

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Conception et analyse du comportement mécanique de parapets préfabriqués
pour les ponts avec joints de connexion en bétons fibrés ultra performants**

FRÉDÉRICK GENDRON

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 2019

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Conception et analyse du comportement mécanique de parapets préfabriqués pour les ponts avec joints de connexion en bétons fibrés ultra performants

Présenté par **Frédéric GENDRON**

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

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

Bruno MASSICOTTE, président

Jean-Philippe CHARRON, membre et directeur de recherche

Sanda KOBOEVIC, membre

REMERCIEMENTS

Réaliser un projet de recherche de cette ampleur ne se fait pas seul. Ce projet a été l'occasion pour moi de travailler avec des personnes très compétentes de qui j'ai beaucoup appris, mais surtout ça été l'occasion de côtoyer des personnes sympathiques avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir à travailler. Par ces quelques lignes je tiens à remercier tous ceux que j'ai côtoyés et qui m'ont appuyé durant ma maîtrise.

Tout d'abord, j'aimerais remercier l'équipe de Béton Brunet à Salaberry-de-Valleyfield pour leur travail et pour m'avoir bien accueilli durant la phase de fabrication des spécimens d'essai. Merci à l'équipe de matériau King, spécialement Julian, de nous avoir fourni des matériaux et d'être venu nous aider pour la coulée des éléments en BFUP. J'apprécie le temps et les efforts que vous avez mis pour nous aider.

Ensuite, je ne saurais oublier les techniciens et associés de recherche qui travaillent au laboratoire de structures à Polytechnique Montréal, qui m'a aidé à passer au travers de la phase expérimentale de ma maîtrise. Merci à Cédric, David, Karima, Mathieu, Martin et Xavier pour vos conseils et pour votre travail. Sans oublier tous mes collègues étudiants et désormais amis m'ayant prêté main forte à un moment ou un autre dans le projet.

Pour terminer, je tiens tout particulièrement à remercier Clélia Desmettre et mon directeur de recherche professeur Jean-Philippe Charron, qui ont été impliqués dans ce projet dès le commencement. C'est en grande partie grâce à votre disponibilité, votre écoute, votre encadrement et vos conseils avisés que j'ai pu accomplir le travail présenté dans ce mémoire. À vos côtés j'ai beaucoup appris et je vous en remercie.

RÉSUMÉ

Une grande proportion des parapets en béton armé que l'on retrouve sur les ponts au Québec montre systématiquement des signes de détérioration précoces. Cela implique nécessairement des travaux de réparation ou de reconstruction qui sont à la fois coûteux pour les propriétaires d'ouvrages et coûteux en perte de temps causée par les chantiers routiers pour les usagers. Pour répondre à cette problématique, l'utilisation de parapets préfabriqués et l'utilisation de bétons fibrés ultra performants (BFUP) est envisagée afin d'accélérer les travaux de construction et d'augmenter la durabilité des parapets.

Deux modèles de parapets préfabriqués en béton armé ont été conçus, et analysés à l'aide de modélisations numériques par éléments finis non linéaires tridimensionnels. Le premier modèle étudié est le parapet hybride, dont le développement avait été entamé lors d'études précédentes, qui est composé d'un cœur en béton à haute performance et d'une coque en BFUP. Le deuxième modèle développé est le parapet MTQ301 préfabriqué, qui est la version préfabriquée du parapet MTQ301 standard utilisé présentement au Québec.

Une étude paramétrique a été réalisée à l'aide de modélisations numériques sur les deux modèles de parapets préfabriqués développés afin d'évaluer de façon préliminaire leur comportement selon différentes configurations. Cette étude a permis de faire quelques constats principaux. Tout d'abord, il a été évalué que la résistance des parapets est plus faible lorsque le chargement est appliqué à une extrémité plutôt qu'au centre du parapet. Ensuite, la capacité maximale des parapets étudiés augmente avec l'augmentation de la longueur des éléments préfabriqués jusqu'à une longueur seuil, évaluée à 4 m, à partir de laquelle la performance n'augmente plus significativement. Finalement, l'ajout d'une clé de cisaillement longitudinale entre les éléments de parapets préfabriqués permet d'augmenter la capacité maximale de ceux-ci en transférant les efforts d'un élément à l'autre. Il a été évalué que l'effet d'une clé de connexion est plus important lorsque la charge est appliquée à l'extrémité d'un parapet, ce qui compense pour la plus faible résistance pour ce cas de chargement.

Des spécimens d'essai ont ensuite été construits à échelle réelle pour être testés expérimentalement sous un chargement quasi-statique. Trois essais ont été réalisés, soit un essai de chargement appliqué à l'extrémité pour les deux modèles de parapets développés et un cas de chargement à

l'extrémité d'une série de parapets MTQ301 préfabriqués avec une clé de cisaillement longitudinale.

Les résultats expérimentaux ont permis de valider l'exactitude des modèles numériques. Les modèles numériques validés ont par la suite été utilisés pour confirmer la performance des parapets développés selon les critères prescrits par la norme CSA-S6 c'est-à-dire des parapets de 4 m de longueur chargés par une plaque de chargement de 2400 mm. Les résultats de ces modélisations ont montré que les deux types de parapets développés surpassent largement la charge pondérée de conception, autant pour un chargement appliqué au centre que pour un chargement appliqué à l'extrémité.

ABSTRACT

A large proportion of Quebec's concrete bridge barriers consistently shows signs of early age deterioration. This necessarily involves retrofit or reconstruction work that is either costly for the bridge owners and costly in terms of time loss caused by the roadworks for the public. To address this issue, the use of prefabricated bridge barrier and the use of ultra high-performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) is considered in order to accelerate the construction work and to increase the durability of the barriers.

Two prototypes of prefabricated concrete bridge barriers were designed and analysed using three-dimensional nonlinear finite element modelling. The first barrier studied is the hybrid barrier, whose development had been initiated in previous studies, which is composed of a high-performance concrete core and a shell in UHPFRC. The second barrier studied is the prefabricated MTQ301 barrier, which is a prefabricated version of the standard cast-in-place MTQ301 barrier currently used in Quebec.

A parametric study was carried out using numerical modelling on the two prototypes of barriers developed in order to evaluate their behaviour in different conditions. This study made it possible to make some main observations. First, it was assessed that the resistance of the barriers is lower when the load is applied at the end rather than at the center of a barrier. Then, the maximum capacity of the studied barriers increases with the increase of the length of the prefabricated elements up to a threshold length evaluated at 4 m from which the performance no longer increases significantly. Finally, the addition of a longitudinal shear key between the prefabricated barriers increases the maximum capacity of the barriers by transferring the efforts from one element to another. It has been evaluated that the effect of a connection key is greater when the load is applied to the end of a barrier which compensates for the lower resistance for this loading case.

Test specimens were built at full scale for experimental testing under quasi-static loading. Three tests were carried out. The loading was applied to the end of the barrier for the two prototypes of barriers developed and a loading case at the end of a series of two prefabricated MTQ301 barrier with a longitudinal shear key.

