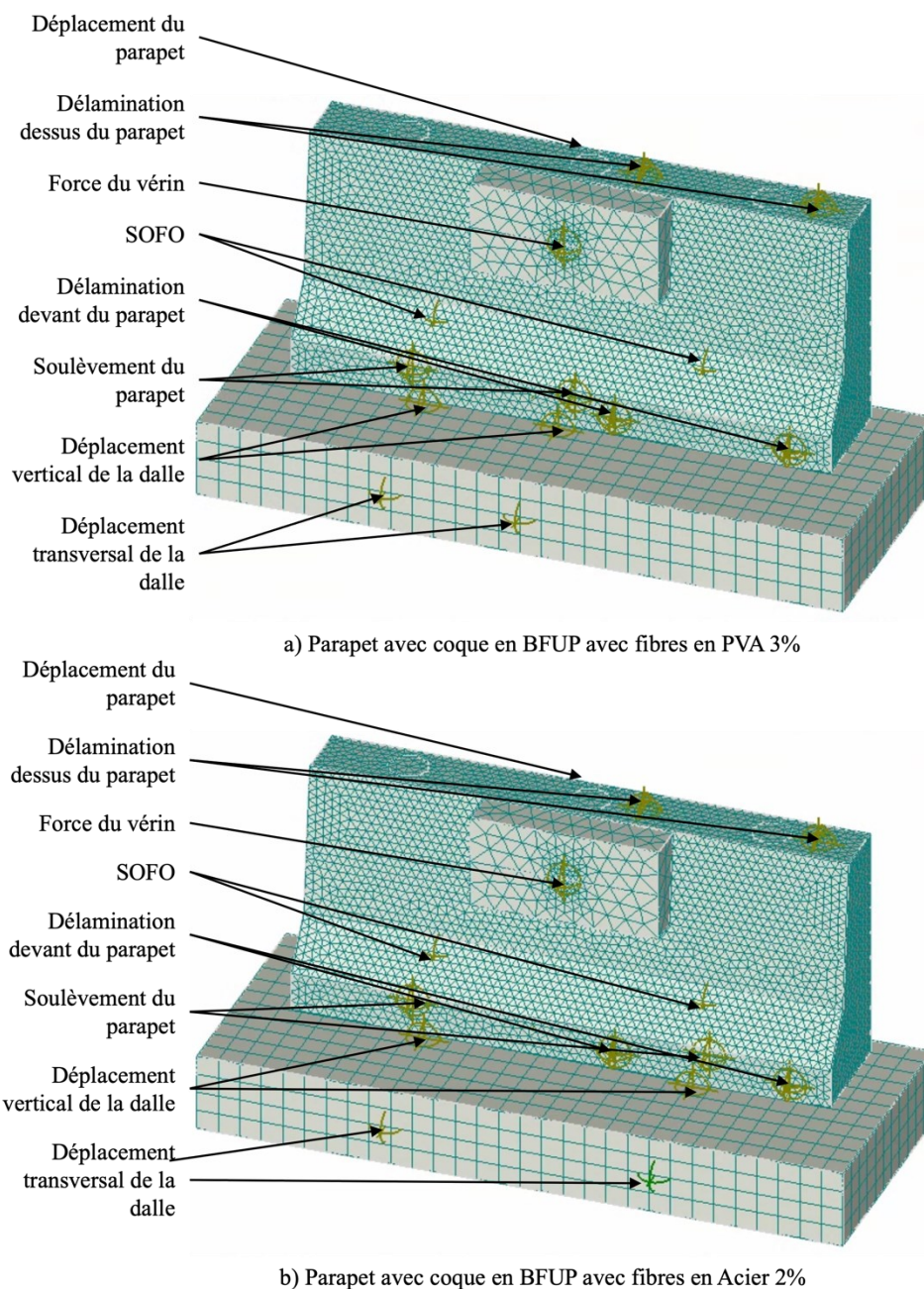


Figure 5-15 Modèles avec moniteurs

5.5.2 Comportement structural

La Figure 5-16 illustre le comportement force-déplacement des deux parapets hybrides. Les courbes numériques sont linéaires jusqu'à environ 150 kN, ensuite elles présentent une légère non-linéarité jusqu'à 300 kN où la force commence à se stabiliser avec la plastification des armatures. Les modèles numériques convergent difficilement et s'arrêtent

à la plastification des armatures, car le soulèvement du parapet devient important. La résistance de 355 kN est atteinte à 5.7 mm pour le parapet avec coque avec fibres en acier alors qu'elle atteint 340 kN à 5.5 mm pour celui avec fibres en PVA. Les courbes numériques sont très similaires aux courbes expérimentales. Le moment de fissuration est très bien reproduit, la rigidité en condition fissurée est légèrement inférieure pour le parapet avec coque en BFUP avec fibres en acier et, enfin, la capacité à la fissuration est un peu sous-estimée. La rigidité numérique est moindre que celle expérimentale. Ceci peut être relié aux propriétés d'interface ou à une réduction un peu trop forte de la loi de traction des BFUP. Ces points sont étudiés dans une prochaine section.

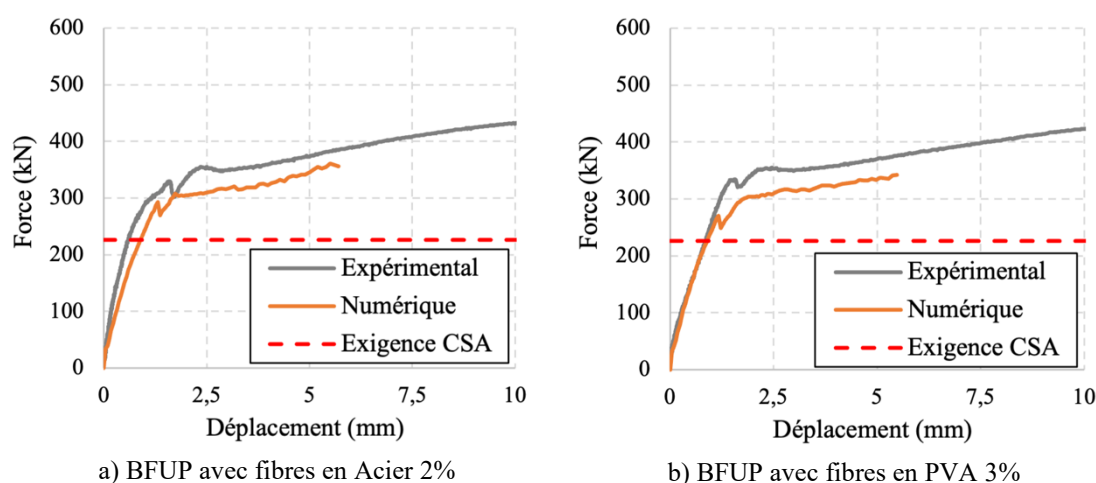


Figure 5-16 Comportement structural des parapets hybrides

La Figure 5-17 illustre la force appliquée en fonction du soulèvement du parapet par rapport à la dalle de pont. Le comportement numérique est similaire à celui expérimental jusqu'à 200 kN, ensuite le soulèvement est un peu surestimé pour le parapet avec fibres en PVA. Globalement, le soulèvement des parapets est bien reproduit jusqu'à la fin de la convergence des modèles à 2.5 mm.

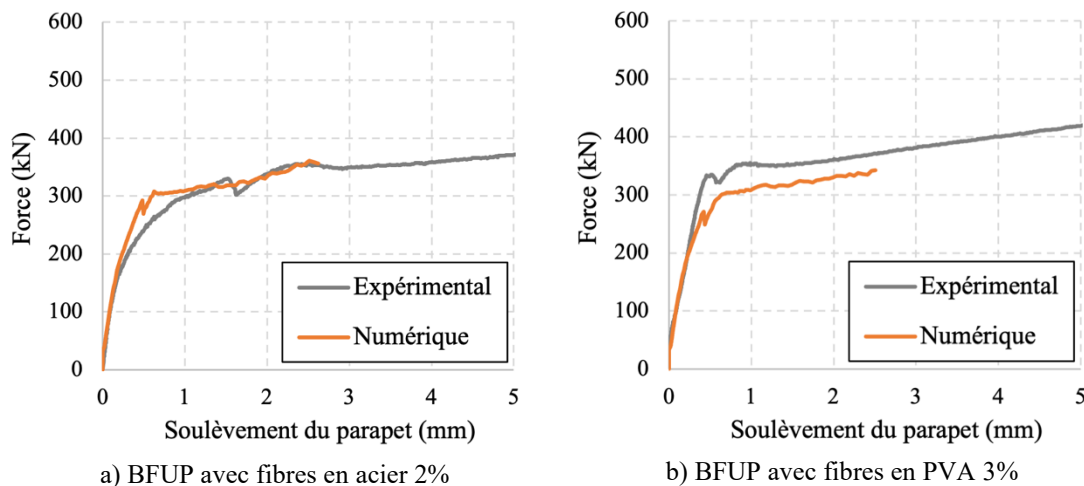


Figure 5-17 Soulèvement des parapets hybrides

5.5.3 Fissuration et délamination

La Figure 5-18 illustre le déplacement numérique mesuré entre la coque en BFUP et le cœur en béton en deux endroits des parapets. Le déplacement avec la loi d'interface normale entre le cœur et la coque est d'environ 0.1 mm à 300 kN. Il augmente rapidement à partir de près de 300 kN jusqu'à presque de 0.3 mm. Il pourrait donc s'agir d'une faible délamination. Aucun déplacement notable n'est noté lors des essais sur les spécimens (Figure 4-61 et Figure 4-62). Il est donc probable que la loi d'interface entre la coque en BFUP et le cœur soit plus faible qu'elle ne l'est dans le parapet.

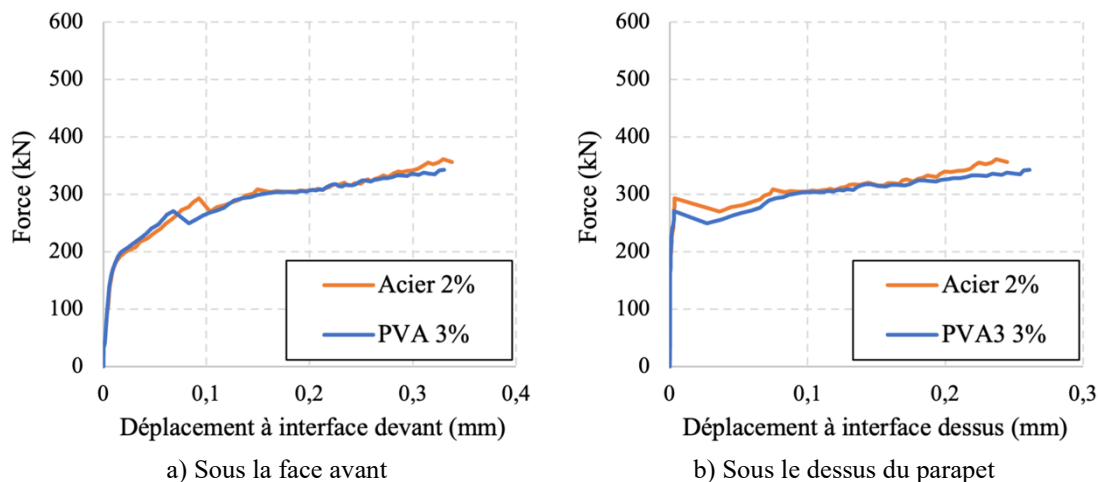


Figure 5-18 Déplacement à l'interface entre le cœur et la coque selon la force appliquée sur les parapets hybrides

La Figure 5-19 présente l'ouverture de fissure maximale mesurée sur la face avant des deux types de parapets hybrides. La fissuration des modèles se produit à la bonne force pour les deux types de parapets. L'ouverture de fissure numérique reproduit très bien celle mesurée expérimentalement pour le parapet avec fibres en acier. Cependant, l'ouverture est nettement sous-estimée pour le parapet avec coque avec fibres en PVA.

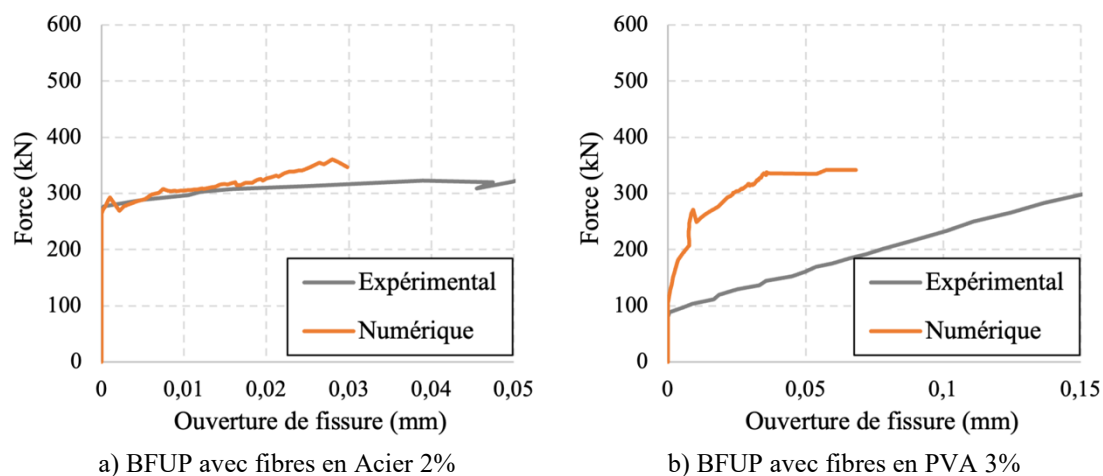


Figure 5-19 Ouverture de fissure selon la force appliquée sur les parapets hybrides

La Figure 5-20 présente le patron de fissuration à la face avant de la coque en BFUP avec des fibres en acier et du cœur en BO à la force de conception ultime et à la plastification des armatures. La Figure 5-21 montre les résultats pour celui avec fibres en PVA. L'emplacement des fissures au changement de section des modèles numériques est similaire à ce qui était observé expérimentalement sur les coques. On constate qu'il n'y a que des microfissures dans les coques. Cependant, on constate qu'il y a des macrofissures dans les cœurs en BO. Les coques en BFUP pontent donc bien les fissures pour garantir une excellente durabilité même après un chargement atteignant la plastification des armatures.