The experimental results were used to validate the accuracy of the numerical results. The validated numerical models were used to confirm the performance of the developed barriers according to the criteria prescribed by the CSA-S6 standard which means 4 m long barrier loaded by a 2400 mm

long loading plate. The results of these models showed that the two type of developed precast concrete bridge barriers largely surpass the weighted design load as much for a loading applied at the center as at the end of barriers.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES.....	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XXIII
LISTE DES ANNEXES.....	XXIV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique.....	1
1.2 Contexte du projet	3
1.3 Objectifs	7
1.4 Méthodologie	8
1.5 Organisation du mémoire	8
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	10
2.2 Évaluation de la capacité structurale d'un parapet.....	13
2.2.1 Méthode analytique avec les lignes de rupture	13
2.2.2 Exemple de calcul avec le parapet MTQ301	17
2.3 Excentricité de la charge	21
2.4 Continuité longitudinale des parapets préfabriqués	23
2.4.1 Considérations générales.....	24
2.4.2 Types de connexion pour la continuité	25
2.5 Bétons renforcés de fibres	33

CHAPITRE 3	CONCEPTION DES PARAPETS PRÉFABRIQUÉS	43
3.1	Concepts de parapets proposés.....	44
3.1.1	Parapet hybride à niche ouverte	44
3.1.2	Parapet MTQ301 préfabriqué à niche ouverte	46
3.2	Modèles numériques	48
3.2.1	Présentation des propriétés des modèles numériques	48
3.3	Modélisation du parapet hybride à niche ouverte	57
3.4	Modélisation du parapet MTQ301 préfabriqué à niche ouverte	60
3.5	Études paramétriques sur les propriétés matériaux	63
3.5.1	Effet du pourcentage de fibres dans le BFUP	64
3.5.2	Effet du retrait du BFUP	70
3.6	Étude paramétrique sur les effets structuraux	73
3.6.1	Effet de l'excentricité du chargement	74
3.6.2	Effet de longueur du parapet	77
3.6.3	Effet de la plaque de chargement	82
3.6.4	Effet de la continuité	86
3.6.5	Synthèse	97
CHAPITRE 4	MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE.....	100
4.1	Configurations d'essai sélectionnées	100
4.1.1	Généralités.....	100
4.1.2	Choix des conditions d'essai	101
4.1.3	Modifications aux concepts.....	103
4.2	Fabrication des spécimens d'essai.....	105
4.3	Montage expérimental.....	111

4.4	Instrumentation.....	113
4.5	Protocole de chargement	118
CHAPITRE 5 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX		119
5.1	Programme de caractérisation des matériaux.....	119
5.1.1	Propriétés des bétons	119
5.1.2	Propriétés des armatures.....	121
5.2	Essais sur parapets.....	122
5.2.1	Essai sur parapet hybride de 2 m soumis à un chargement à l'extrémité.....	122
5.2.2	Essai sur deux parapets MTQ301 préfabriqués de 2 m connectés soumis à un chargement près de la clé de connexion.....	126
5.2.3	Essai sur deux parapets MTQ301 préfabriqués de 2 m connectés soumis à un chargement à l'extrémité libre.....	131
5.2.4	Comparaison du comportement des parapets.....	134
CHAPITRE 6 RÉSULTATS DES MODÈLES NUMÉRIQUES.....		136
6.1	Principales modifications entre les modèles préliminaires et finaux	136
6.1.1	Propriétés des matériaux	136
6.1.2	Effet de l'orientation des fibres	137
6.1.3	Effet du retrait	137
6.1.4	Autres paramètres modifiés.....	139
6.2	Modèle du parapet hybride.....	140
6.2.1	Comparaison des résultats numérique et expérimentaux	140
6.2.2	Validation de la performance du parapet hybride selon la norme CSA-S6	143
6.3	Modèle du parapet MTQ301 préfabriqué.....	146
6.3.1	Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour le chargement sur l'extrémité connectée	146

6.3.2 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour le chargement à l'extrémité non-connectée	150
6.3.3 Validation de la performance du parapet MTQ301 préfabriqué selon les critères de la norme CSA-S6	155
6.4 Signification des analyses	158
CHAPITRE 7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	159
7.1 Rappel des objectifs	159
7.2 Conclusions	160
7.3 Recommandations	164
BIBLIOGRAPHIE	167
ANNEXES	171

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 - Charges statiques non-pondérées de conception des dispositifs de retenue (CSA, 2014).....	12
Tableau 2.2 - Paramètres utilisés pour évaluer la capacité maximale du parapet MTQ301	19
Tableau 2.3 - Capacité du parapet MTQ301 déterminée par la méthode des lignes de rupture, pour $L_t = 700$ mm	19
Tableau 2.4 - Capacité du parapet MTQ301 déterminée par la méthode des lignes de rupture, pour $L_t = 2400$ mm	19
Tableau 2.5 - Pertes de capacité pour un chargement à l'extrémité versus un chargement centré	22
Tableau 2.6 - Composition et propriétés de différentes gammes de bétons (Charron & Desmettre, 2013).....	33
Tableau 2.7 - Indicateurs de durabilité de différentes gammes de bétons en condition non fissurée (Charron & Desmettre, 2013).....	39
Tableau 2.8 - Ouverture de fissures et perméabilité à l'eau selon la contrainte dans l'armature lors d'essai sur tirants (Charron & Desmettre, 2013)	40
Tableau 3.1 - Propriétés des interfaces utilisées dans les modélisations	50
Tableau 3.2 - Taille des éléments pour chacun des composants des modèles	54
Tableau 3.3 - Propriétés des bétons utilisées dans les modélisations préliminaires (données extraites de (Charron et al., 2013)).....	56
Tableau 3.4 : Capacité maximale d'un parapet hybride de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm sous chargement centré et à l'extrémité.....	59
Tableau 3.5 - Capacité maximale d'un parapet MTQ301 préfabriqué de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm sous chargement centré et à l'extrémité	62
Tableau 3.6 - Résumé des propriétés utilisées pour les différents BFUP considérés	65
Tableau 3.7 - Capacité maximale du parapet hybride selon le pourcentage de fibres dans la coque pour un chargement central	67

Tableau 3.8 - Capacité maximale du parapet hybride selon le pourcentage de fibres dans la coque pour un chargement excentré	67
Tableau 3.9 - Ouvertures de fissures dans la niche pour un chargement centré	69
Tableau 3.10 - Ouvertures de fissures dans la niche pour un chargement centré	72
Tableau 3.11 - Diminution de la capacité maximale pour les parapets hybride et MTQ301 préfabriqué de 2 m dû à l'excentricité de la charge	76
Tableau 3.12 - Augmentation de la capacité maximale du parapet hybride avec augmentation de sa longueur.....	79
Tableau 3.13 – Diminution de capacité maximale du parapet hybride de différentes longueurs due à l'excentricité de la charge.....	82
Tableau 3.14 - Effet de plaques sélectionnées sur la capacité maximale de parapets de 4 m sous chargement excentré.....	84
Tableau 3.15 - Effet de plaques sélectionnées sur la capacité maximale de parapets de 4 m sous chargement excentré.....	85
Tableau 3.16 - Propriétés du mortier utilisé dans les clés de connexion longitudinale	88
Tableau 3.17 - Effet de la connexion longitudinale sur la capacité maximale des parapets hybrides	92
Tableau 5.1 - Propriétés des bétons.....	120
Tableau 5.2 - Propriétés des barres d'armatures	121
Tableau 6.1 - Capacité maximale d'un parapet hybride de 4 m chargé par une plaque de chargement de 2400 mm	144
Tableau 6.2 - Capacité maximale de parapets MTQ301 préfabriqués de 4 m chargés par une plaque de chargement de 2400 mm	156
Tableau B .1 - Étapes générales de l'installation du montage	186

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 - Fissures verticales 7 mois après la reconstruction du parpaet sur le pont Vachon (A-13, Laval, QC) (Cusson & Repette, 2000)	2
Figure 1.2 - Parapets préfabriqués développés et étudiés lors de projets de recherches à Polytechnique Montréal	4
Figure 1.3 - Parapets préfabriqués hybrides TL-5 testés par Charron et al. (2013)	5
Figure 2.1 - Exemples d'essais de chargement sur des parapets en béton	11
Figure 2.2 - Position d'application des charges sur les dispositifs de retenue (CSA, 2014).....	13
Figure 2.3 - Plans de rupture utilisés pour la dérivation des équations de lignes de rupture présentées dans la norme de l'AASHTO (2017).....	14
Figure 2.4 - Plans de rupture utilisés pour la dérivation des équations de lignes de rupture proposées par Fadaee et al. (2018)	14
Figure 2.5 - Coupe type du parapet MTQ301 (MTQ, 2017).....	17
Figure 2.6 - Lignes de rupture considérées lors de l'analyse du parapet de référence.....	18
Figure 2.7 - Plans de rupture d'un parapet en béton armé selon le type de chargement (Alberson et al., 2004).....	21
Figure 2.8 - Connexions longitudinales métalliques courantes (1) tige et anneaux; (2) rainure et languette; (3) plaque d'insertion; (4) gougeons doubles; (5) poutre en I; et (6) chenal de raccordement (Atahan, 2006).....	26
Figure 2.9 - Connexion boulonnée croisée (Bligh et al., 2003)	28
Figure 2.10 - Connexions coulées en place (a) clé de cisaillement (b) ajout de barres dans la connexion	29
Figure 2.11 - Parapet préfabriqué étudié par Namy et al. (2015a).....	31
Figure 2.12 - Comparaison des résultats numériques (E.F.) et expérimentaux (Exp) pour chacune des configurations étudiées par Namy et al. (2015b)	31