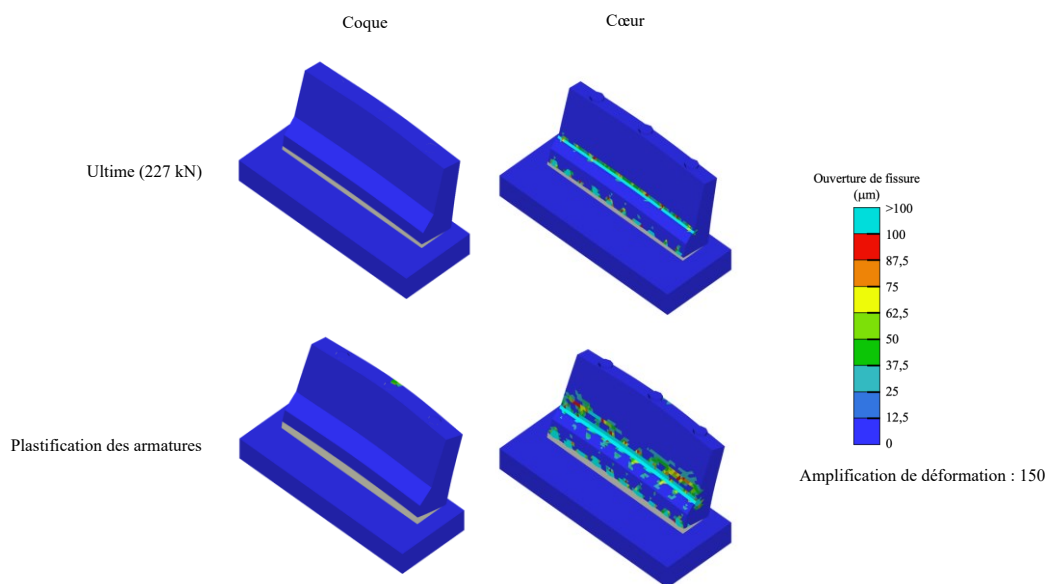


Figure 5-20 Patron de fissuration pour le parapet avec coque avec fibres en acier

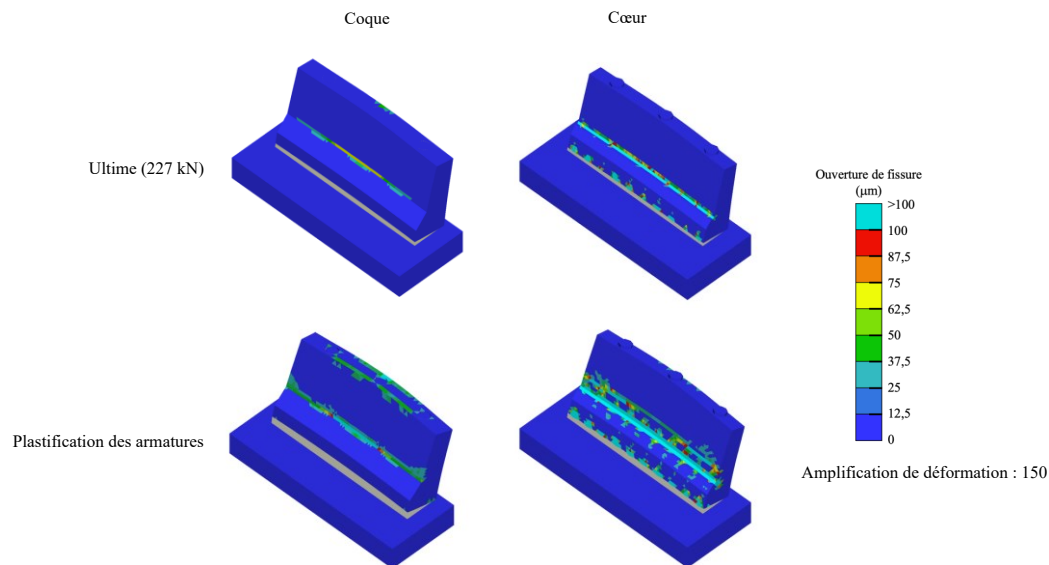


Figure 5-21 Patron de fissuration pour le parapet avec coque avec fibres en PVA

5.5.4 Étude paramétrique

Cette section décrit quelques études paramétriques réalisées avec les modèles de parapet hybride. Les paramètres étudiés sont les propriétés d'interface, la réduction sur la loi de comportement en traction des BFUP et la diminution de la résistance à la compression du cœur en BO.

5.5.4.1 Propriétés d'interface cœur-coque

Les résultats expérimentaux indiquent que la délamination entre le cœur en BO et la coque en BFUP est négligeable, seulement les déplacements élastiques sont notés. Ceci s'explique par le fait que la surface intérieure de la coque en BFUP est rugueuse dû à l'utilisation d'un retardateur de prise et du nettoyage au jet d'eau après le démoulage de l'intérieur de la coque. Les aspérités à la surface de la coque agissent comme des blocages mécaniques. Les modèles présentés dans cette section visent à étudier l'impact des propriétés d'interface dans l'éventualité que la préparation de surface de la coque ne permette pas d'atteindre les résultats de ce projet. Trois jeux de propriétés sont étudiés pour

l'interface coque/cœur, soit une interface parfaite, une interface normale et une interface réduite. Les propriétés de l'interface sont montrées au Tableau 3-4.

La Figure 5-22 illustre le comportement structural des parapets hybrides. L'interface normale affiche un comportement très près de ce qui est observé expérimentalement. La rigidité avant 250 kN est similaire. Après, la charge est légèrement sous-estimée par rapport aux essais, mais la rigidité est bien reproduite jusqu'à la rupture. L'interface parfaite permet d'obtenir une rigidité similaire jusqu'à 350 kN, ensuite la rigidité est surestimée. L'interface réduite permet d'avoir une rigidité similaire à celle de l'interface normale, mais une légère tendance à une réduction de force apparaît en fin de calcul. Le modèle qui semble le mieux reproduire le comportement observé expérimentalement est l'interface normale.

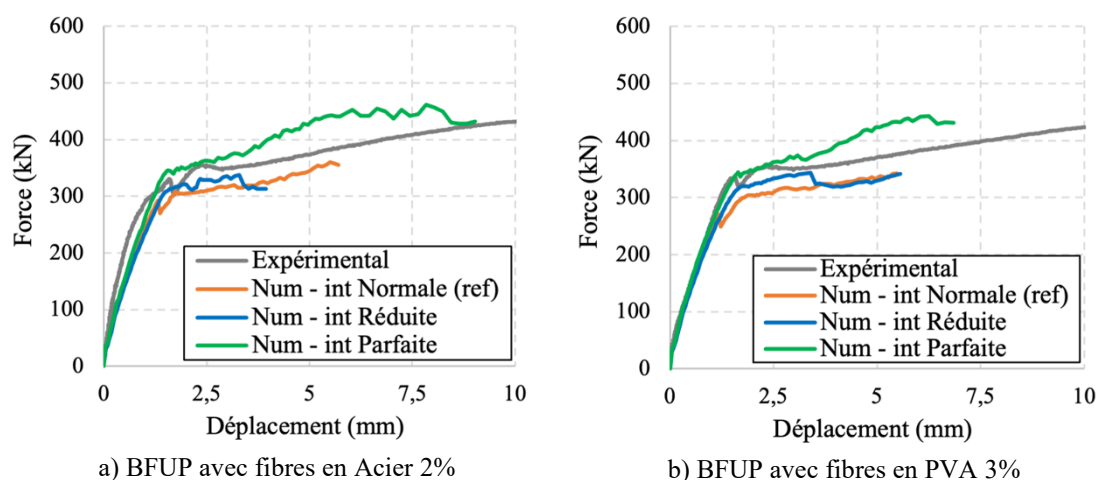


Figure 5-22 Comportement structural des parapets hybrides courbe force-déplacement selon la qualité de l'interface cœur-coque

La Figure 5-23 montre le déplacement à l'interface entre la coque en BFUP et le cœur en BO dans les parapets hybrides avec fibres en acier. Le déplacement à l'avant du parapet avec l'interface réduite augmente linéairement jusqu'à 300 kN à 0.1 mm et augmente rapidement jusqu'à 0.4 mm à la rupture. L'interface parfaite reproduit l'absence de déplacement à l'interface observé lors des essais. Le déplacement dans l'interface à l'avant du parapet est légèrement plus grand pour l'interface réduite par rapport à celle normale.

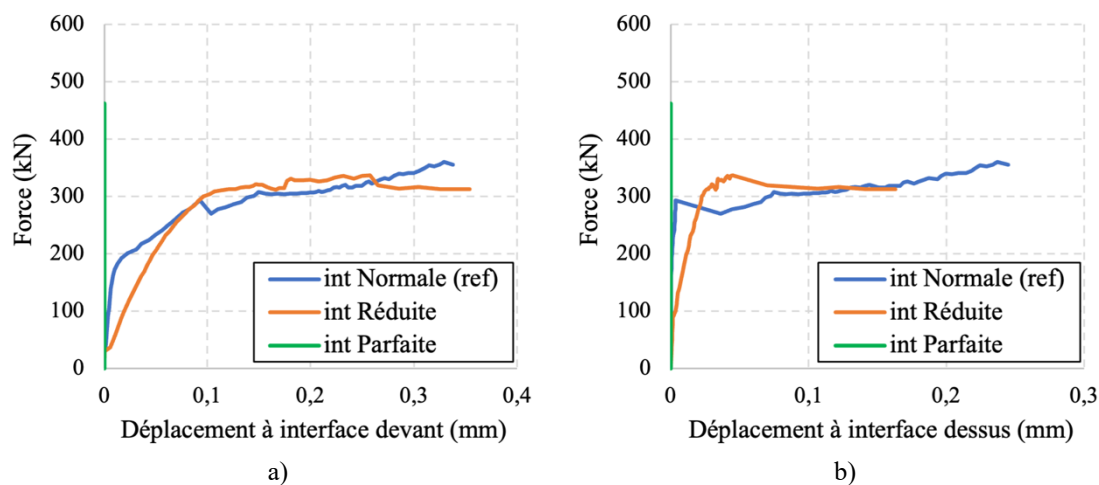


Figure 5-23 Déplacement à l'interface cœur-coque dans le parapet hybride avec coque avec fibres en acier selon la qualité de l'interface cœur-coque, a) Devant, b) Dessus

Pour le parapet avec coque en BFUP avec fibres en PVA, la Figure 5-24 illustre la fissuration à la face avant et au-dessus du parapet. L'interface parfaite reproduit l'absence de déplacement à l'interface tel qu'observé expérimentalement. L'interface, réduite et normale, reproduit le déplacement très faible jusqu'à 200 kN et, ensuite, l'interface normale s'ouvre plus rapidement à la face avant, tandis que l'interface réduite s'ouvre rapidement à partir de 300 kN.

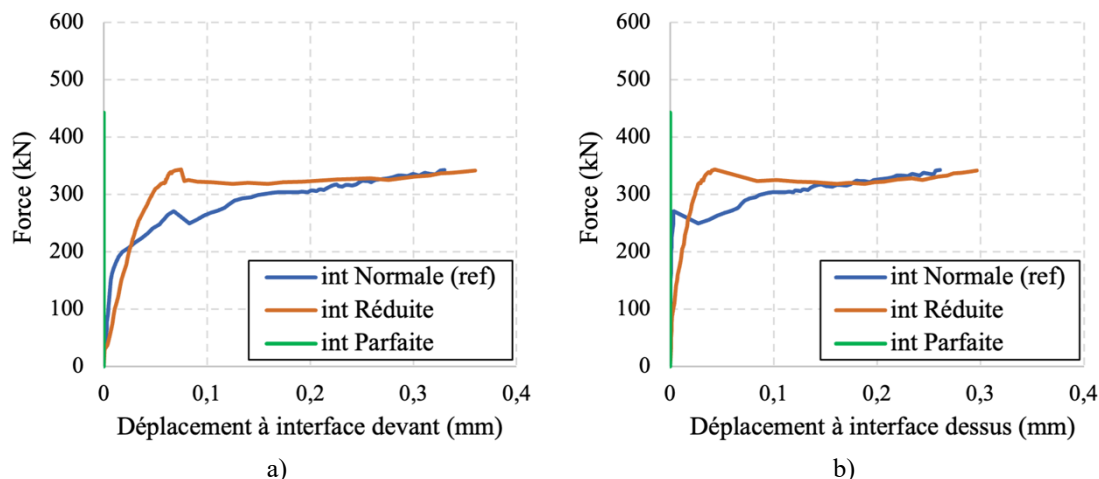


Figure 5-24 Déplacement à l'interface cœur-coque dans le parapet hybride avec coque avec fibres en PVA selon la qualité de l'interface cœur-coque, a) Devant, b) Dessus

5.5.4.2 Loi de comportement en traction du BFUP

En conception, la réduction sur les lois de comportement en traction des BFUP était de 25 % afin de comparer les modèles avec d'autres projets réalisés à Polytechnique Montréal (Damry et al., 2013; Duchesneau et al., 2011; Gendron et al., 2022) qui ont tous utilisé une réduction de 25 % sur leur loi de traction avec une bonne reproduction des résultats. Cependant, la norme recommande de réduire le comportement en traction de 50 % pour les spécimens coulés en deux dimensions. Cette section vise à déterminer la sensibilité de la réduction de la loi de traction des BFUP sur le comportement des parapets hybrides. Trois réductions sont modélisées dans cette section : une réduction de 25 %, une réduction de 50 % et aucune réduction pour évaluer l'effet de l'orientation des fibres dans les coques en BFUP. La Figure 5-22 illustre les lois de comportement des BFUP avec fibres en acier avec les différentes réductions et la Figure 5-26 et celles du BFUP avec les fibres en PVA.

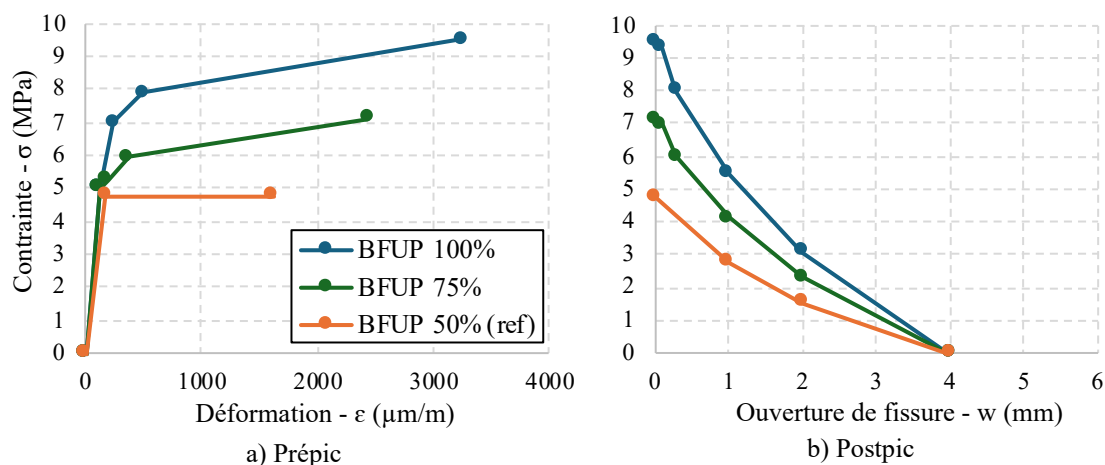


Figure 5-25 Loi de comportement en traction du BFUP avec fibres en Acier avec différentes réductions de performances

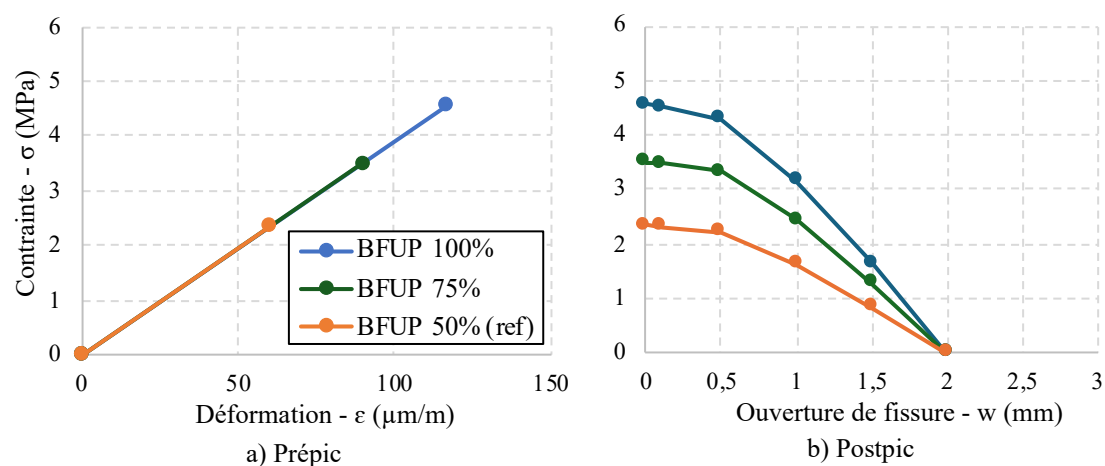


Figure 5-26 Loi de comportement en traction du BFUP avec fibres en PVA avec différentes réductions de performances

La Figure 5-27 illustre le comportement global des parapets hybrides. La résistance et la rigidité des parapets sont très peu impactées par l'utilisation de différentes lois de traction.