Figure 2.13 - Résultats numériques sur des parapets de 4 m connectés ou non (Namy et al., 2015a)	32
Figure 2.14 - Comportement en traction de BFUP et de BFHP (Naaman & Reinhardt, 2003).....	36
Figure 2.15 - Courbes de comportement en traction de BFHP selon l'orientation des fibres(a) comportement pré-pic (contrainte-déformation) et (b) comportement post-pic (contrainte-ouverture de fissure) (Plagué et al., 2017)	37
Figure 2.16 - Courbes de comportement en traction de BFUP selon l'orientation des fibres(a) comportement pré-pic (contrainte-déformation) et (b) comportement post-pic (contrainte-ouverture de fissure).....	38
Figure 3.1 - Parapet hybride à niche ouverte en BFUP - vue de profil Note : dimensions en mm	45
Figure 3.2 - Parapet hybride à niche ouverte en BFUP - vue de face Note : dimensions en mm..	45
Figure 3.3 - Parapet MTQ301 préfabriqué versus parapet MTQ301 – vue de profil Note : dimensions en mm.....	47
Figure 3.4 - Parapet MTQ301 préfabriqué – vue de face Note : dimensions en mm	48
Figure 3.5 - Exemple d'une loi en traction entrée manuellement dans le logiciel ATENA 3D (Červenka et al., 2016)	49
Figure 3.6 - Géométries des modèles	51
Figure 3.7 - Géométries de l'armature	52
Figure 3.8 - Élément fini tétraédrique utilisé (Červenka et al., 2016).....	53
Figure 3.9 - Maillages utilisés pour les modélisations	54
Figure 3.10 - Comportement en traction des bétons (Charron et al., 2013).....	56
Figure 3.11 - Comportement en traction des aciers d'armature (Charron et al., 2013).....	57
Figure 3.12 - Modélisation d'un parapet hybride de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm sous chargement centré et à l'extrémité.....	59
Figure 3.13 - Plan de rupture d'un parapet hybride de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm, (a) chargé au centre et (b) chargé à l'extrémité, $w > 0.3$ mm	59

Figure 3.14 - Contraintes maximales dans les barres d'armatures du parapet hybride de 4 m chargé par une plaque de 2400 mm	60
Figure 3.15 - Modélisation d'un parapet MTQ301 préfabriqué de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm sous chargement centré et à l'extrémité	62
Figure 3.16 - Plan de rupture d'un parapet MTQ301 préfabriqué de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm, (a) chargé au centre et (b) chargé à l'extrémité, $w > 0.3$ mm	62
Figure 3.17 - Contraintes maximales dans les barres d'armatures du parapet MTQ301 préfabriqué de 4 m chargé par une plaque de 2400 mm	63
Figure 3.18 - Courbes de comportement utilisées pour l'étude du pourcentage de fibres du BFUP dans les niches de connexion	65
Figure 3.19 - Courbes de comportement réduites utilisées pour l'étude du pourcentage de fibres du BFUP dans la coque du parapet hybride	66
Figure 3.20 - Effet du pourcentage de fibres dans la coque du parapet hybride	67
Figure 3.21 - Effet du pourcentage de fibres dans la niche du parapet hybride	69
Figure 3.22 - Effet du pourcentage de fibres sur la fissuration de toute dimension dans la niche de connexion au pic ($F_{max} = 868$ kN, $d = 7,8$ mm), aucun flitre sur w	70
Figure 3.23 - Effet du retrait de la niche du parapet hybride	72
Figure 3.24 - Effet du retrait sur la fissuration de toute taille dans la niche de connexion au pic ($F_{max} = 868$ kN, $d = 7.8$ mm), aucun filtre sur w	73
Figure 3.25 - Modèle du parapet hybride de 2 m sous chargement excentré	74
Figure 3.26 - Effet de l'excentricité de la charge sur les parapets hybride et MTQ 301 préfabriqué de 2 m	75
Figure 3.27 - Plans de rupture des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué de 2 m	77
Figure 3.28 - Effet de la longueur du parapet hybride sous chargement centré sur le comportement mécanique	79
Figure 3.29 - Plans de rupture des parapets hybrides de 2, 3, 4 et 6 m, chargement centré ($d \approx 11.5$ mm, $w > 500$ μ m)	80

Figure 3.30 - Effet de la longueur du parapet hybride sous chargement excentrée sur son comportement mécanique	81
Figure 3.31 - Plans de rupture des parapets hybrides de 2, 3 et 4 m, chargés à leur extrémité ($F_{\text{post-pic}} \approx 250 \text{ kN}$, $w > 500 \mu\text{m}$).....	81
Figure 3.32 - Effet de la longueur de la plaque de chargement sur le comportement mécanique des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué sous chargement excentré.....	83
Figure 3.33 - Effet des plaques chargement sélectionnées sur le plan de rupture de parapets de 4 m sous chargement excentré.....	84
Figure 3.34 - Effet de la longueur de la plaque de chargement sur le comportement global des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué sous chargement centré.....	85
Figure 3.35 - Effet des plaques chargement sélectionnées sur le plan de rupture de parapets de 4 m sous chargement centré	86
Figure 3.36 - Géométrie de la clé de connexion longitudinale modélisée	87
Figure 3.37 - Cas de chargement étudiés pour les parapets connectés longitudinalement	89
Figure 3.38 - Comportement de 2 parapets de 2 m et plaque L700 en présence de la clé de connexion longitudinale (configuration 1).....	90
Figure 3.39 - Comportement de 2 parapets de 4 m et plaque L700 en présence de la clé de connexion longitudinale (configuration 2).....	90
Figure 3.40 - Comportement de 2 parapets de 4 m et plaque L2400 en présence de la clé de connexion longitudinale (configuration 3).....	91
Figure 3.41 - Comparaison fissuration Cas D de chargement, pour les configurations d'essai 2 et 3 ($d \approx 8 \text{ mm}$, $w > 200 \mu\text{m}$)	94
Figure 3.42 - Comportement de 2 parapets de 2 m chargés par plaque L700 en présence de la clé de cisaillement rectangulaire (configuration 1).....	96
Figure 3.43 - Comportement de 2 parapets de 4 m chargés par la plaque L700 en présence de la clé de cisaillement rectangulaire (configuration 2).....	96