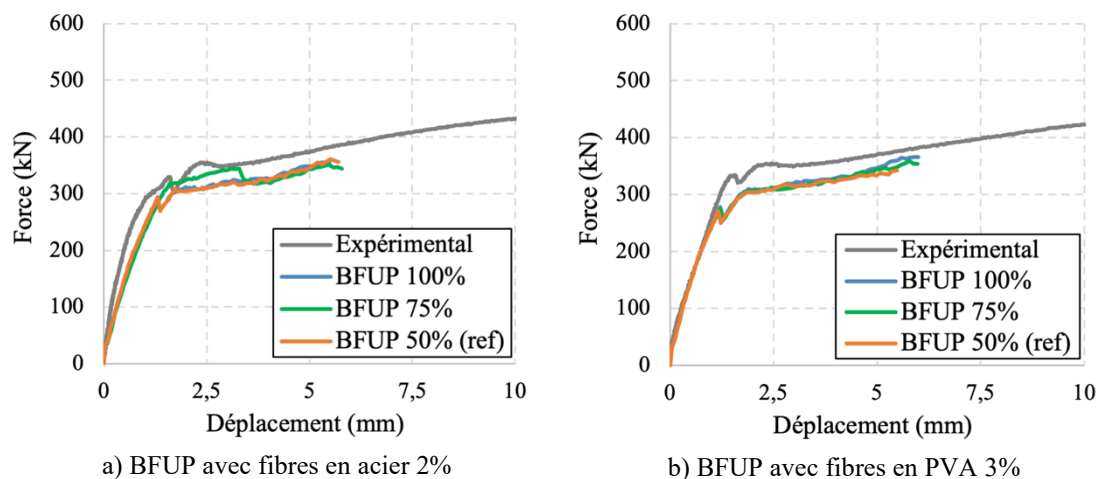


Figure 5-27 Comportement structural des parapets hybrides selon les différentes réductions de performances dans le BFUP

La Figure 5-28 illustre l'ouverture de fissure maximale dans la coque en BFUP avec les différentes lois de traction. Le modèle de parapet avec fibres en acier estime bien l'ouverture de fissure jusqu'à un chargement de 300 kN pour toutes les lois, mais après l'ouverture de fissure augmente sans augmenter la charge comme dans le spécimen expérimental. La réduction de 50 et 25 % permet de bien reproduire le comportement pour le BFUP avec fibres en PVA, car la fissure s'ouvre environ à la même charge. La réduction de 0 % sous-estime la fissuration.

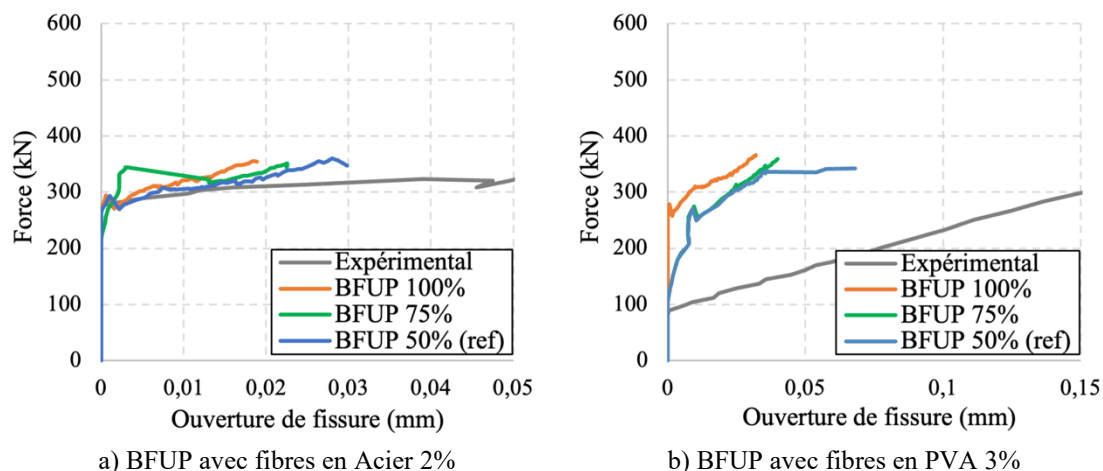


Figure 5-28 Ouverture de fissure des parapets hybrides courbe force-déplacement selon la réduction appliquée sur le BFUP

5.5.4.3 Résistance du béton du cœur

Le béton commandé pour la fabrication du cœur du parapet devait avoir une résistance de 35 MPa, alors qu'il avait une résistance de 47 MPa lors des essais. Pour la fabrication de parapets hybrides, il pourrait être intéressant d'avoir un béton avec une résistance encore plus faible, car il n'est plus exposé aux intempéries. Un béton moins résistant aurait moins de ciment. Il aurait ainsi une empreinte carbone plus faible et présenterait moins de retrait pour obtenir une excellente interface coque-cœur. Les modèles sont vérifiés avec un BO de résistance à la compression de 25 MPa.

La Figure 5-29 présente l'effet de la résistance à la compression du BO du cœur. La réduction de la résistance à la compression du BO ne semble pas influencer de manière significative le comportement du parapet. L'utilisation d'un BO avec une résistance à la compression plus faible avec moins de ciment semble une solution intéressante pour réduire l'impact environnemental de la fabrication de parapets hybrides avec coque en BFUP.

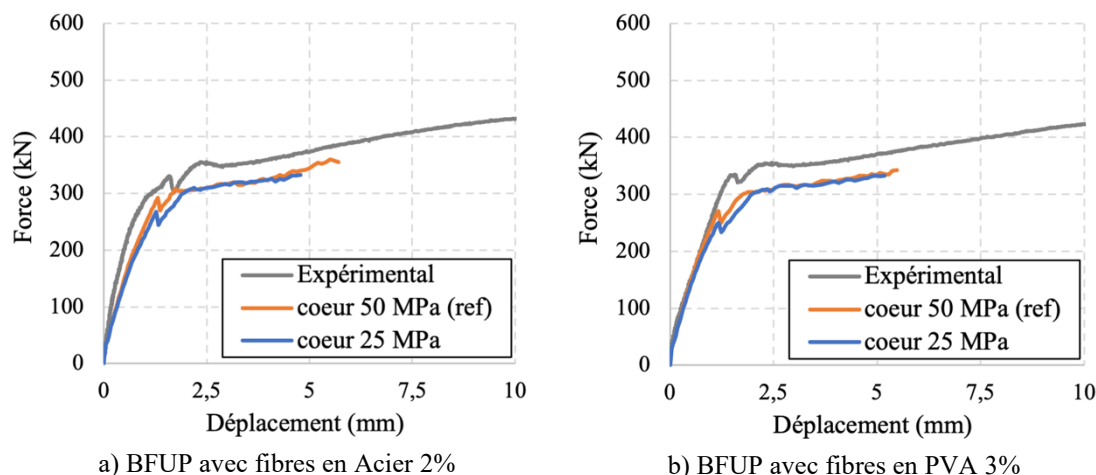


Figure 5-29 Comportement structural des parapets hybrides courbe force-déplacement selon la réduction appliquée sur le BFUP

5.5.5 Conclusion

Les modèles adaptés avec la géométrie finale, la loi de comportement des BFUP en traction réduite de 50 % et l'interface normale (non réduite) entre le cœur en BO et la coque en BFUP permettent de très bien reproduire l'évolution de la force, du déplacement, de l'ouverture de fissure et du soulèvement du parapet.

Quelques études sont menées en faisant varier des paramètres. L'étude sur l'influence de la loi d'interface permet de mieux comprendre le comportement de l'interface entre le cœur en BO et la coque. L'interface normale permet un bon compromis entre le comportement global force-déplacement et le déplacement de l'interface entre le cœur et la coque. La loi parfaite surestime le comportement structural et la loi réduite reproduit moins bien le déplacement à l'interface.

La réduction de la loi de traction du BFUP affecte peu le comportement du parapet hybride, car le mode de rupture est contrôlé par la plastification des armatures à la jonction parapet-dalle. Toutes les réductions reproduisent bien la fissuration dans les parapets, mais la réduction de 50 % permet de mieux obtenir la force requise pour la première fissuration dans le BFUP.

L'étude sur la résistance à la compression du BO du cœur permet de constater que le comportement du parapet hybride varie très peu, car il est contrôlé par la plastification des

armatures. Un BO avec une résistance à la compression de 25 MPa avec moins de ciment permettrait légèrement de réduire le coût et l’empreinte environnementale des parapets hybrides avec coques en BFUP.

5.6 Synthèse

Cette section présente les conclusions des modèles créés pour les 3 phases de chargement et des études paramétriques.

Les modèles développés pour reproduire le retrait restreint de la coque en BFUP démontre que les coques demeurent microfissurées pour un retrait libre appliqué de moins de 300 $\mu\text{m/m}$ entre le début de l’échauffement du BFUP et le décoffrage de la coque. Les modèles démontrent l’importance du décoffrage hâtif et de la présence de chanfreins dans les coins intérieurs des coques.

Les modèles développés sont adaptés pour reproduire l’effet du remplissage du BO dans la coque en BFUP et pour tenir compte du mode de fixation de la coque sur la dalle de pont. Le modèle permet de conclure que la fixation parfaite sous-estime le déplacement transversal lors du remplissage. Une étude paramétrique a permis de calibrer un ressort qui permettant de reproduire le déplacement transversal observé. La coque est microfissurée de manière négligeable lors du remplissage.

Les modèles développés pour prédire le comportement structural des parapets hybrides avec des lois de traction de BFUP réduites de 50 % et une interface entre le cœur et la coque en BFUP normale sont efficaces pour reproduire l’évolution de la force, le déplacement, l’ouverture de fissure et le soulèvement du parapet. Quelques études paramétriques sont réalisées en faisant varier les paramètres de l’interface coque-cœur, la réduction sur la loi du comportement en traction du BFUP et sur la résistance à la compression du BO du cœur. Le déplacement à l’interface cœur et coque est mieux représenté avec l’interface parfaite, mais le comportement force-déplacement est mieux reproduit avec l’interface normale. L’étude sur la loi de comportement en traction du BFUP permet de conclure que la réduction a peu d’impact sur le comportement global du parapet hybride. En effet, le mode de rupture du parapet hybride est contrôlé par la plastification

des armatures à la jonction dalle-parapet. La fissuration dans la coque affecte donc peu la résistance. La loi de comportement en traction réduite de 50 % reproduit mieux la force expérimentale pour obtenir la première fissure. Finalement, la réduction de la résistance à la compression du BO affecte également très peu le comportement global des parapets hybrides, qu'un béton de 25 MPa pourrait être une option intéressante pour réduire le coût et l'empreinte environnementale des parapets hybrides.

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce chapitre vise à souligner les conclusions et les recommandations importantes de ce projet de recherche. Le chapitre rappelle d'abord les objectifs, ensuite un résumé des résultats les plus importants est présenté et, finalement, des recommandations sont proposées pour l'utilisation de parapets hybrides avec coques minces en BFUP.

6.1 Rappel des objectifs

L'objectif général du projet était de poursuivre le développement de parapets hybrides avec coque en BFUP. Les parapets hybrides développés antérieurement à Polytechnique Montréal offraient un bon comportement structural et une durabilité améliorée. Cependant, ils étaient entièrement préfabriqués et installés sur la dalle de pont avec différents types d'ancrages. Selon la norme CSA S6-19 (2019), un changement dans l'ancrage du parapet au pont demande une certification par essais d'impact avec véhicules qui est assez onéreuse. Pour résoudre ce problème, ce projet visait à concevoir un parapet hybride avec une coque en BFUP préfabriquée et des armatures de parapets conventionnelles coulées dans la dalle en attente. La coque en BFUP est ainsi remplie en chantier avec un cœur en BO qui permet d'obtenir un parapet hybride avec un système d'ancrage habituel ne requérant pas de certification par essai d'impact.

Le premier objectif spécifique est donc de concevoir la coque en BFUP. Cette dernière doit résister aux efforts causés par le retrait restreint du BFUP dans le moule et les manipulations de la coque jusqu'à son installation sur la dalle de pont. Par la suite, quand la coque est installée sur la dalle du pont, elle doit résister à la pression causée par le remplissage du BO. Le parapet hybride ainsi créé doit finalement résister à la charge prescrite par la norme CSA S6-19 (2019) correspondant à la charge d'un impact de véhicules.

Le deuxième objectif spécifique est de documenter la fabrication des coques au laboratoire et de les instrumenter pour vérifier que la conception par éléments finis donne de bons résultats. Par la suite, les coques sont installées sur la dalle de pont et il faut vérifier que le remplissage avec le BO ne crée pas d'endommagements significatifs sur la coque.

Le troisième objectif spécifique est de tester des parapets hybrides au laboratoire pour vérifier que son comportement structural est adéquat.

Le quatrième objectif spécifique est de développer des modèles par éléments finis visant à reproduire le comportement structural lors des phases de construction et lors de la mise en service des parapets hybrides. Les modèles calibrés permettent de changer des caractéristiques et d'évaluer la modification de certains paramètres sur le comportement structural des parapets hybrides.

6.2 Conclusions

Le premier objectif du projet a d'abord consisté à déterminer l'épaisseur de la coque en BFUP. L'épaisseur de la coque a été déterminée expérimentalement avec des essais d'écoulement (Section 4.1.2) et numériquement avec des modèles d'éléments finis en faisant varier l'épaisseur (Section 3.4 et Section 3.5). La résistance du parapet hybride a aussi été vérifiée afin de respecter la charge pondérée de conception prescrite par la norme CSA S6-19 (2019) (Section 3.7). Les conclusions à tirer sont les suivantes.

- Les essais d'écoulement ont permis de constater qu'une coque de 20 mm d'épaisseur est réalisable, mais certaines difficultés sont rencontrées. Il n'y avait pas de vide de remplissage. La préparation de surface sur l'intérieur de la coque retirait aussi 2-3 mm sur l'épaisseur. Ainsi, une coque de 30 mm a été choisie pour faciliter le remplissage du BFUP et pour avoir une marge de sécurité sur la résistance pour le démoulage et la manutention.
- Les modèles numériques indiquaient qu'une coque de 20 mm était réaliste, car le niveau d'endommagement causé par le retrait restreint était en dessous de 0.1 mm pour un retrait libre appliqué de 200 $\mu\text{m/m}$. L'ajout de chanfrein est très important pour résister au retrait restreint et il est très important de décoffrer le plus rapidement possible pour éliminer la restrainte. La fissuration était négligeable pour le remplissage avec le BO.
- Une coque de 30 mm a donc été recommandée pour résister au retrait restreint du BFUP et au remplissage de la coque avec le BO en chantier.

- La comparaison du comportement numérique des parapets hybrides était comparable à un parapet conventionnel en BHP. Le même mode de rupture était observé à l'interface dalle et parapet où les armatures d'ancrage se plastifient.
- L'interface entre le cœur en BO et la coque en BFUP montrait peu de délamination. Lors de la fabrication des coques, il faut donc prévoir une surface rugueuse sur la coque de BFUP pour que le béton ordinaire du cœur adhère bien.
- La coque en BFUP était peu fissurée même à l'ultime. La durabilité était donc assurée par la coque sur la durée de vie du parapet.

Le deuxième objectif a été de documenter la fabrication des coques minces en BFUP. La Section 4.2 aborde la fabrication des coques au laboratoire et les Sections 4.3.3 et 4.3.4 indiquent les résultats mesurés par les capteurs lors des travaux. Les conclusions suivantes indiquent les points importants tirés de la fabrication des coques et des parapets hybrides.

- La fabrication de la première coque indiquait que la forme du coffrage complexifiait le démoulage. La géométrie intérieure de la coque est modifiée afin d'éliminer les parois parallèles en priorisant un angle minimal de 7° pour les surfaces opposées. La géométrie extérieure de la coque ne peut pas être modifiée afin de respecter la norme CSA S6-19 (2019). Pour cette raison les surfaces parallèles aux extrémités du moule de la coque étaient démontables.
- Le retrait libre et la restrainte étaient plus importants que ce qui était estimé en conception et ceci complexifie le décoffrage. Il a fallu décoffrer les coques dès que le BFUP était suffisamment résistant, soit après environ 18 à 24 heures selon les BFUP utilisés dans le projet.
- Dans l'éventualité où une coque est endommagée pendant la fabrication, elle peut être réparée avec une injection d'époxy sans avoir d'impact sur le comportement de la coque.
- La fabrication des parapets hybrides (remplissage des coques en BFUP fixées sur la dalle de pont avec le BO) s'est produite sans difficulté majeure. La restrainte procurée par les madriers de fixation n'était pas parfaite et permettait un léger déplacement transversal qui n'endommagait pas la coque.