Figure 3.44 - Comportement de 2 parapets de 4 m chargés par la plaque L2400 en présence de la clé de cisaillement rectangulaire (configuration 3)	97
Figure 4.1 - Schémas des essais proposés	103
Figure 4.2 - Géométrie de la clé de cisaillement longitudinale (vue de haut) Note : dimensions en mm.....	104
Figure 4.3 - Fabrication du cœur en BO du parapet hybride.....	106
Figure 4.4 - Fabrication du parapet hybride	106
Figure 4.5 - Production des surfaces à granulats exposés	107
Figure 4.6 - Parapet MTQ301 préfabriqué.....	108
Figure 4.7 - Dalle de pont de 2,4 m.....	108
Figure 4.8 - Installation des parapets MTQ301 préfabriqués sur la dalle de pont	109
Figure 4.9 - Coulée de la niche de connexion	110
Figure 4.10 - Assemblage final des spécimens d'essai	111
Figure 4.11 - Schéma du montage expérimental.....	113
Figure 4.12 - Application du chargement excentré sur le parapet hybride	113
Figure 4.13 - Instrumentation pour l'essai sur le parapet hybride de 2 m.....	115
Figure 4.14 - Instrumentation pour l'essai sur les deux parapets MTQ301 préfabriqués avec chargement près de la clé de connexion longitudinale.....	116
Figure 4.15 - Instrumentation pour l'essai sur les deux parapets MTQ301 préfabriqués avec chargement à l'extrémité libre.....	116
Figure 4.16 - Mesure du déplacement à l'arrière du spécimen	117
Figure 4.17 - Positionnement des barres instrumentées sur le spécimen composé d'un parapet hybride de 2 m.....	117
Figure 4.18 - Positionnement des barres instrumentées sur le spécimen composé de deux parapets MTQ301 préfabriqués de 2 m	117
Figure 5.1 - Comportement en traction des BFUP utilisés	121

Figure 5.2 - Courbes contrainte-déformation des aciers d'armature.....	122
Figure 5.3 - Résultats d'essai sur parapet hybride de 2 m soumis à un chargement excentré	125
Figure 5.4 - Progression de la fissuration durant l'essai de chargement excentré sur parapet hybride de 2 m	125
Figure 5.5 - Plan de rupture final d'un parapet hybride de 2 m soumis à un chargement excentré	126
Figure 5.6 - Résultats d'essai sur une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité connectée	129
Figure 5.7 - Progression de la fissuration durant l'essai sur une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité connectée	129
Figure 5.8 - Rupture de la clé de connexion longitudinale sur le parapet non-chargé.....	130
Figure 5.9 - Plan de rupture final d'une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité connectée	130
Figure 5.10 - Résultats d'essai sur une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité libre	133
Figure 5.11 - Progression de la fissuration durant l'essai sur une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité libre	133
Figure 5.12 - Plan de rupture final d'une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité libre	134
Figure 5.13 - Comparaison entre les résultats des trois essais sur parapet préfabriqués réalisés.	135
Figure 6.1 - Lois de comportement en traction considérés dans les modèles	139
Figure 6.2 - Comparaison entre la courbe force-déplacement transversal expérimentale et numérique pour l'essai de chargement excentré sur parapet hybride	141
Figure 6.3 - Comparaison de fissuration pour une charge appliquée d'environ 400 kN pour l'essai de chargement excentré sur parapet hybride	142
Figure 6.4 - Comparaison des plans de rupture finaux pour l'essai de chargement excentré sur parapet hybride	142

Figure 6.5 - Comparaison de l'évolution de la contrainte dans les barres d'armatures instrumentées expérimentale et numérique pour l'essai de chargement excentré sur parapet hybride.....	143
Figure 6.6 - Parapet hybride de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm ³	144
Figure 6.7 - Patron de fissuration à la rupture de parapet hybride soumis à des chargement centré et excentré par une plaque de chargement de 2400 mm	145
Figure 6.8 - Contraintes maximales dans les barres d'armature d'un parapet hybride de 4 m chargé par une plaque de chargement de 2400 mm.....	145
Figure 6.9 - Comparaison entre la courbe force-déplacement transversal expérimentale et numérique pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué	148
Figure 6.10 - Comparaison de fissuration pour une charge appliquée d'environ 250 kN pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué.....	148
Figure 6.11 - Comparaison des plans de rupture finaux pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué	149
Figure 6.12 - Comparaison entre le modèle numérique et les résultats expérimentaux de l'évolution de la contrainte dans les barres d'armatures instrumentées pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué.....	149
Figure 6.13 - Contrainte maximale dans les barres d'armature au pic de la courbe force-déplacement pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité non connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué.....	150
Figure 6.14 - Comparaison entre la courbe force-déplacement transversal expérimentale et numérique pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité non-connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué.....	152
Figure 6.15 - Comparaison de fissuration pour une charge appliquée d'environ 200 kN pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité non-connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué	153
Figure 6.16 - Comparaison des plans de rupture finaux pour l'essai de chargement excentré sur parapet MTQ301 préfabriqué.....	153

Figure 6.17 - Comparaison entre le modèle numérique et les résultats expérimentaux de l'évolution de la contrainte dans les barres d'armatures instrumentées pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité non connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué.....	154
Figure 6.18 - Contrainte maximale dans les barres d'armature au pic de la courbe force-déplacement pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité non connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué.....	154
Figure 6.19 - Parapets MTQ301 préfabriqués de 4 m chargés par une plaque de chargement de 2400 mm.....	157
Figure 6.20 - Patron de fissuration à la rupture de parapet MTQ301 préfabriqué soumis à des chargement centré et excentré par une plaque de chargement de 2400 mm	157
Figure 6.21 - Contraintes dans les barres d'armature de parapet MTQ301 préfabriqué soumis à des chargement centré et excentré par une plaque de chargement de 2400 mm	158
Figure A.1 - Dalle préfabriquée de 2.4 m pour parapet hybride à niche ouverte - vue transversale et vue longitudinale	172
Figure A.2 - Dalle préfabriquée de 2.4 m pour parapet hybride à niche ouverte - détail de l'armature au lit supérieur	173
Figure A.3 - Dalle préfabriquée de 2.4 m pour parapet hybride à niche ouverte - détail de l'armature au lit inférieur	174
Figure A.4 - Dalle préfabriquée de 2.4 m pour parapet hybride à niche ouverte - géométrie des barres	175
Figure A.5 - Parapet préfabriqué TL-5 hybride à niche ouverte - vue de profil	176
Figure A.6 - Parapet préfabriqué TL-5 hybride à niche ouverte - vue de dessus et détail de la clef de connexion longitudinale	177
Figure A.7 - Parapet préfabriqué TL-5 hybride à niche ouverte - vue de face	178
Figure A.8 - Parapet préfabriqué TL-5 hybride à niche ouverte - géométrie des barres	179
Figure A.9 - Parapet préfabriqué MTQ301 TL-5 à niche ouverte - vue de profil	180

Figure A.10 - Parapet préfabriqué MTQ301 TL-5 à niche ouverte - vue de dessus et détail de la clef de connexion longitudinale	181
Figure A.11 - Parapet préfabriqué MTQ301 TL-5 à niche ouverte - vue de face.....	182
Figure A.12 - Parapet préfabriqué MTQ301 TL-5 à niche ouverte - géométrie des barres.....	183
Figure A.13 - Dalle de 4.4 m pour parapet MTQ301 préfabriqué - vue longitudinale, vue transversale et géométrie des barres.....	184
Figure A.14 - Dalle de 4.4 m pour parapet MTQ301 préfabriqué - détail de l'armature au lit supérieur et au lit inférieur	185

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATENA	Advance Toll 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
CEB-FIP	Fédération internationale du béton
CSA	Association canadienne de normalisation
CSA-S6	Code canadien sur le calcul des ponts routiers
DOT	Department of Transportation
FHWA	Federal Highway Administration
HPFRC	High-Performance Fiber Reinforced Concrete
LR	Ligne de rupture
LVDT	Linear Variable Displacement Transducer
MTQ	Ministère des transports du Québec
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
PL	Niveau de performance
RILEM	Réunion internationale des laboratoires et experts des matériaux
TL	Niveau d'essai
TxDOT	Texas Department of Transportation
UHPRFC	Ultra High-Performance Fiber Reinforced Concrete

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Plans des parapets préfabriqués.....	171
Annexe B	Étapes de l'installation du montage expérimental.....	186
Annexe C	Liste de contrôle pour les essais.....	189

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Problématique

Les glissières de sécurité sont des éléments omniprésents et essentiels de notre réseau routier. Celles-ci protègent les usagers de la route contre les dangers présents aux alentours des axes routiers lors d'éventuelles sorties de routes. Il existe plusieurs types de glissières de sécurité pour différents contextes d'utilisation. Dans ce mémoire, il sera question de glissières de sécurité rigides en béton armé utilisés sur les ponts. Ces éléments structuraux, aussi appelés parapets de pont ont comme fonction première de délimiter la bordure du tablier de pont afin de contenir tout véhicule hors de contrôle et d'assurer la sécurité des occupants (CSA, 2014).

Bien que les parapets soient très couramment utilisés et conçus pour résister aux efforts d'impact, ceux-ci montrent systématiquement d'importants signes de détérioration, même après quelques années de service. De façon générale, il est estimé que ces éléments devront être remplacés jusqu'à deux fois sur la durée de vie utile d'un pont, alors qu'il serait vraisemblable de s'attendre à ce que les parapets aient la même durée de vie que les autres éléments structuraux du pont (Staton & Knauff, 2007). Ces interventions fréquentes de réparation ou de remplacement engendrent naturellement des coûts importants pour les propriétaires d'ouvrages, mais ont aussi un impact important sur la congestion routière.

Ces problèmes de détérioration précoce sont expliqués par une combinaison de facteurs. Tout d'abord, les parapets contiennent beaucoup d'armature et sont traditionnellement coulés en place, c'est-à-dire qu'ils sont coulés en chantier directement sur la dalle de pont. La dalle de pont sur laquelle le parapet est coulé ayant une grande rigidité, elle agit comme une retenue à la base du parapet qui, conjointement à la retenue apportée par l'armature du parapet, empêche les déformations dues au retrait. Les contraintes de traction générées par ce retrait restreint causent l'apparition de fissures verticales à intervalles réguliers dans les jours qui suivent la coulée du parapet (Aktan & Attanayaka, 2004). Par exemple, Cusson et Repette (2000) ont étudié l'apparition de cette fissuration après la reconstruction du parapet de pont Vachon sur l'autoroute 13 au nord de Montréal. Ils ont observé des fissures verticales espacées en moyenne au 700 mm sur toute la longueur du pont et ce seulement 7 mois après la reconstruction du parapet. La Figure 1.1 présente la fissuration observée.



Figure 1.1 - Fissures verticales 7 mois après la reconstruction du parpaet sur le pont Vachon (A-13, Laval, QC) (Cusson & Repette, 2000)

Ensuite, les parapets de pont comptent parmi les éléments structuraux les plus exposés aux conditions environnementales comme les cycles de gel-dégel et les chlorures des sels utilisés pour déglacer les routes en hiver. La fissuration précoce due à la méthode de construction facilite la pénétration de l'eau des chlorures dans l'élément et ainsi accélère le processus de dégradation des parapets, notamment par la corrosion des barres d'armatures.

En réponse à cette problématique, quelques solutions ont été proposées. Il n'est pas possible pour des raisons évidentes de sécurité de diminuer l'utilisation de sels sur les routes, les solutions proposées cherchent ainsi à augmenter la résistance des parapets face aux sollicitations environnementales. Premièrement, l'utilisation de parapets préfabriqués permet de réduire grandement la fissuration précoce observée, puisque les déformations dues au retrait surviennent en usine alors que le parapet n'est pas retenu par un élément rigide. De plus, l'utilisation d'éléments préfabriqués permet d'accélérer la séquence de construction, ou de réparation des ouvrages (Patel, 2008). En effet, les éléments de parapet préfabriqués en usine sont amenés au chantier et directement installés sur la dalle de pont. En comparaison, pour les éléments coulés en place, la séquence de construction au chantier nécessite la pose d'armature, la construction et l'installation de coffrages, la coulée du parapet, et finalement le retrait des coffrages. Par exemple, Duchesneau

(2011) indique que pour un pont de 30 m, l'installation de parapets coulés en place nécessite 18 jours de travaux contre seulement 4 jours en utilisant des parapets préfabriqués.

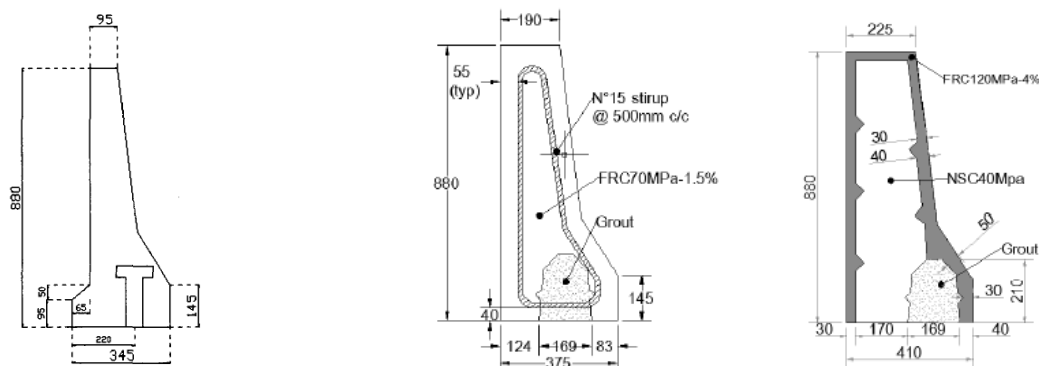
Deuxièmement, l'utilisation de bétons fibrés ultra-performants (BFUP) pour la conception de parapets permet d'utiliser leurs excellentes performances mécaniques pour éliminer leur fissuration précoce, mais surtout leur très faible perméabilité pour limiter la pénétration des agents agressifs (Niamba, 2009).

Troisièmement, l'utilisation de barres d'armature en polymère renforcé de fibres de verre est proposée afin d'éliminer le problème de corrosion de barres d'armature par les chlorures, puisque ce type de barre ne se corrode pas (Sennah et al., 2011).

1.2 Contexte du projet

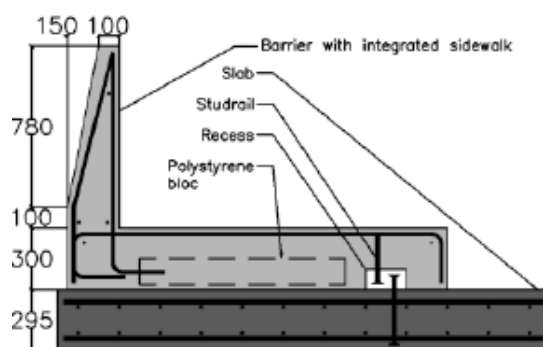
Au fil des années, plusieurs projets de recherche et de développement avec des partenaires industriels ont été réalisés à Polytechnique Montréal afin de répondre à la problématique des parapets coulés en place qui présentent une durabilité limitée.

Niamba (2009) a tout d'abord développé et testé en laboratoire des concepts de parapets préfabriqués de niveau TL-4 (PL-2 selon l'ancienne nomenclature) en béton fibré à hautes performances (BFHP) où en en BFUP avec une connexion précontrainte à la dalle de pont. Duchesneau (2011) a ensuite développé et testé des concepts de parapets préfabriqués monolithiques en BFHP et hybrides, composés d'une coque en BFUP et d'un cœur en béton à hautes performances (BHP), avec une connexion mécanique de type béton armé. Namy (2012) a étudié numériquement et en laboratoire la continuité longitudinale de parapets préfabriqués en BFHP et coulés en place en BHP. Enfin, Thiaw (2014) a développé et testé en laboratoire des parapets préfabriqués en BFHP et en BFUP de niveau TL-4 avec des trottoirs intégrés pour une utilisation en milieu urbain, leur connexion est de type béton armé. Par ailleurs, Charette (2017) a étudié le comportement déformationnel et mécanique de parapets ayant subis des réparations à l'aide de minces couches de BFUP. La Figure 1.2 présente les parapet développés et étudiés dans les projets de Niamba (2009), Duchesneau (2011) et Thiaw (2014).