- La fabrication des coques et des parapets hybrides n'a pas créé de fissuration apparente sur les coques.

Le troisième objectif a été de confirmer expérimentalement le comportement structural des parapets. La Section 4.3.5 aborde la fabrication du montage et les résultats. Quelques conclusions sont à tirer des essais expérimentaux.

- Le BFUP avec fibres en acier montrait un comportement en traction écrouissant avec création de microfissures et adoucissant à 48 heures et 28 jours. Le BFUP avec fibres en PVA présentait aussi un comportement écrouissant et adoucissant à 48 heures et 28 jours, cependant des macrofissures se développaient pendant la phase d'écrouissage. Ceci rendait difficilement justifiable la considération de l'écrouissage en conception.
- Les résultats expérimentaux permettent de conclure que les parapets hybrides MTQ201 fabriqués avec une coque en BFUP préfabriquée et un cœur en BO coulé en place sur des armatures en attente répondent aux exigences de la norme CSA S6-19 (2019). D'une part, les parapets atteignaient une résistance maximale de près de 500 kN supérieurs à l'exigence de 227 kN à l'ultime selon la norme. Le mode de rupture était contrôlé par la plastification des armatures à la jonction de la dalle et du parapet. Des capteurs présents dans l'interface entre la coque et le cœur permettaient de conclure que l'interface n'a pas été délaminée. La fissuration maximale en service était de moins de 0.1 mm pour les deux parapets. Ceci indique que les parapets hybrides sont très durables.

Le quatrième objectif a été de développer et de valider des modèles éléments finis qui devaient reproduire les efforts et l'endommagement causés par le retrait restreint du BFUP lors de la production des coques, le remplissage du BO dans les coques installées sur les dalles de ponts et le comportement structural du parapet hybride soumis à un chargement transversal. Les modèles calibrés ont permis d'étudier l'effet de certains paramètres sur le comportement des parapets hybrides.

- Les modèles pour étudier le retrait restreint des coques parvenaient à bien reproduire la déformation empêchée. Le modèle de retrait restreint adapté avec les lois mesurées au laboratoire et la géométrie de la coque finale permettait de

conclure que pour un retrait libre appliqué de moins de 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ et une restrainte au retrait de 25%, la coque était seulement microfissurée. Il est donc important de décoffrer le plus tôt possible et d'ajouter des chanfreins dans les coins intérieurs des coques afin d'éviter la fissuration.

- Le modèle pour reproduire le remplissage de la coque avec le BO estimait un déplacement entre 1 et 1.2 mm, soit une valeur comparable à ce qui a été observé expérimentalement. Les coques étaient très peu microfissurées selon les modèles.
- Les modèles créés pour évaluer le comportement structural des parapets hybrides de pont démontraient que le comportement structural des parapets hybrides était similaire à ce qui était observé expérimentalement. La rigidité était similaire et le soulèvement suivait la même tendance. La résistance expérimentale était bien estimée avec les modèles numériques. La force maximale était très proche, mais la rigidité des parapets modélisés était légèrement plus faible. La délamination entre la coque en BFUP et le cœur en BO sur les spécimens expérimentaux était nettement plus faible que celle obtenue avec les modèles numériques. La préparation d'interface dans les coques en BFUP semblait donc bien adaptée pour créer une bonne action hybride entre le BO et le BFUP. Le patron de fissuration numérique et expérimental était similaire pour le parapet avec coque en BFUP avec fibres en acier. Le patron de fissuration pour le parapet avec fibres en PVA était légèrement différent, le modèle ayant des fissures plus fines que celles mesurées expérimentalement.
- La variation de la loi de comportement de l'interface coque-cœur permettait de conclure que les résultats obtenus avec une interface parfaite étaient plus fidèles à ce qui était observé expérimentalement puisque les déplacements dans l'interface coque-cœur restaient dans le domaine élastique. Cependant, l'interface normale était un bon compromis entre le bon comportement structural et un bon déplacement dans l'interface.
- La variation de la réduction de la loi de traction BFUP ne changeait pas significativement le comportement du parapet puisque le mode de rupture n'était pas localisé dans le BFUP, mais plutôt dans les armatures d'ancrage à la jonction parapet-dalle. L'absence de comportement écrouissant considérée dans la loi de

comportement du BFUP avec fibres en PVA permettait de mieux reproduire la fissuration réelle expérimentale, mais les modèles la sous-estimaient légèrement.

- La réduction de la résistance à la compression du BO du cœur des parapets hybrides permettait de constater que la résistance affectait peu le comportement structural du parapet en permettant encore d'obtenir une résistance maximale supérieure à la force pondérée de conception exigée par le code CSA S6-19 (2019) de 227 kN. Il serait donc approprié d'utiliser un béton avec une résistance à la compression de 25 MPa pour la fabrication de parapet hybrides pour réduire le coût et l'empreinte environnementale des parapets hybrides.

6.3 Recommandations

Les sections suivantes proposent quelques recommandations pour les propriétaires d'ouvrage qui voudraient utiliser des parapets hybrides avec coque en BFUP préfabriquée. Les recommandations sont divisées en 3 thèmes principaux : production des coques et des parapets hybrides, comportement structural et mise en place des parapets hybrides.

6.3.1 Production des coques et des parapets hybrides

La production des coques est une phase très critique, il faut y porter une attention particulière. Les recommandations suivantes peuvent aider à produire les coques.

- Pour la production de la coque, il faut couler le BFUP en commençant par la face avant inclinée afin d'éliminer les zones faibles qui travaillent en traction une fois le parapet en service. Une fois la face avant de la coque remplie, on peut compléter le remplissage par la face arrière.
- La coulée de la coque en mode inversé est la méthode la plus efficace pour la procédure de décoffrage. En effet, le coffrage intérieur est enlevé en premier et il permet ainsi d'avoir accès à l'intérieur de la coque pour préparer la surface texturée.
- Il est important de décoffrer la section centrale du moule interne afin d'éliminer la restriction le plus tôt possible. Le BFUP est prêt à être décoffré environ 1 à 2 heures après que le dégagement de chaleur du BFUP ait débuté.
- Les coffrages doivent éviter le plus possible les surfaces parallèles qui sont difficiles à décoffrer. Il faut opter pour des surfaces opposées avec un angle

minimal de 7°. Si cet angle est impossible à obtenir pour deux surfaces opposées, il faut que les surfaces de coffrage soient démontables.

- La préparation de surface interne du coffrage est importante pour favoriser l'adhérence entre le BFUP de la coque et le BO du cœur coulé après. La surface est créée en appliquant un retardateur de prise sur le coffrage interne de la coque. Cette technique peut être améliorée pour deux raisons. Premièrement, le retardateur de prise traditionnel est un produit causant des émanations dangereuses. Il faut prendre plusieurs précautions pour l'appliquer. Deuxièmement, une couche de BFUP est enlevée pour produire la surface rugueuse. Puisque le BFUP est un matériau dispendieux, c'est dommage d'en enlever une couche pour créer une texture. L'utilisation d'une membrane de coffrage texturée sur le moule intérieur de la coque permettrait d'obtenir directement une surface texturée et de simplifier le décoffrage. En effet, la membrane permet de créer la surface texturée sans l'ajout de retardateur de prise et sans enlever de BFUP.
- Dans le projet, des coques de 2 mètres ont été conçues et testées. Cependant, les propriétaires d'ouvrage préconisent normalement des parapets de 4 mètres. Il serait donc très important de valider la production des coques de 4 mètres. La manipulation de coques plus longues pourrait aussi s'avérer plus difficile. Des coques plus courtes que 2 mètres seraient également à étudier pour s'assurer du bon transfert des efforts entre des unités de parapets très courtes.
- Le BFUP avec fibres en acier et celui avec fibres en PVA sont des matériaux adéquats pour la fabrication de coques minces. Cependant, il faut caractériser le retrait des BFUP avant de fabriquer les coques. En effet, un retrait trop important pourrait endommager les coques. Le BFUP avec fibres en PVA doit être optimisé avant d'être utilisé dans la fabrication de coque au niveau industriel. Le matériau avait un temps de prise plus long et le retrait était beaucoup plus important que celui estimé.
- Les modèles numériques utilisés pour prédire le comportement de la coque lors du retrait du BFUP sont difficiles à développer, car la restreinte est difficile à estimer. De plus, le BFUP est difficile à modéliser puisque ses propriétés varient dans le

temps. Une étude plus précise devrait être réalisée avec un modèle numérique qui intègre l'évolution de la maturité du BFUP.

6.3.2 Comportement structural des parapets hybride

- Les essais au laboratoire sont réalisés avec des parapets de 2 mètres et avec une plaque de chargement de 700 mm, alors que l'usage courant est d'utiliser des parapets de 4 mètres et la norme demande une longueur de chargement de 1050 mm. Les travaux antérieurs à Polytechnique Montréal ont démontré numériquement que les essais sur parapets de 3 mètres de longueur et la plaque de chargement plus courte sont plus critiques, mais ceci pourrait être validé expérimentalement.
- Le chargement est considéré au centre du parapet. Or, les essais menés précédemment à Polytechnique Montréal montrent qu'un parapet chargé en extrémité est moins résistant. Comme exigé dans les parapets MTQ201, il faut prévoir l'ajout d'armatures supplémentaires à 1 m des extrémités des parapets pour compenser la résistance réduite dans ces zones.

6.3.3 Mise en place

- Il serait intéressant de mener une étude économique sur la durée de vie des parapets hybrides par rapport aux parapets monolithiques conventionnels. En effet, bien que le coût initial du parapet hybride soit plus élevé, le gain de durabilité réduirait très nettement les coûts d'entretien pour la durée de vie du pont et permettrait d'obtenir un coût à long terme très compétitif. Une telle étude aiderait à convaincre les propriétaires d'ouvrages d'utiliser les parapets hybrides.
- Le béton du cœur dans le projet est un béton semi-autoplaçant de 50 MPa. Puisque le béton est protégé par la coque, il pourrait être intéressant d'utiliser un béton avec une quantité de ciment faible et un agent expansif pour réduire les problèmes de retrait. Les modèles numériques indiquent qu'un béton de 25 MPa pour le cœur serait suffisant pour répondre aux exigences de la norme CSA S6-19 (2019). Ce béton serait donc moins coûteux économiquement avec des émissions de carbone réduites.

- Il faudrait étudier le comportement du parapet hybride dans sa durée de vie afin de vérifier si le retrait ou la contraction thermique du béton pourrait endommager l'interface coque-cœur.

RÉFÉRENCES

- AASHTO. (2009). *Manual for assessing safety hardware, first edition*. Washington, D.C.
- AASHTO. (2016). *Manual for assessing safety hardware, second edition*. Washington, D.C.
- AASHTO. (2020). *AASHTO LRFD bridge design specifications*.
- Abbas, S., Soliman, A. M., & Nehdi, M. L. (2015). Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages. *Construction and Building Materials*, 75, 429-441. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.017>
- Abid, S. (2021). *Confinement de l'expansion causée par la réaction alcalis-granulats avec du béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP)*. (Mémoire de maîtrise). Polytechnique Montréal, Retrieved from <https://publications.polymtl.ca/6572/>
- Abid, S., Desmettre, C., & Charron, J. P. (2023). Containment of internal expansion caused by alkali-aggregate reaction with ultra-high performance fiber reinforced concrete. *Materials and Structures*, 56(2), 32. doi:10.1617/s11527-023-02116-w
- Azizinamini, A., Rehmat, S., & Sadeghnejad, A. (2019). Enhancing Resiliency and Delivery of Bridge Elements using Ultra-High Performance Concrete as Formwork. *Transportation Research Record*, 2673(5), 443-453. doi:10.1177/0361198119834907
- Bastide, R. (2020). *Comportement de joints de chevauchement en BFUP pour la construction de culées préfabriquées*. (Mémoire de maîtrise). Polytechnique Montréal, Retrieved from <https://publications.polymtl.ca/5276/>
- Beaurivage, F. (2009). *Étude de l'influence des paramètres structuraux sur les lois de comportement des bétons fibrés pour la conception de structures*. (Mémoire de maîtrise). École Polytechnique de Montréal, Retrieved from <https://publications.polymtl.ca/226/>
- Braike, S. (2007). *Conception d'éléments préfabriqués de ponts avec des bétons fibrés à haute et ultra haute performance*: École Polytechnique de Montréal.
- Červenka, V., Jendele, L., & Červenka, J. (2021). *ATENA Program Documentation - part I - Theory*. Prague, République Tchèque.
- Chanvillard, G., & Rigaud, S. (2003). *Complete characterization of tensile properties of Ductal UHPFRC according to the French recommendations*. Paper presented at the Proceedings of the 4th International RILEM workshop High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites.
- Charron, J.-P. (2003). *Contribution à l'étude du comportement au jeune âge des matériaux cimentaires en conditions de déformations libre et restreinte*. Université Laval,
- Charron, J.-P. (2007). *Technique du béton*. École Polytechnique de Montréal: Presse Internationales de Polytechnique.

- Charron, J.-P., Denarié, E., & Brühwiler, E. (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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.12.006>
- Charron, J.-P., & Desmettre, C. (2013). Intérêt de l'utilisation des bétons renforcés de fibres pour la construction d'ouvrages d'art durables.
- Comité Euro-International du Béton. (1990). *CEB-FIP MODEL CODE 1990*.
- Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des, i. (2022). Code national du bâtiment : Canada : 2020. Sur: Conseil national de recherches du Canada.
- CSA A23.3. (2019). Calcul des ouvrages en béton. Sur. Canada: Canadian Standard Association.
- CSA S6-19. (2019). Code canadien sur le calcul des ponts routiers. Sur *S6-19*. Canada: Canadian Standard Association.
- Cusson, D., Qian, S., Chagnon, N., & Baldock, B. (2008). Corrosion-Inhibiting Systems for Durable Concrete Bridges. I: Five-Year Field Performance Evaluation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(1), 20-28. doi:[doi:10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:1\(20\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:1(20))
- Cusson, D., & Repette, W. (2000). Early-Age Cracking in Reconstructed Concrete Bridge Barrier Walls. *ACI Materials Journal*, 97(4). doi:[10.14359/7407](https://doi.org/10.14359/7407)
- Damry, R., Charron, J.-P., Desmettre, C., & Massicotte, B. (2013). *Structural use of UHPFRC for designing PL-3 precast bridge parapets*. Retrieved from <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1152212.pdf>
- Duchesneau, F. (2010). *Conception de parapets préfabriqués hybrides et monolithiques utilisant des bétons à haute et ultra-haute performance*. (Mémoire de maîtrise). École Polytechnique de Montréal, Retrieved from <https://publications.polymtl.ca/500/>
- Duchesneau, F., Charron, J.-P., & Massicotte, B. (2011). Monolithic and hybrid precast bridge parapets in high and ultra-high performance fibre reinforced concretes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38(8), 859-869. doi:[10.1139/111-054](https://doi.org/10.1139/111-054)
- Gendron, F. (2020). *Conception et analyse du comportement mécanique de parapets préfabriqués pour les ponts avec joints de connexion en bétons fibrés ultra performants*. (Mémoire de maîtrise). Polytechnique Montréal, Retrieved from <https://publications.polymtl.ca/4118/>
- Gendron, F., Desmettre, C., & Charron, J.-P. (2022). Structural Behavior of Novel Precast TL-5 Bridge Barriers Using Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concretes. *Journal of Bridge Engineering*, 27(3), 04021113 (04021114 pp.). doi:[10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001826](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001826)
- Ghafari, E., Ghahari, S. A., Costa, H., Júlio, E., Portugal, A., & Durães, L. (2016). Effect of supplementary cementitious materials on autogenous shrinkage of ultra-high

- performance concrete. *Construction and Building Materials*, 127, 43-48. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.123>
- Gong, J., Ma, Y., Fu, J., Hu, J., Ouyang, X., Zhang, Z., & Wang, H. (2022). Utilization of fibers in ultra-high performance concrete: A review. *Composites Part B: Engineering*, 241, 109995. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109995>
- Habel, K. (2004). *Structural behaviour of elements combining ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC) and reinforced concrete*. EPFL, Retrieved from <http://vpaa.epfl.ch/page14979.html>
https://infoscience.epfl.ch/record/33507/files/EPFL_TH3036.pdf
- Habel, K., Charron, J.-P., Denarié, E., & Brühwiler, E. (2006). Autogenous deformations and viscoelasticity of UHPFRC in structures. Part I: experimental results. *Magazine of Concrete Research*, 58(3), 135-145.
- Hassan, A. M. T., Jones, S. W., & Mahmud, G. H. (2012). Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). *Construction and Building Materials*, 37, 874-882. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.030>
- Huang, B.-T., Li, Q.-H., Xu, S.-L., & Li, C.-F. (2017). Development of reinforced ultra-high toughness cementitious composite permanent formwork: Experimental study and Digital Image Correlation analysis. *Composite Structures*, 180, 892-903. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.016>
- Hubert, M., Desmettre, C., & Charron, J.-P. (2015). Influence of fiber content and reinforcement ratio on the water permeability of reinforced concrete. *Materials and Structures*, 48(9), 2795-2807. doi:10.1617/s11527-014-0354-z
- Kamen, A., Denarie, E., Sadouki, H., & Bruhwiler, E. (2009). UHPFRC tensile creep at early age. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 42(1), 113-122. doi:10.1617/s11527-008-9371-0
- Karim, R., & Shafei, B. (2022). Investigation of Five Synthetic Fibers as Potential Replacements of Steel Fibers in Ultrahigh-Performance Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(7), 04022126. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004268
- Lagier, F. E. (2015). *Étude du comportement de chevauchements d'armatures en traction directe dans du béton fibré ultra performant*. (Thèse de doctorat). École Polytechnique de Montréal, Retrieved from <https://publications.polymtl.ca/1897/>
- Legouest, N. (2024). *Évaluation de la performance de coques minces en BFUP pour parapets*.
- Li, J., & Deng, Z. (2023). Tensile behavior of ultra-high performance concrete reinforced with different hybrid fibers. *Structural Concrete*, 24(1), 1415-1435. doi:10.1002/suco.202200353
- Liu, C., Shen, D., Yang, X., Shao, H., Tang, H., & Cai, L. (2023). Early-age properties and shrinkage induced stress of ultra-high-performance concrete under variable

- temperature and uniaxial restrained condition. *Construction and Building Materials*, 384, 131382. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131382>
- Mina, A. L., Trezos, K. G., & Petrou, M. F. (2021). Optimizing the Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete to Increase Its Resistance to Projectile Impact. *Materials*, 14(17), 5098. Trouvé sur <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/17/5098>
- MTQ. (2023a). *Tome III: Ouvrages d'art*. Québec: Gouvernement du Québec.
- MTQ. (2023b). *Tome VII – Matériaux*. Québec: Gouvernement du Québec.
- Naaman, A. E. (2008). High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. In *High-Performance Construction Materials* (pp. 91-153).
- Namy, M., Charron, J. P., & Massicotte, B. (2015). Structural Behavior of Bridge Decks with Cast-in-Place and Precast Concrete Barriers: Numerical Modeling. *Journal of Bridge Engineering*, 20(12), 04015014 (04015011 pp.). doi:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000751
- Nana, S., Starostina, D., Zhou, F., Herbe, S., Rivoal, J.-N., Bonnet, E., & Trucy, L. (2023). Proposal of an Engineering Design Approach for Non-metallic Fiber Reinforced Concrete: Through experimental Study and Numerical Modelling on UHPFRC. *International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, 3 (1): 141.
- NCHRP. (1981). *Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Appurtenances*, report 230. Retrieved from Washington, D.C.:
- NCHRP. (1992). *Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features*, Report 350. Retrieved from Washington, D.C.:
- Nguyen, D.-L., Thai, D.-K., Nguyen, H. T. T., Tran, N. T., Phan, T.-D., & Kim, D. J. (2023). Mechanical behaviors and their correlations of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes with various steel fiber types. *Structural Concrete*, 24(1), 1179-1200. doi:<https://doi.org/10.1002/suco.202100184>
- Niamba, E., Charron, J. P., & Massicotte, B. (2011). Static and dynamic behavior of high- and ultrahigh-performance fiber-reinforced concrete precast bridge parapets. *Journal of Bridge Engineering*, 16(3), 413-421. doi:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000159
- Provete Vincler, J., Sanchez, T., Turgeon, V., Conciatori, D., & Sorelli, L. (2019). A modified accelerated chloride migration tests for UHPC and UHPFRC with PVA and steel fibers. *Cement and Concrete Research*, 117, 38-44. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.12.006>
- Pryl, D., & Červenka, J. (2020). *ATENA Program Documentation - part 11 - Troubleshooting Manual*. Prague, République Tchèque.
- Qiao, Z., Pan, Z., Xue, W., & Meng, S. (2019). Experimental study on flexural behavior of ECC/RC composite beams with U-shaped ECC permanent formwork. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(5), 1271-1287. doi:10.1007/s11709-019-0556-0

- Richard, P., & Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501-1511.
- Staton, J. F., & Knauff, J. (2007). Performance of Michigan's concrete barriers. Trouvé sur <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/18203>
- Tazawa, E.-i. (1999). Autogenous shrinkage stress and its estimation. In *Autogenous Shrinkage of Concrete* (pp. 39-64): CRC Press.
- Thiaw, A., Charron, J.-P., & Massicotte, B. (2016). Precast fiber-reinforced concrete barriers with integrated sidewalk. *ACI Structural Journal*, 113(1), 39-50. doi:10.14359/51688611
- Thomas, M., Green, B., O'Neal, E., Perry, V., Hayman, S., & Hossack, A. (2012). *Marine performance of UHPC at Treat Island*. Paper presented at the Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, Germany.
- Wang, Q., Xiong, Z., Zhang, J., Fang, Z., Lai, M., & Ho, J. (2023). Impact of polyvinyl alcohol fiber on the full life-cycle shrinkage of cementitious composite. *Journal of Building Engineering*, 63, 105463. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105463>
- Wille, K., El-Tawil, S., & Naaman, A. E. (2014). Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. *Cement and Concrete Composites*, 48, 53-66. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.015>
- Wu, L., Farzadnia, N., Shi, C., Zhang, Z., & Wang, H. (2017). Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 149, 62-75. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.064>
- Wu, Z., Shi, C., & Khayat, K. H. (2019). Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape. *Composites Part B: Engineering*, 174, 107021. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107021>
- Xie, T., Fang, C., Mohamad Ali, M. S., & Visintin, P. (2018). Characterizations of autogenous and drying shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC): An experimental study. *Cement and Concrete Composites*, 91, 156-173. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.05.009>
- Zhang, P., Shang, J., Liu, Y., Shao, J., Gao, D., Dong, Z., & Sheikh, S. A. (2022). Flexural behavior of GFRP bar-reinforced concrete beams with U-shaped UHPC stay-in-place formworks. *Journal of Building Engineering*, 45, 103403. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103403>
- Zhao, X., Cai, L., Ji, X., Zeng, W., & Liu, J. (2022). Mechanical Properties of Polyethylene Fiber Reinforced Ultra High Performance Concrete (UHPC). *Materials (Basel)*, 15(24). doi:10.3390/ma15248734

ANNEXE A VÉRIFICATION DU BON COMPORTEMENT DU LOGICIEL ATENA

Il est de bonne pratique de faire une validation du comportement en traction numérique sur ATENA pour s'assurer qu'il est bien configuré avant de lancer des modèles plus complexes. La Figure A-1 présente modèle avec un cube. Il s'agit d'un élément simple de $10 \times 10 \times 10$ mm dont tous les déplacements sont bloqués à la face du bas et un déplacement est imposé sur la face du haut. Un moniteur est placé sur la face chargée pour mesurer la force qui sera convertie en contrainte, un autre moniteur mesure l'ouverture de fissure maximale dans l'élément et finalement un moniteur mesure le déplacement qui est converti en déformation. Il est alors possible de vérifier si le comportement introduit en entrée est bien celui obtenu en sortie du calcul.

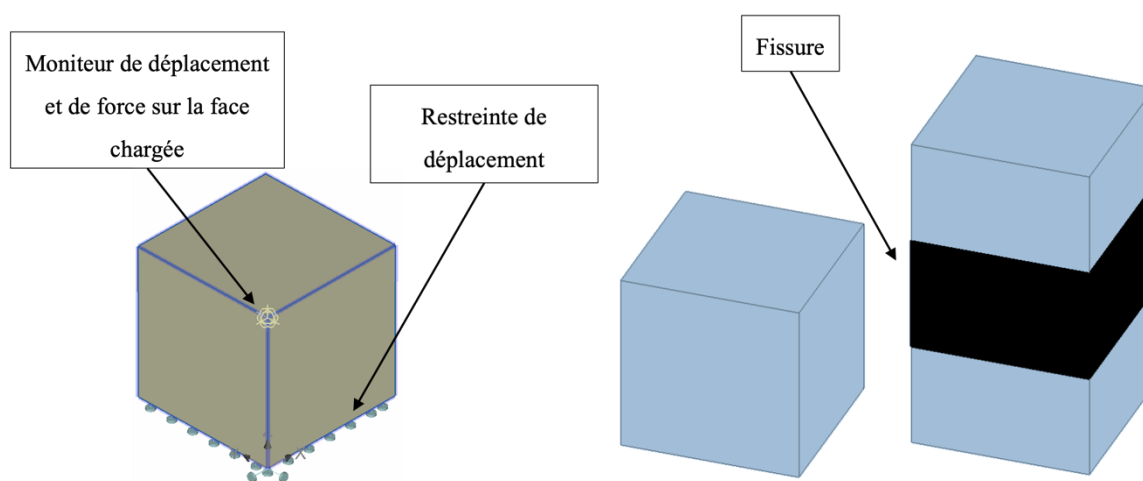


Figure A-1 Conditions limites et moniteurs sur l'essai de matériau sur un cube (état initial au centre et état final à droite)

Cette vérification est réalisée sur le BFUP avec 2 % de fibres en acier et avec 3 % de fibres en PVA synthétiques. La Figure A-2 présente la comparaison avec les fibres en acier et la Figure A-3 présente la comparaison avec les fibres en PVA. La différence entre les deux lois est négligeable.

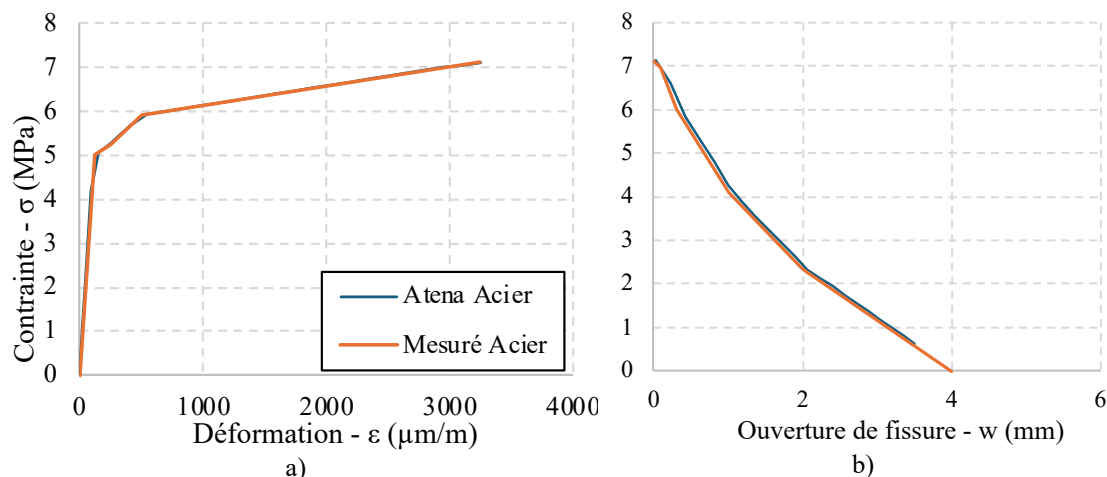


Figure A-2 Comportement de la loi mesurée réduite au laboratoire et le test sur le cube pour un béton avec fibre en acier 2 % à 90 jours a) prépic, b) postpic

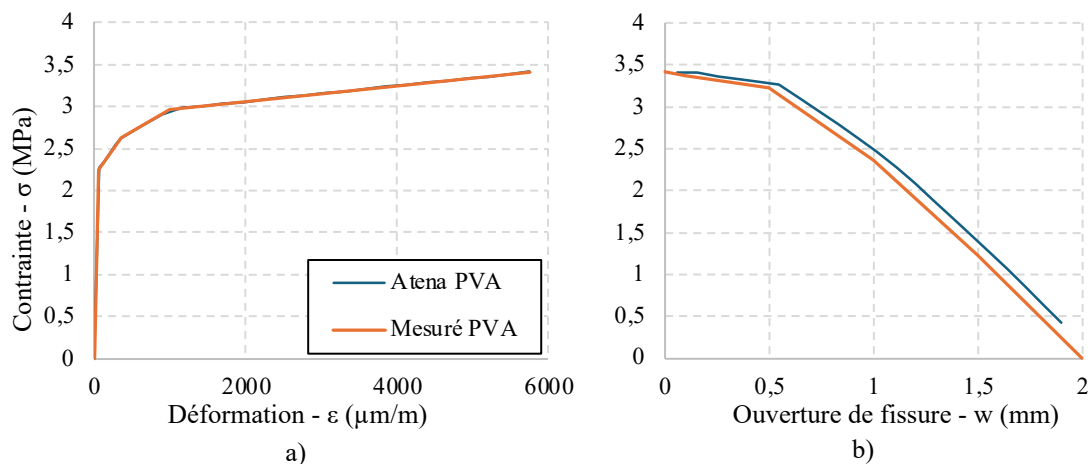


Figure A-3 Comportement de la loi mesurée réduite au laboratoire et le test sur le cube pour un béton avec fibre en PVA 3 % à 113 jours a) prépic, b) postpic

Une propriété intéressante des BFUP soulevée par Bastide (2020) est que le module de déchargement/rechargement (E_{pc}) en traction est différent du module élastique (E_c). La Figure A-4 illustre ce propos. Bastide (2020) avait mesuré un module (E_c) d'environ 35 000 MPa et un module (E_{pc}) d'environ 8 700 MPa dans la phase écrouissante du BFUP.

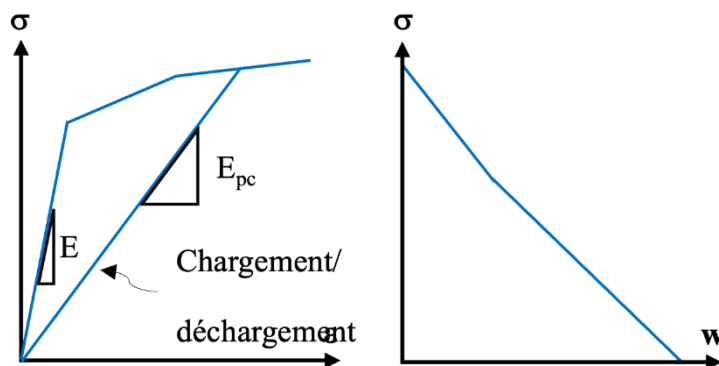


Figure A-4 Module élastique et chargement/déchargement en prépic (gauche) et comportement postpic (droite)

Ce comportement n'est pas reproduit sur ATENA. La Figure A-5 présente un test effectué sur le même cube que plus tôt avec un déchargement et un rechargement en phase d'écroutissage. Le module du déchargement et du rechargement est le même que le module élastique. Cette différence est surtout importante dans la modélisation du retrait. En effet, lorsque la restrainte du retrait est enlevée, le béton est déchargé en partie, les déformations dans le béton seront alors légèrement erronées.