(a) Parapet entièrement en BFUP avec connexion précontrainte (Niamba, 2009)

(b) Parapet monolithique (à gauche) et hybride (à droite) avec une connexion de type béton armé (Duchesneau, 2011)



(c) Parapet préfabriqué avec trottoir intégré en BFUP avec connexion de type béton armé (Thiaw, 2014)

Figure 1.2 - Parapets préfabriqués développés et étudiés lors de projets de recherches à Polytechnique Montréal

Polytechnique Montréal a également développé des parapets préfabriqués en partenariat avec le Ministère des Transports du Québec (MTQ). La Phase 1 du projet de recherche réalisé visait le développement des parapets préfabriqués de niveau TL-5 (PL-3 selon l'ancienne nomenclature) d'une durabilité améliorée en utilisant du BFUP (Charron et al., 2013). Ces travaux de recherche avaient comme objectifs principaux de développer un nouveau joint de connexion de type béton



Les deux types de parapets hybrides et le parapet coulé en place de référence ont été construits avec une longueur de 2 m. Pour les essais en laboratoire, un chargement transversal quasi-statique a été appliqué au centre des parapets jusqu'à la rupture.

Le parapet hybride à niche ouverte, a présenté une capacité maximale de 565 kN soit 19 % supérieur à la résistance minimale exigée par la norme CSA-S6 (2014) ainsi que des ouvertures de fissures négligeable dans le parapet et la niche en BFUP laissant présager une excellente durabilité. Ces résultats étaient comparables à ceux obtenus pour le parapet MTQ301 de référence qui a montré une capacité maximale de 538 kN, mais avec des ouvertures de fissures plus larges sous chargement de service.

Le parapet hybride à niche fermée a montré une résistance maximale de seulement 260 kN, soit 45 % inférieure à l'exigence de la norme CSAS6 (2013). Cette mauvaise performance a été expliquée par une fissuration interne causée par le dépliement des barres d'armature transversales dans le parapet à proximité de la niche de connexion. Comme ce résultat n'est pas directement lié à la connexion avec une niche fermée, celle-ci pourrait toujours s'avérer performante tel que montré par Duchesneau (2011). Cependant, il faudrait revoir le détail des armatures transversales à proximité de la niche fermée.

Les résultats de la Phase 1 du projet avec le MTQ ont montré que les parapets préfabriqués hybrides avec une niche ouverte en BFUP présentent un potentiel intéressant comme alternative aux parapets coulés en place traditionnels. Cependant, certains aspects techniques doivent être approfondis afin de valider la performance du parapet hybride. En effet, les essais et modélisations numériques réalisées ont été effectuées pour un chargement appliqué au centre d'un parapet seul, alors que l'effet d'un chargement excentré ou de la continuité longitudinale apportée par une série de parapets préfabriqués n'ont pas été étudiés. Le présent projet de recherche vise à compléter le développement initié sur les parapets préfabriqués hybrides et à étudier un autre concept de parapets préfabriqués. Ce projet constitue la Phase 2 du projet de développement de parapets préfabriqués réalisé en partenariat avec le MTQ.

1.3 Objectifs

Ce projet comporte deux objectifs généraux, le premier est de poursuivre le développement du parapet hybride préfabriqué avec une niche ouverte en BFUP. Le comportement mécanique de ce parapet sera étudié pour différentes configurations de matériaux et conditions de chargement.

Le deuxième objectif est de développer une version préfabriquée du parapet MTQ301, habituellement coulé en place, en modifiant seulement sa connexion à la dalle et en conservant sensiblement le même renforcement et les mêmes matériaux. Si le parapet hybride utilise à la fois le BFUP pour sa performance mécanique dans la niche de connexion et pour sa durabilité accrue dans la coque, ce nouveau modèle de parapet utilisera le BFUP seulement pour sa capacité mécanique dans la niche de connexion. On vise un parapet dont la géométrie est plus simple à produire et moins coûteux que le parapet hybride, mais avec tous les avantages d'un parapet préfabriqué, soit une durabilité améliorée et diminution du temps de construction en chantier.

Pour atteindre ces deux objectifs, les parapets préfabriqués hybrides et MTQ301 seront étudiés à la fois numériquement et expérimentalement. Les objectifs spécifiques pour ce projet sont ;

- de réaliser la conception ou la mise à jour de la conception des parapets préfabriqués hybride et MTQ301;
- d'étudier numériquement l'effet des propriétés matériaux comme le dosage en fibres et le retrait sur le comportement des parapets développés;
- d'étudier numériquement l'effet de paramètres structuraux comme l'excentricité du chargement, la longueur des éléments de parapet et la continuité longitudinale sur le comportement des parapets développés;
- d'étudier expérimentalement le comportement des parapets étudiés sous un chargement statique;
- de statuer sur la conformité des parapets vis-à-vis des exigences de la norme CSA-S6 (2014).

1.4 Méthodologie

Pour atteindre les objectifs du projet, la méthodologie se résume en quelques grandes étapes. Pour commencer, une revue de la littérature sur les parapets de ponts est réalisée. Cette revue porte notamment sur les méthodes théoriques d'évaluation de la capacité structurale des parapets, les exigences de conception pour les parapets, l'effet d'un chargement appliqué à l'extrémité d'un parapet en béton armé, la continuité longitudinale de parapets préfabriqués et sur les bétons renforcés de fibres.

Par la suite, des modélisations par éléments finis non linéaires sont effectuées afin de réaliser la conception des parapets à l'étude. Une étude paramétrique préliminaire est faite pour évaluer les effets des différentes conditions structurales à l'étude (chargement à l'extrémité, longueur des éléments, continuité longitudinale, etc.) ainsi que différentes conditions de matériaux (retrait et dosage en fibres). Cette étude paramétrique permet de choisir les conditions à tester expérimentalement.

Ensuite, des parapets ainsi que des dalles de pont sont construits à grandeur réelle pour des essais de validation en laboratoire. Les deux types de parapets développés dans ce projet, soit le parapet hybride à niche ouverte et le nouveau parapet développé dans ce projet à partir du parapet MTQ301, sont testés. Les parapets sont soumis à un chargement quasi-statique jusqu'à la rupture des spécimens d'essai.

Finalement, les résultats expérimentaux sont comparés avec les résultats obtenus numériquement lors de l'étude paramétrique préliminaire afin de valider l'exactitude des modèles numériques. Les modèles validés permettent ensuite d'extrapoler les résultats en procédant à des analyses numériques complémentaire représentant les conditions de chargement normatives et de confirmer si les parapets répondent aux exigences normatives.

1.5 Organisation du mémoire

Afin de présenter efficacement l'intégralité des travaux et des résultats réalisés dans le cadre de ce projet de recherche, ce mémoire est divisé en huit chapitres.

Ce Chapitre 1 introductif met en contexte le projet ainsi que ses objectifs. Ensuite, une revue de la littérature traitant des normes de conception, méthodes théoriques d'analyse, la continuité

longitudinale de parapets préfabriqués ainsi que sur les BFUP est réalisée au Chapitre 2. Par la suite, le Chapitre 3 présente la procédure de conception des parapets étudiés dans ce mémoire, c'est-à-dire leur géométrie, la méthodologie des modélisations numériques et les résultats numériques préliminaires. Ensuite, le Chapitre 4 décrit le programme expérimental du projet, soit le choix des conditions d'essai, la fabrication des spécimens d'essai, le montage expérimental et l'instrumentation. Les résultats des essais expérimentaux sont présentés au Chapitre 5. Ensuite, la procédure de validation des modèles numériques en fonction des résultats expérimentaux est réalisée au Chapitre 6. Enfin, les conclusions et les recommandations sont énoncées au Chapitre 7.