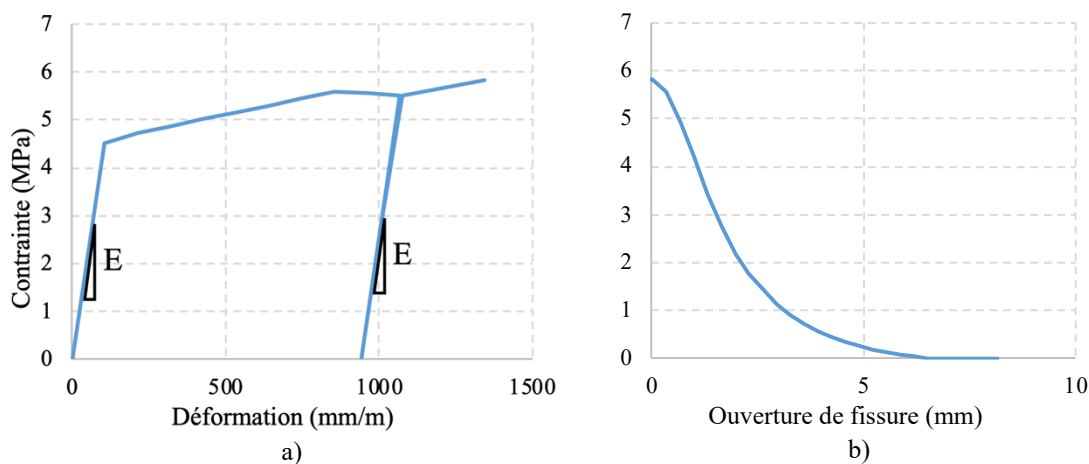


Figure A-5 Comportement a) prépic, b) postpic d'un BFUP avec déchargement-rechargement dans la partie écroutissante

ANNEXE B PLANS ENVOYÉS À L'USINE POUR LA FABRICATION DES COQUES ET DES DALLES

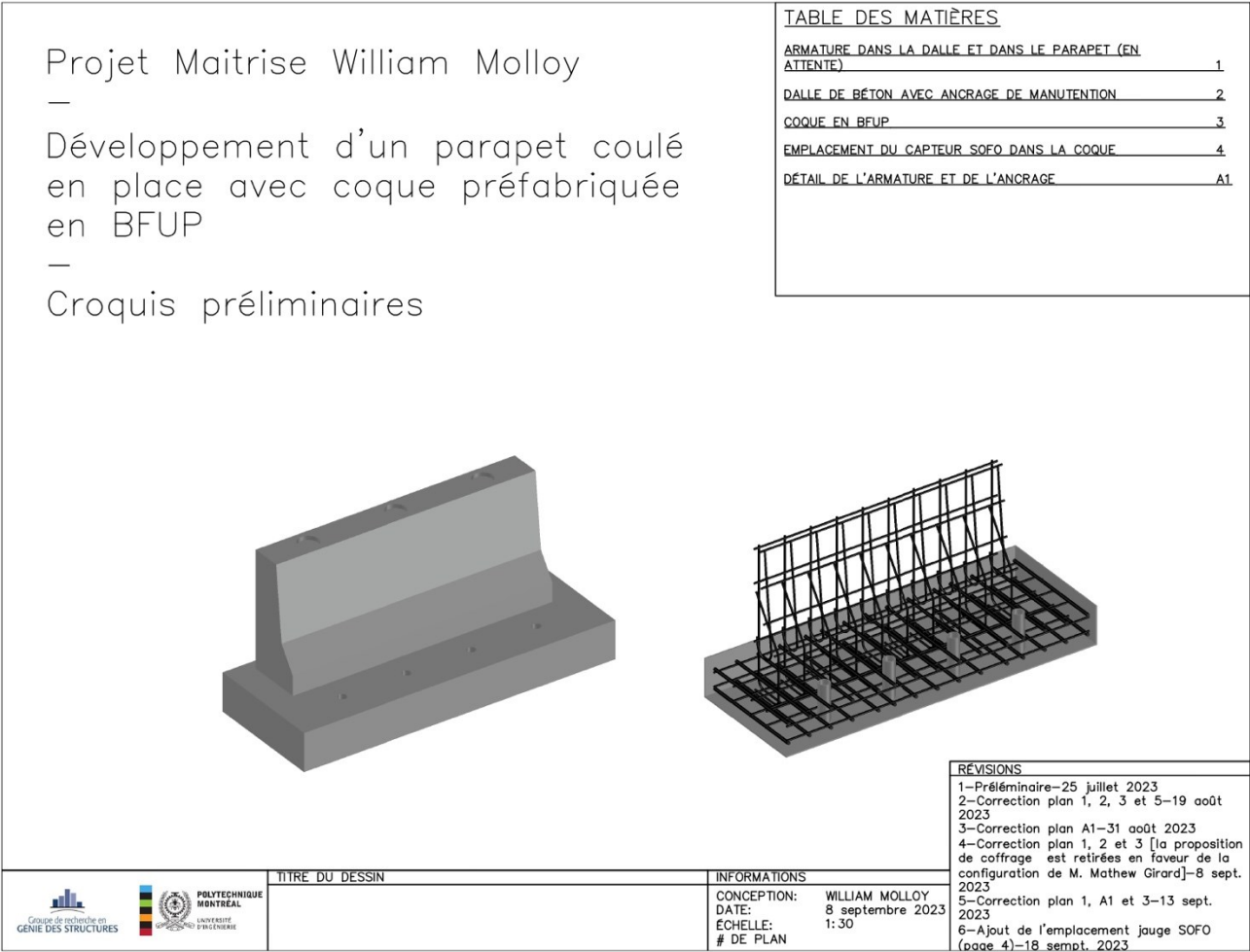


Figure B-1 Page de couverture des plans avec vue en 3D du parapet et de la dalle

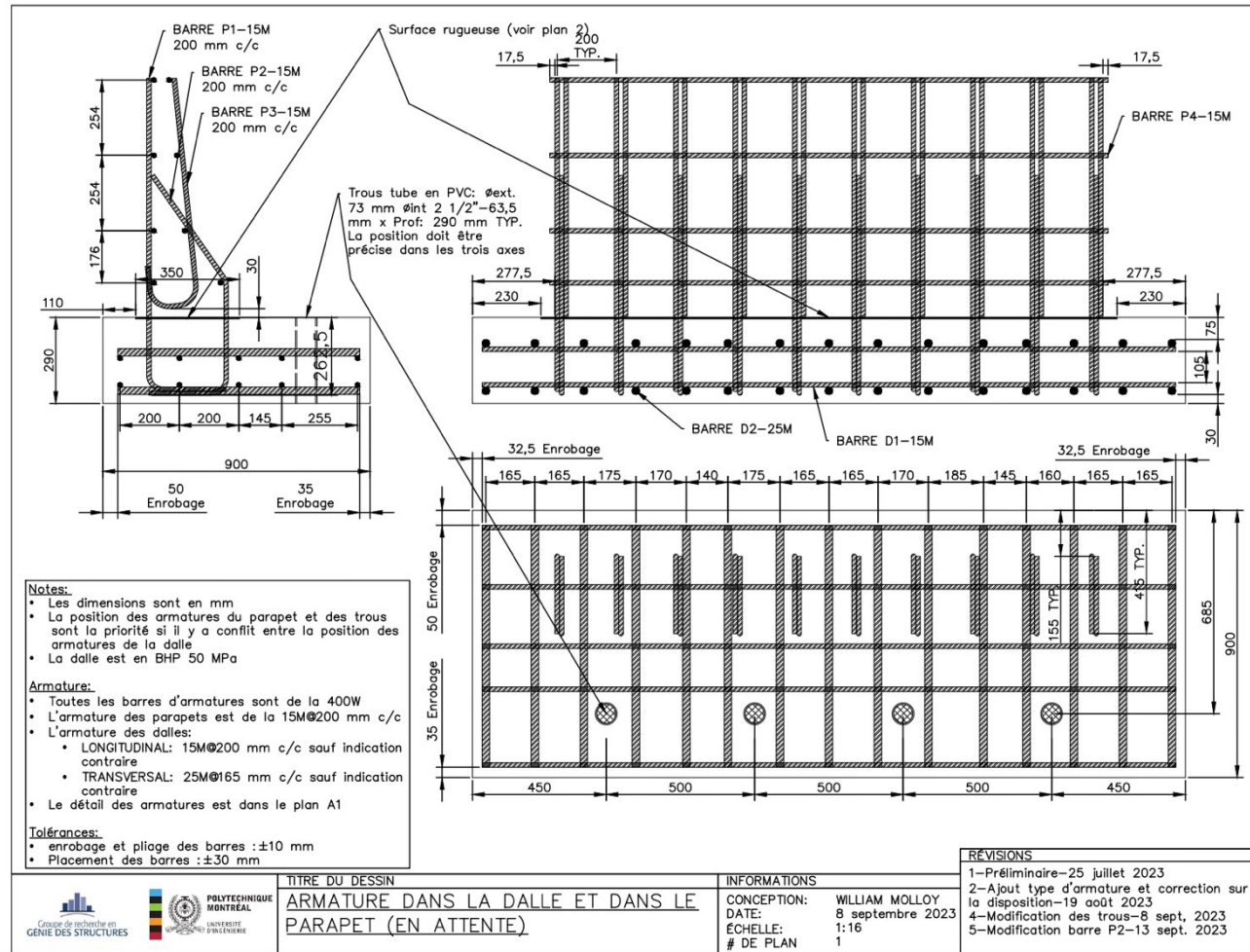


Figure B-2 Dalle avec armatures en attente et armatures dans le parapet

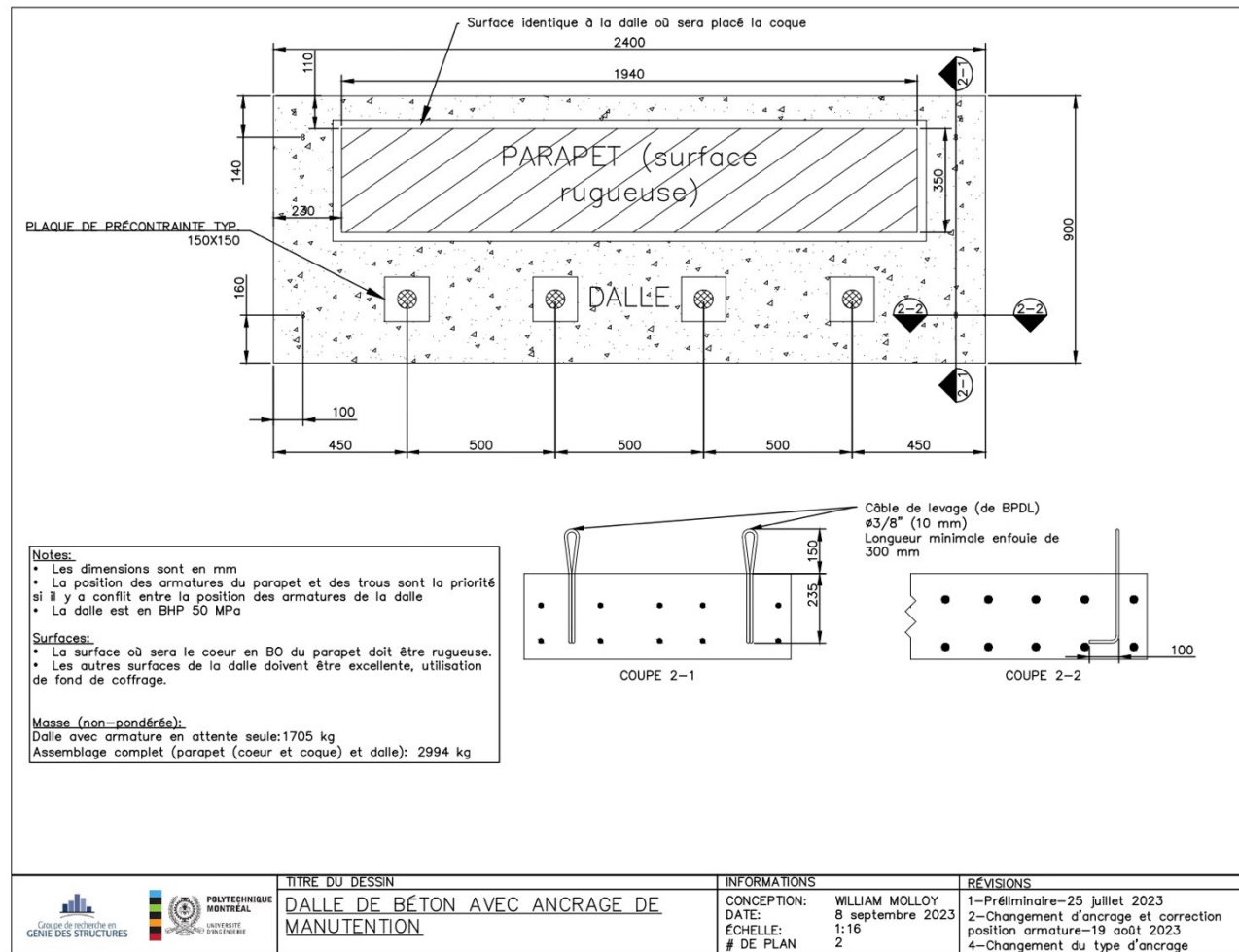


Figure B-3 Dalle de béton avec ancrages de manutention

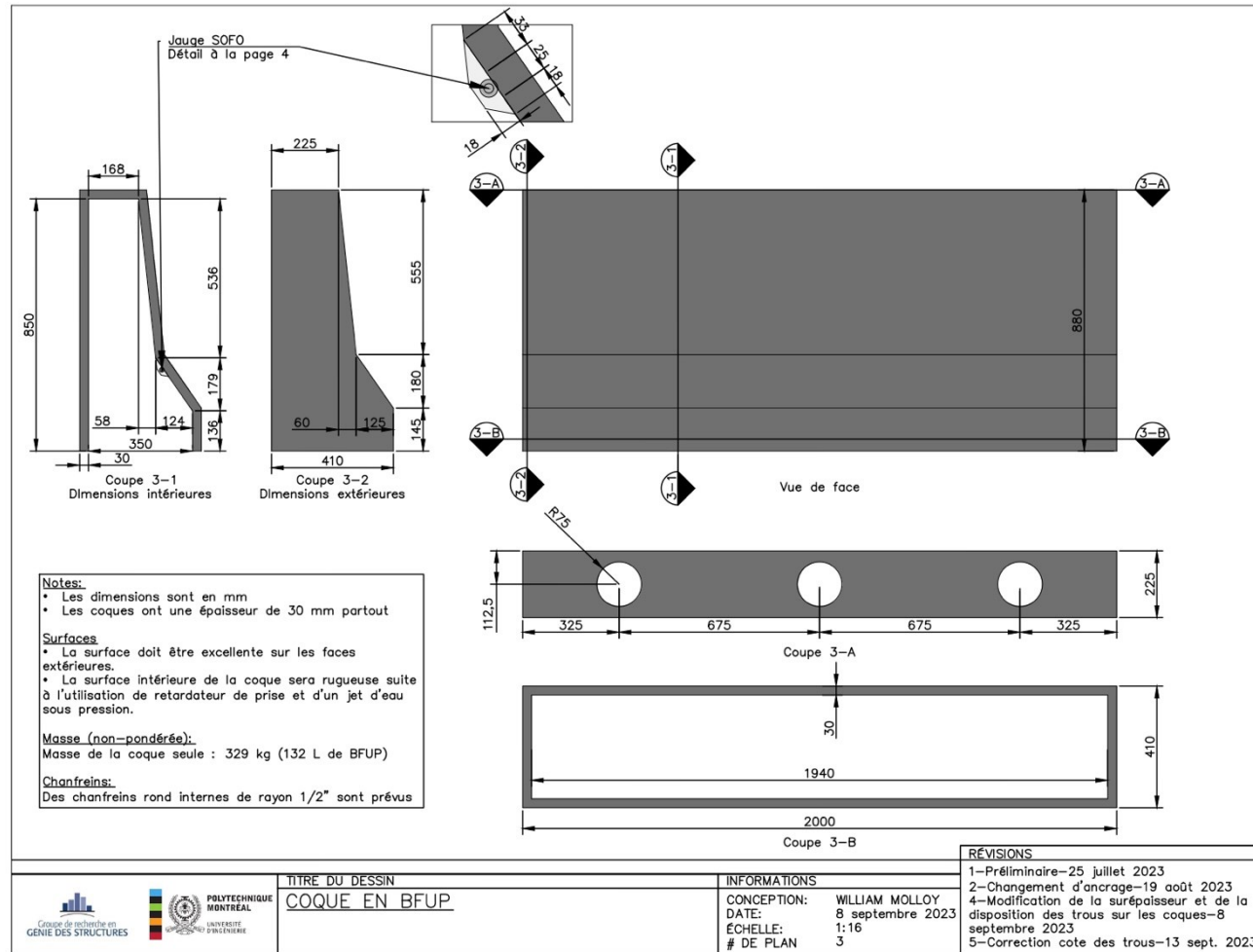


Figure B-4 Vues orthogonales de la coque en BFUP

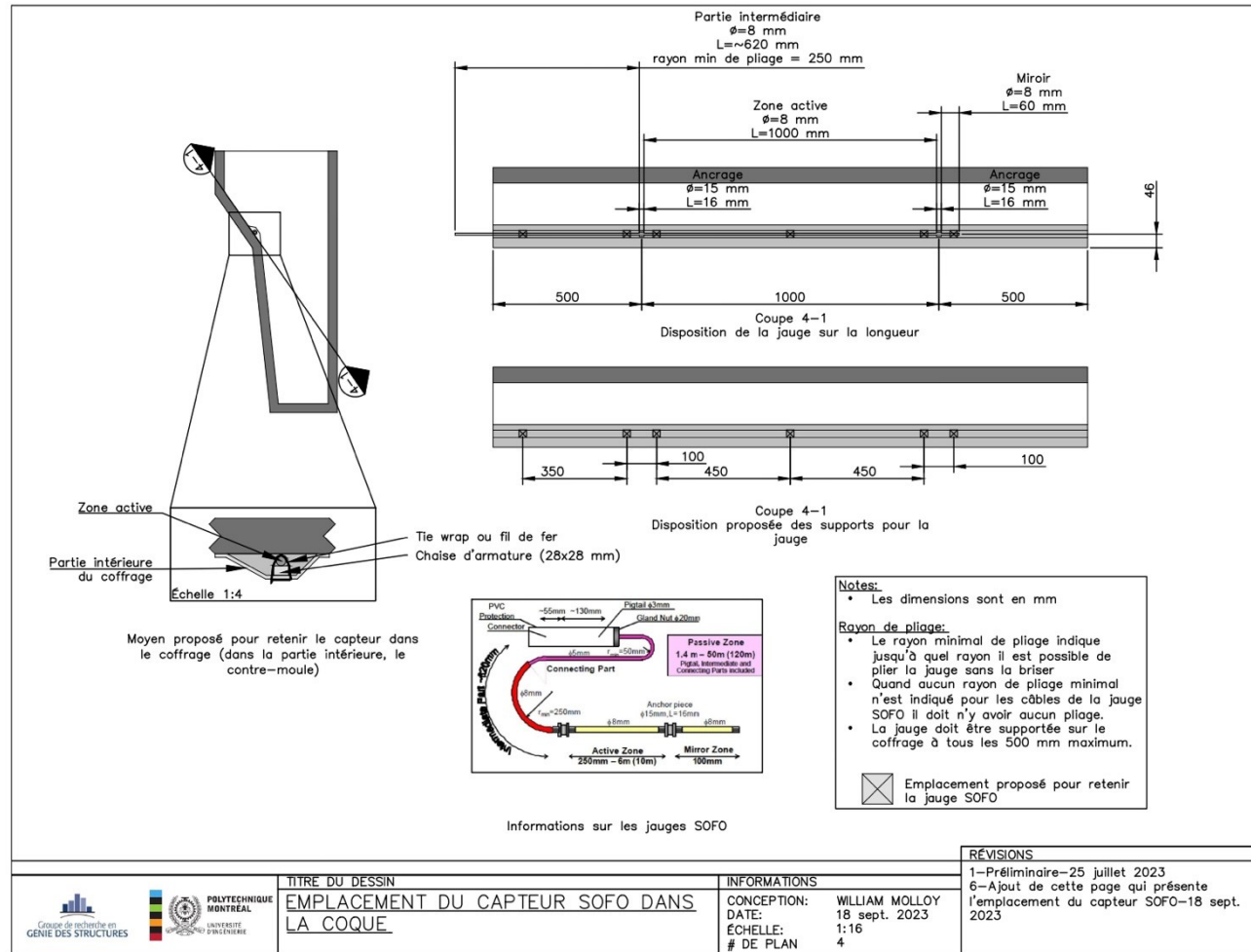


Figure B-5 Emplacement du capteur SOFO dans la coque

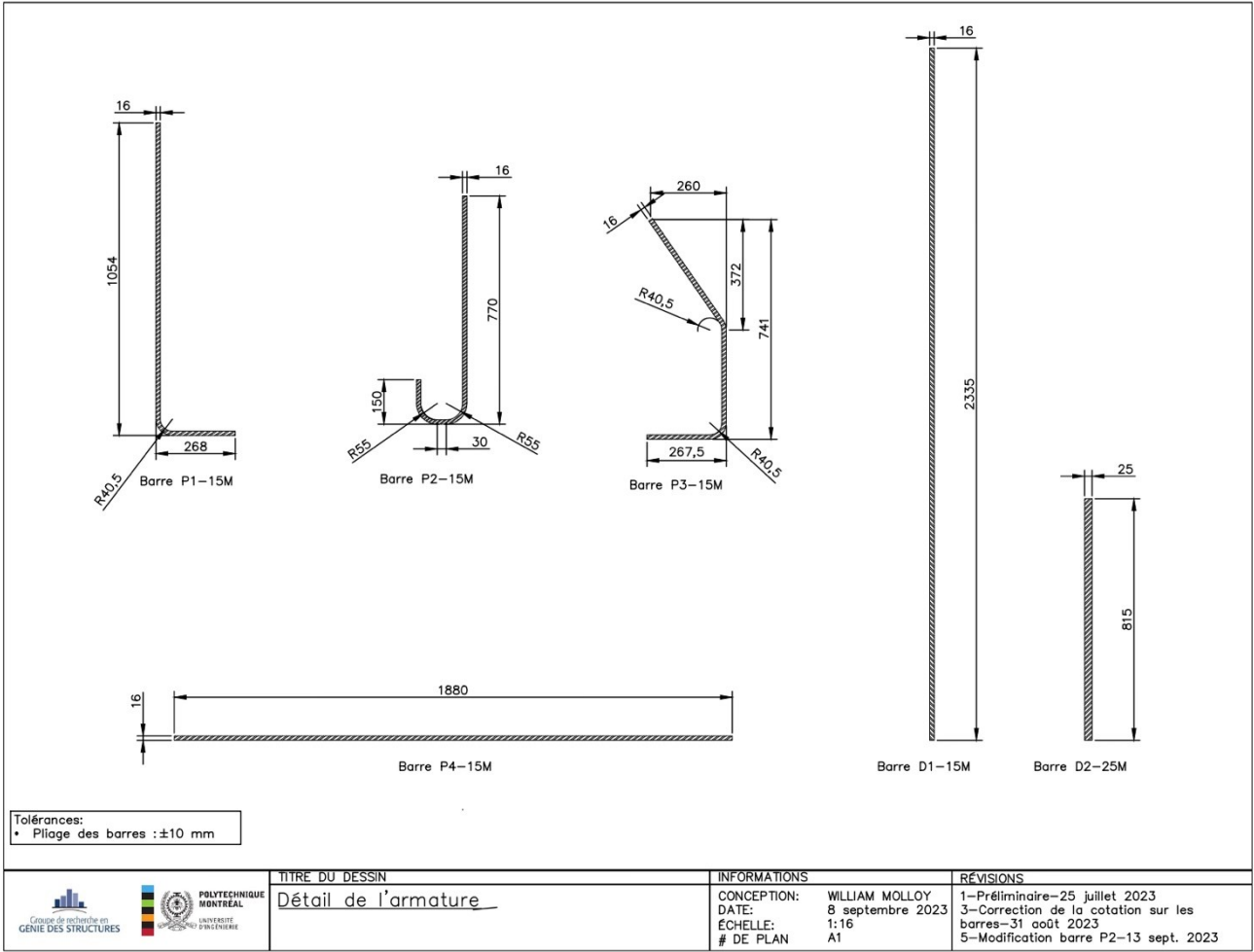


Figure B-6 Détail de l'armature dans le parapet et dans la dalle

ANNEXE C DÉTAILS SUR LES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les résultats individuels de certains capteurs des trois phases de la campagne d'essais sont présentés ici.

C.1 Cas de chargement 1 – Retrait restreint de la coque

Le retrait mesuré avec les jauges doit être traité pour enlever les sauts dans les déformations dues au changement de température, à la cure (gonflement) et aux manipulations de la coque (décoffrage, déplacement, etc.) Les courbes de retrait de la première coque ne sont pas modifiées puisque la coque n'a pas pu être décoffrée avant de couper les jauges. La Figure C-1 illustre les courbes de retrait de la première coque avec 2 % de fibres en acier.

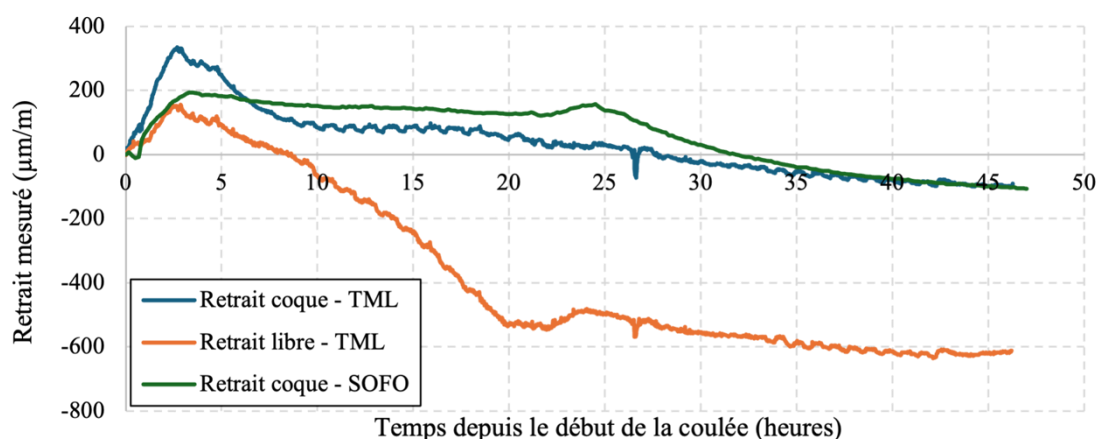


Figure C-1 Retrait restreint et libre dans le BFUP de la coque 1 - BFUP fibre en acier 2 %

Les courbes de retrait de la deuxième coque sont modifiées puisque le décoffrage et la cure créent des pics non réalistes pour le retrait. La Figure C-2 illustre les courbes modifiées ainsi que les courbes avant et après les modifications.

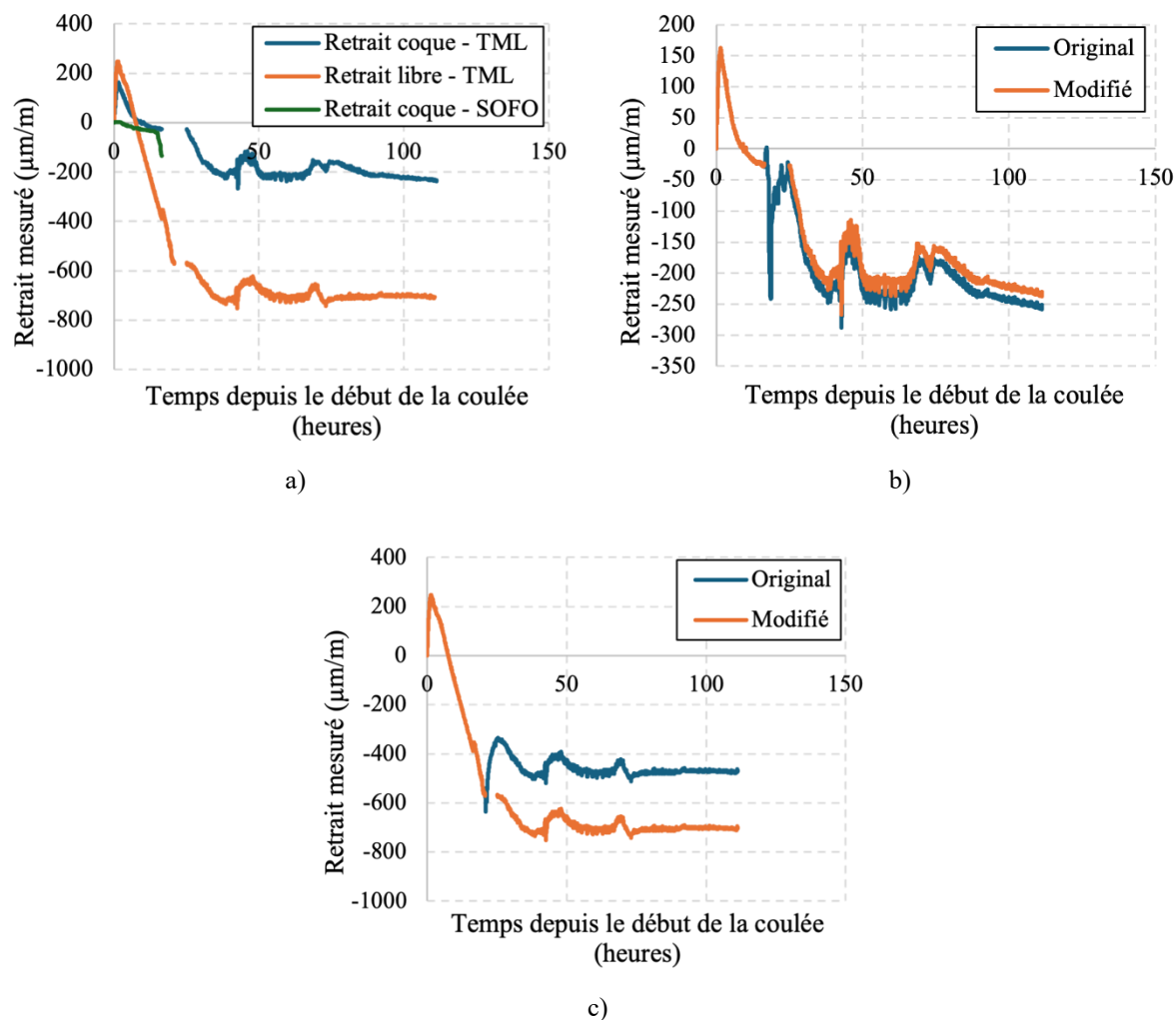


Figure C-2 Retrait restreint et libre dans le BFUP de la coque 2 - BFUP fibre en acier 2 % a) courbes modifiées, b) courbe finale et initiale retrait restreint - TML, c) courbe finale et initiale retrait libre – TML

Les courbes de retrait de la coque 3 sont aussi modifiées pour les mêmes raisons que la coque 2. La Figure C-3 illustre les courbes modifiées ainsi que les courbes avant et après les modifications.