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce Chapitre 2 comprend tout d'abord un bref rappel des exigences de conception des parapets TL-5, soient les parapets à l'étude dans ce projet, ainsi qu'une présentation de méthodes analytiques permettant d'estimer la capacité maximale des parapets. Ensuite, l'effet de l'excentricité du chargement sur la résistance du parapet ainsi que l'effet d'une continuité longitudinale entre les parapets préfabriqués sont décrits car il s'agit de deux paramètres principaux devant être étudiés dans ce projet (cf. Section 1.3). Un lecteur désirant avoir plus d'informations sur les différentes méthodes de connexion des parapets préfabriqués à une dalle de pont est invité à se référer au rapport de la Phase 1 du projet de recherche avec le MTQ (Charron et al., 2013) qui traite de cette question en détails. Finalement, une brève présentation des bétons renforcés de fibres considérés dans ce projet est réalisée.

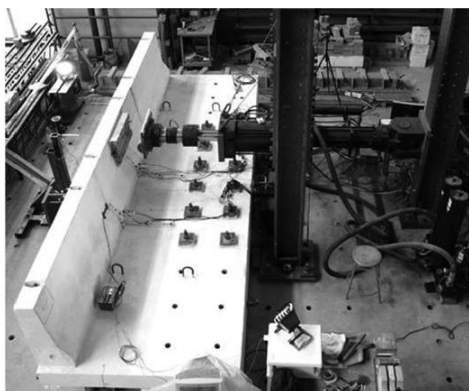
2.1 Exigences de conception des parapets TL-5

De façon générale, l'acceptabilité de tout système de glissière (dont les parapets en béton) doit être validée au moyen d'un essai d'impact à échelle réelle afin d'évaluer la performance structurale de la glissière, le profil de redirection du véhicule et la sécurité des occupants (CSA, 2014). La procédure relative aux essais d'impact et les critères d'acceptation adoptés par la norme canadienne sont ceux présentés dans le rapport 350 de la National Cooperative Highway Research Program, un organisme de recherche financé par les départements de transports américains (DOT) qui propose des solutions aux organismes réglementaires (AASHTO, DOT et Federal Highway administration (FHWA) quant aux problématiques de transports routiers (Ross JR et al., 1993).

La norme CSA (2014) permet cependant d'apporter des modifications à un type de parapet ayant déjà été approuvé via un essai d'impact sans devoir refaire cet essai qui est extrêmement coûteux. Plus spécifiquement, la norme exige de pouvoir démontrer que les modifications apportées ne changent pas l'interaction entre le véhicule et la glissière, notamment au niveau de la résistance de la glissière, de la redirection des véhicules et de la sécurité des occupants (CSA, 2014). Plusieurs méthodes plus simples que l'essai d'impact peuvent alors être utilisées à ces fins. Les méthodes les plus répandues sont : les tests de chargement statique (Figure 2.1a) afin de vérifier la capacité structurale de la glissière et les tests de chargement dynamique, généralement réalisés via un essai de pendule (Figure 2.1b) pour vérifier l'endommagement de la glissière sous un impact. Aussi,

l'utilisation de méthodes analytiques ou de modèles à échelle réduite peut permettre de confirmer que la modification effectuée ne détériore pas l'interaction entre la glissière et le véhicule (Holmes & Ngan, 2010).

Par ailleurs, les études de Niamba (2009) et de Duchesneau (2011) ont comparés les effets d'un chargement statique et d'un chargement dynamique pour un montage expérimental similaire à celui présenté à la Figure 2.1a. Les résultats de ces études ont montré que, pour un même niveau de chargement, les parapets soumis à un chargement dynamique subissent un endommagement moins important que pour un chargement statique appliqué sur le même parapet. Cela est expliqué par la sur-résistance du béton lorsque soumis à un chargement dynamique. Cette analyse tend à montrer qu'un chargement statique est un cas de chargement plus critique qu'un chargement dynamique puisqu'il résulte en un plus grand endommagement pour une même charge appliquée.



(a) Essai de chargement statique
(Namy et al., 2015b)



(b) Essai dynamique de pendule
(El-Salakawy et al., 2004)

Figure 2.1 - Exemples d'essais de chargement sur des parapets en béton

Les parapets sont classifiés selon un niveau de performance TL variant de TL-1 à TL-5 selon le risque associé à un parapet en un site particulier. Le niveau TL-1 est associé au plus faible niveau de risque, ce qui correspond généralement à des routes à bas débit et faible vitesse. Au contraire, le niveau TL-5 est associé au plus haut niveau de risque des routes à haut débit et grande vitesse. Outre le débit de véhicules et la limitation de vitesse, des facteurs comme le dégagement de la glissière, la courbure de la route, le pourcentage de poids lourds et la pente de la route peuvent

influencer le niveau d'essai requis pour un site particulier. Afin d'éviter la confusion avec les études précédentes, il faut mentionner que la nomenclature des niveaux de performance a été modifiée dans la version 2014 de la norme CSA S6 remplaçant les niveaux PL-1 à PL-3 par les niveaux d'essai TL-1 à TL-5 tel qu'utilisé dans la norme de l'AASHTO (2017). Le niveau PL-1 équivaut à TL-2, PL-2 équivaut à TL-4 et PL-3 équivaut à TL-5. Le Tableau 2.1 présente les charges statiques non-pondérées prescrites pour la conception des dispositifs de retenue selon leur niveau d'essai (TL-1 à TL-5).

Tableau 2.1 - Charges statiques non-pondérées de conception des dispositifs de retenue (CSA, 2014)

Niveau d'essai	Charge transversale (kN)	Charge longitudinale (kN)	Charge verticale (kN)
TL-1	25	10	10
TL-2	50	20	10
TL-4	100	30	30
TL-5	210	70	90

Namy (2012) a démontré que seule la charge transversale de 210 kN peut être considérée pour la conception des parapets TL-5. La charge verticale diminue en effet les efforts dans la connexion et la charge longitudinale n'a pas d'influence notable étant donné la grande rigidité du parapet dans cet axe (Namy, 2012). Selon les prescriptions de la norme CSA-S6, la charge transversale doit être multipliée par un facteur de pondération des charges vives de 1.7 et divisée par des coefficients de tenue de 0.75 et 0.9 appliqués respectivement aux résistances du béton et de l'acier. L'utilisation du coefficient de tenue de 0.75 pour l'ensemble « béton armé » est conservatrice et résulte en une charge transversale pondérée de conception de 476 kN.

La charge transversale de 476 kN à considérer lors de la conception de parapets TL-5 doit être appliquée sur une longueur de 2400 mm et à une hauteur de 900 mm depuis la surface supérieure de roulement ou du revêtement routier toujours selon les prescriptions de la norme CSA-S6 (Figure 2.2). Dans le cas d'une dalle de pont recouverte d'une couche d'enrobé bitumineux de

65 mm d'épaisseur, ceci signifie que la charge doit être appliquée à une hauteur de 965 mm depuis le dessus de la dalle de béton.

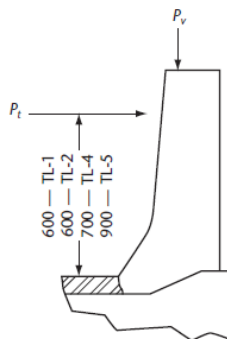


Figure 2.2 - Position d'application des charges sur les dispositifs de retenue (CSA, 2014)

Pour des raisons pratiques en laboratoire, les essais effectués sur des parapets TL-5 lors des phases précédentes de développement ont été réalisés avec une plaque de chargement de 700 mm de longueur. L'influence de l'utilisation d'une plaque plus petite que la longueur de 2400 mm prescrite dans la norme CSA-S6 sera discutée à la Section 3.6.3.

2.2 Évaluation de la capacité structurale d'un parapet

Cette section a pour objectif de présenter une méthode analytique servant à évaluer la capacité maximale de parapets en béton armé. Il s'agit de la méthode avec les lignes de rupture. Cette méthode sera décrite à la Section 2.2.1 puis appliquée sur le parapet MTQ301 à la Section 2.2.2.