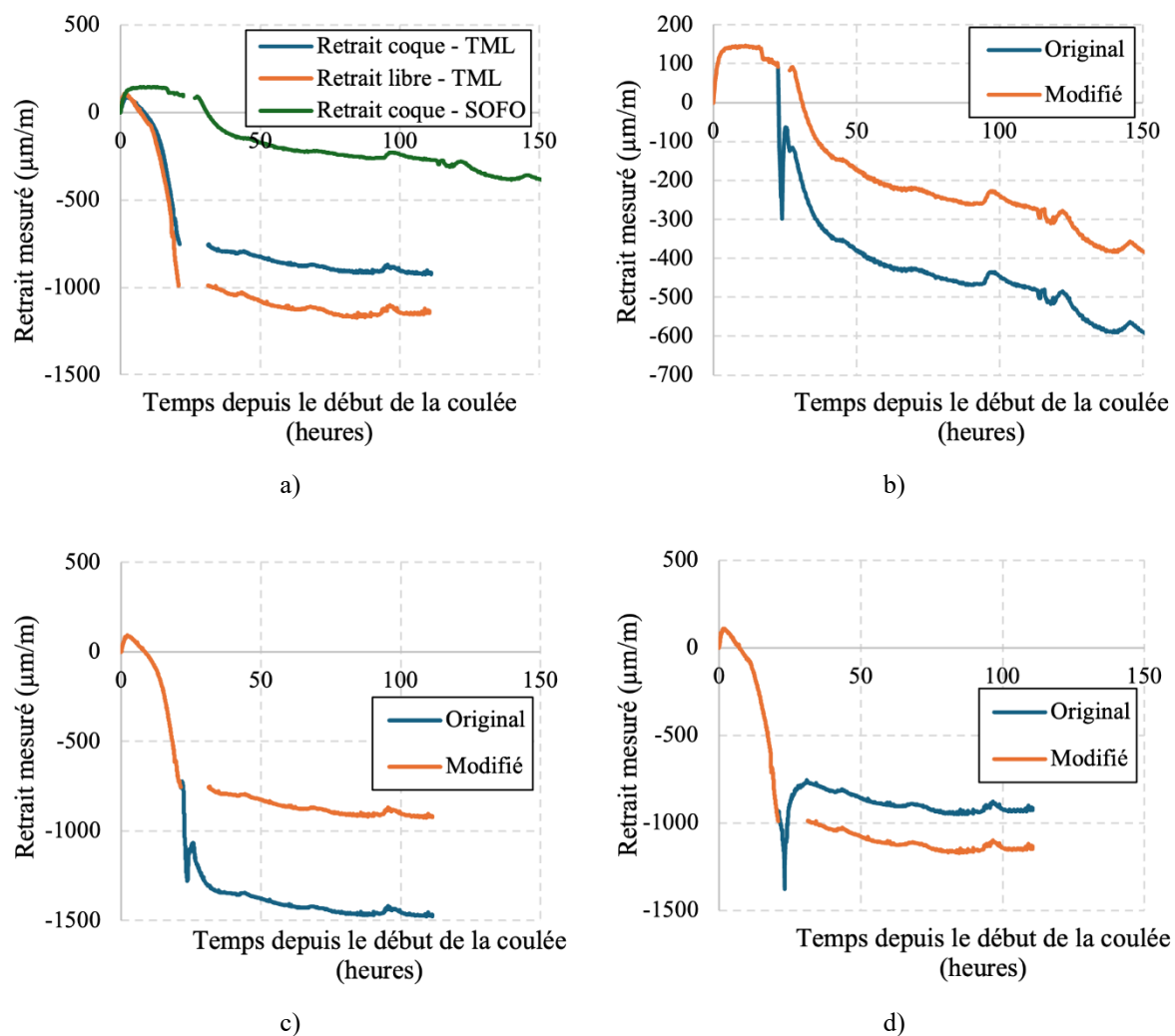


Figure C-3 Retrait restreint et libre dans le BFUP de la coque 2 - BFUP fibre en acier 2 % a) courbes modifiées, c) courbe finale et initiale retrait restreint - SOFO, b) courbe finale et initiale retrait restreint - TML, d) courbes finale et initiale retrait libre - TML

La Figure C-4 illustre la température moyenne du laboratoire. C'est avec ce graphique que la température moyenne de 22 C et la température minimale de 12 C sont déterminées.

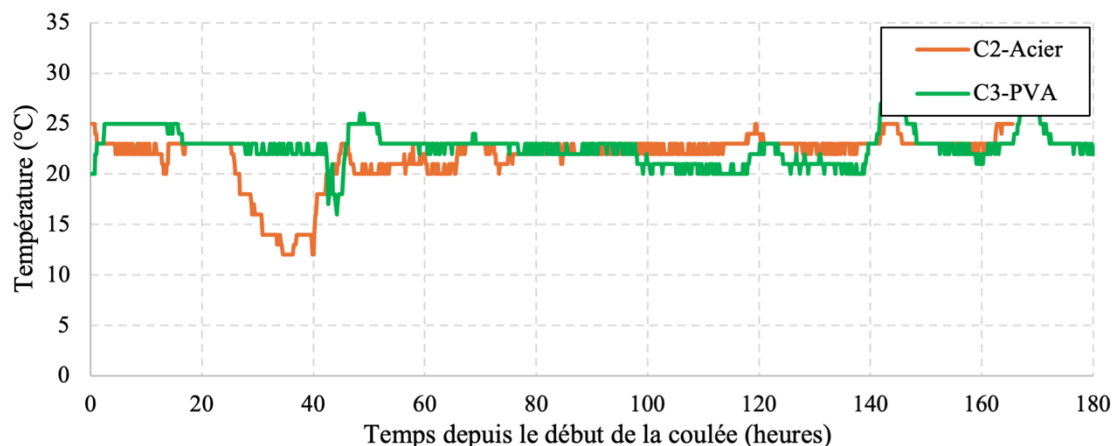


Figure C-4 Température mesurée au laboratoire pour chaque coque

C.2 Cas de chargement 3 – Essais structuraux sur le parapet hybride

Cette section présente des informations supplémentaires sur les essais structuraux menés sur les parapets hybrides. D’abord, les difficultés rencontrées avec le chargement du parapet avec coque en BFUP avec fibres en PVA sont illustrées, suivi par une explication de la mesure du déplacement transversal du parapet et, finalement, les résultats des capteurs pour le déplacement de la dalle du parapet par rapport à la dalle du laboratoire.

C.2.1 Difficultés rencontrées avec le chargement du parapet avec coque en BFUP avec fibres en PVA

Lors du premier essai sur le parapet avec fibres en PVA, des problèmes sur les potentiomètres à la face arrière du parapet ont forcé le redémarrage de l’essai plusieurs fois. Par la suite, un autre problème est apparu lors de l’installation du montage. Quand le contact vérin parapet est fait, du Drystone est placé entre les deux. Le Drystone a coulé sur la dalle à cause d’une fuite dans le coffrage. Lorsque le test a démarré, certains capteurs ne répondaient pas comme ils devaient. Rendu à 300 kN, l’essai est arrêté pour investiguer le problème. La cause du problème est que le Drystone a coulé entre le parapet et une plaque de post-tension en acier, ce qui crée une butée qui change le comportement du parapet (Figure C-5).

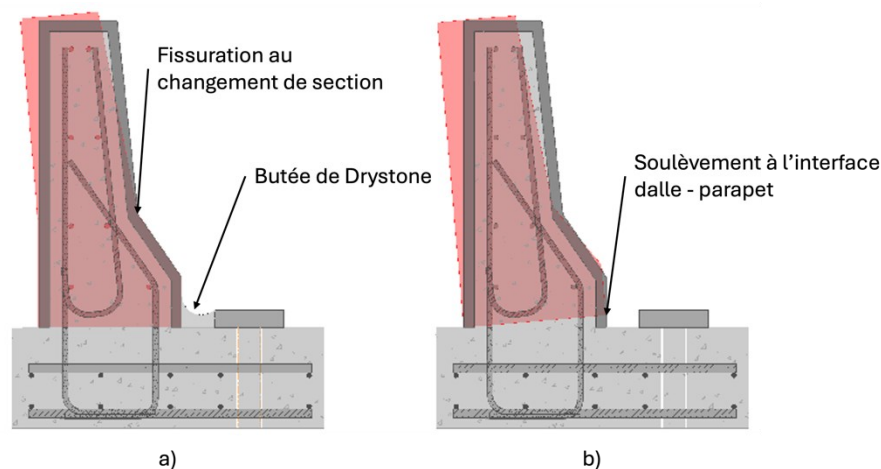


Figure C-5 Déformation du parapet a) avec la butée de Drystone b) sans la butée

La butée est enlevée et l'essai est redémarré jusqu'à la fin du test. La Figure 4-53a présente le déplacement obtenu selon la force pour les deux chargements. La Figure 4-53b présente le chargement jusqu'à la fin du test. Les deux déplacements sont tirés du SIC puisque c'est le mode de mesure qui est le plus précis pour tous les essais. Le potentiomètre linéaire semblait bloqué au début du test et affichait tous les déplacements avec un décalage. C'est pour cette raison que le LVDT est privilégié pour l'essai suivant. Pour le premier chargement, le comportement est linéaire jusqu'à environ 0.25 mm et il y a un décrochage linéaire jusqu'à 1.75 mm avec 300 kN. Le deuxième essai est moins rigide dû à un pré-endommagement.

C.2.2 Mesure du déplacement du parapet

Lors du chargement du parapet avec coque en BFUP avec fibres en PVA, le potentiomètre n'affiche pas de déplacement avant environ 50 kN. Pour remédier à ce problème, le SIC est utilisé pour représenter le déplacement du parapet. La Figure C-6a illustre le déplacement du parapet avec coque en BFUP avec fibres en PVA mesuré avec le SIC et le potentiomètre et la Figure C-6b avec le parapet avec coque en BFUP avec fibres en acier. Le résultat du LVDT et du SIC est similaire pour le parapet avec fibres en acier ce qui permet de conclure que le déplacement obtenu avec le SIC est acceptable pour déterminer le déplacement du parapet avec fibres en PVA. L'écart entre le LVDT et le SIC s'explique

par le fait que le SIC mesure le déplacement sur la face avant du parapet et que le LVDT le mesure sur la face arrière.

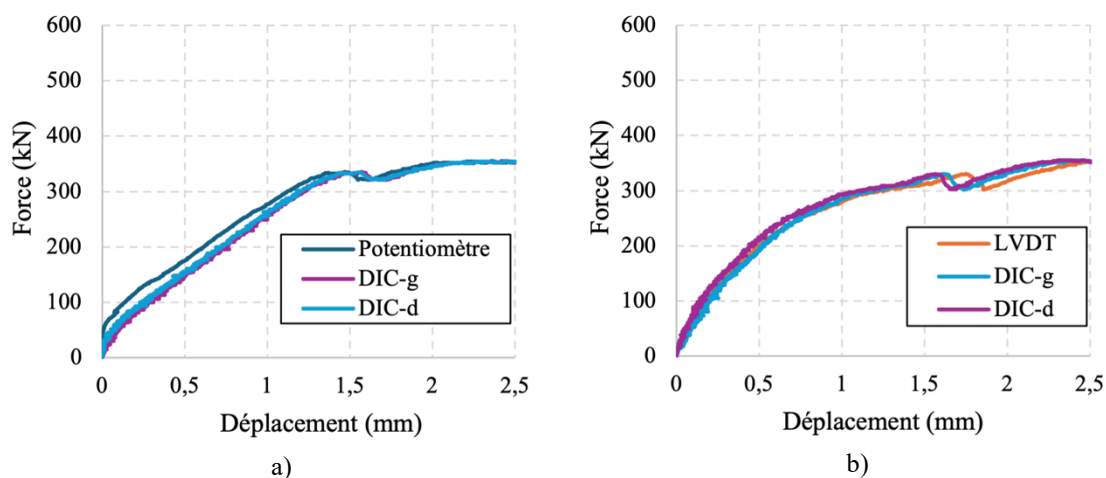


Figure C-6 Force déplacement des parapets avec les trois types d'instruments, a) BFUP PVA 3 %, c) BFUP acier 2 %

C.2.3 Résultats des capteurs pour le déplacement de la dalle du parapet par rapport à la dalle du laboratoire

La Figure C-7 présente le déplacement de la dalle du parapet PVA. Les déplacements ne dépassent pas 50 μm ce qui confirme que la dalle du parapet était bien fixée sur la dalle du laboratoire.

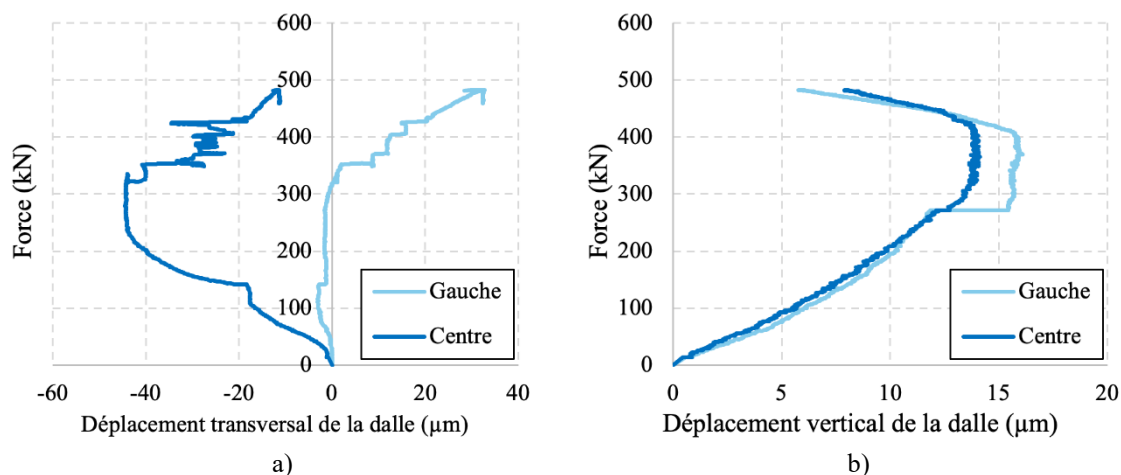


Figure C-7 Déplacement de la dalle parapet PVA 3 % a) transversal b) vertical

La Figure C-8 présente le déplacement de la dalle du parapet avec fibres d'acier. Les déplacements sont encore plus petits, ils sont de 10 μm ce qui confirme encore que la dalle du parapet était très bien fixée sur la dalle du laboratoire.

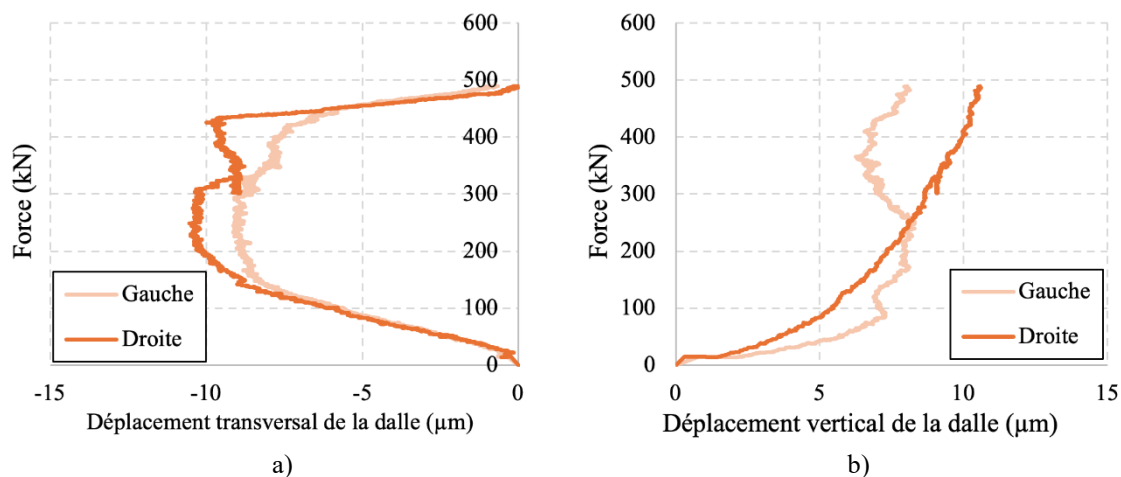


Figure C-8 Déplacement de la dalle parapet acier 2 % a) transversal b) vertical