2.2.1 Méthode analytique avec les lignes de rupture

La méthode d'évaluation avec les lignes de rupture est la méthode la plus répandue pour estimer théoriquement la capacité structurale d'un parapet en béton armé. Cette méthode consiste à supposer un plan de rupture (ligne de rupture) et à calculer la résistance maximale du parapet en faisant l'équilibre entre le travail interne et le travail externe. Il existe deux groupes d'équations pour lesquels cette méthode a été développée:

- 1) les équations présentées dans la norme de l'AASHTO (2017), qui supposent un plan de rupture triangulaire (Figure 2.3);
- 2) de nouvelles équations proposées pour la norme canadienne par le professeur Sennah et ses collaborateurs de l'Université Ryerson à Toronto (Fadaee et al., 2018) qui supposent un plan de rupture trapézoïdal (Figure 2.4). Ces nouvelles équations ont été proposées suite à quelques observations de plans de rupture réels de forme plus trapézoïdale que triangulaire (Jeon et al., 2008, 2011).

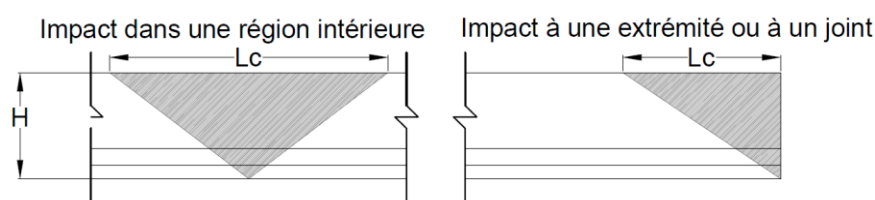


Figure 2.3 - Plans de rupture utilisés pour la dérivation des équations de lignes de rupture présentées dans la norme de l'AASHTO (2017)

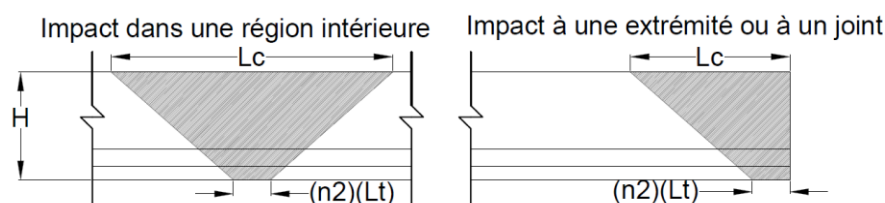


Figure 2.4 - Plans de rupture utilisés pour la dérivation des équations de lignes de rupture proposées par Fadaee et al. (2018)

Pour ces deux méthodes, la résistance maximale est calculée en supposant une sollicitation en flexion biaxiale et pour un chargement linéaire uniformément réparti appliqué au sommet du parapet. Ces méthodes supposent que la dalle est suffisamment résistante pour assurer que le plan de rupture se produise exclusivement dans le parapet et ne s'étende pas dans la dalle.

Dans les équations de l'AASHTO, la longueur critique L_c sur laquelle le plan de rupture se développe doit être calculée selon l'Équation 2.1 ou l'Équation 2.2 respectivement pour un impact

dans la région intérieure du parapet ou à son extrémité. Quant à la résistance flexionnelle, R_w , elle doit être calculée selon l'Équation 2.3 et l'Équation 2.4 respectivement pour un impact dans la région intérieure du parapet ou à son extrémité.

$$L_c = \frac{L_t}{2} + \sqrt{\left(\frac{L_t}{2}\right)^2 + 8H \left(\frac{M_b + M_w}{M_c}\right)} \quad \text{Équation 2.1}$$

$$L_c = \frac{L_t}{2} + \sqrt{\left(\frac{L_t}{2}\right)^2 + H \left(\frac{M_b + M_w}{M_c}\right)} \quad \text{Équation 2.2}$$

$$R_w = \left(\frac{2}{2L_c + L_t}\right) \left(8M_b + 8M_w + \frac{M_c L_c^2}{H}\right) \quad \text{Équation 2.3}$$

$$R_w = \left(\frac{2}{2L_c + L_t}\right) \left(M_b + M_w + \frac{M_c L_c^2}{H}\right) \quad \text{Équation 2.4}$$

Où:

H = hauteur du parapet [m]

L_c = longueur critique de rupture [m]

L_t = longueur de répartition de la force d'impact [m]

M_b = résistance flexionnelle, additionnelle à M_w , d'une poutre au sommet du parapet [kN-m]

M_c = résistance flexionnelle du parapet en porte à faux, par rapport à un axe parallèle à l'axe longitudinal de la glissière, par unité de longueur [kN-m/m]

M_w = résistance flexionnelle du parapet par rapport à l'axe vertical [kN-m]

R_w = résistance totale du parapet [kN]

Dans les nouvelles équations proposées par Fadaee et al. (2018), la longueur critique L_c sur laquelle le plan de rupture se développe, doit être prise égale à l'Équation 2.5 ou l'Équation 2.6, respectivement pour un impact dans la région intérieure du parapet ou à son extrémité. Quant à la résistance flexionnelle, R_w , elle doit être calculée selon l'Équation 2.7 ou l'Équation 2.8, respectivement pour un impact dans la région intérieure du parapet ou à son extrémité.

$$L_c = 0.5L_t(1 + n_2^2) + \sqrt{\frac{1}{4}L_t^2(1 + n_2^2)^2 + \frac{16M_bH + 16M_wH^2 - M_c(n_2L_t^2 + n_2^3L_t^2) - (M_{c\ base} - M_c)(n_2^2L_t^2 - n_2L_t^2 - n_2^3L_t^2)}{2M_c}} \quad \text{Équation 2.5}$$

$$L_c = 0.5L_t(1 + n_2^2) + \sqrt{\frac{1}{4}L_t^2(1 + n_2^2)^2 + \frac{2M_bH + 2M_wH^2 - M_c(n_2L_t^2 + n_2^3L_t^2) - (M_{c\ base} - M_c)(n_2^2L_t^2 - n_2L_t^2 - n_2^3L_t^2)}{2M_c}} \quad \text{Équation 2.6}$$

$$R_w = \left(\frac{1}{2L_c - L_t - n_2^2L_t} \right) \left(16M_b + 16M_wH + \frac{M_c(L_c^2 - n_2^2L_tL_c) + 2(M_{c\ base} - M_c)(n_2L_tL_c - n_2^2L_t^2)}{H} \right) \quad \text{Équation 2.7}$$

$$R_w = \left(\frac{1}{2L_c - L_t - n_2^2L_t} \right) \left(2M_b + 2M_wH + \frac{M_c(L_c^2 - n_2^2L_tL_c) + 2(M_{c\ base} - M_c)(n_2L_tL_c - n_2^2L_t^2)}{H} \right) \quad \text{Équation 2.8}$$

Où:

H = hauteur du parapet [m]

L_c = longueur critique de rupture [m]

L_t = longueur de répartition de la force d'impact [m]

M_b = résistance flexionnelle, additionnelle à M_w , d'une poutre au sommet du parapet [kN-m]

M_c = résistance flexionnelle du parapet en porte à faux, par rapport à un axe parallèle à l'axe longitudinal de la glissière, par unité de longueur [kN-m/m]

$M_{c\ base}$ = résistance flexionnelle de la base du parapet en porte à faux, par rapport à un axe parallèle à l'axe longitudinal de la glissière, par unité de longueur

M_w = résistance flexionnelle du parapet par rapport à l'axe vertical, par unité de longueur [kN-m/m]

R_w = résistance totale du parapet [kN]

2.2.2 Exemple de calcul avec le parapet MTQ301

Les équations présentées à la Section 2.2.1 ont été appliquées au parapet MTQ301 afin de comparer les deux types d'équations (AASHTO, Fadaee et al.) entre elles. Le parapet MTQ301, utilisé comme parapet de référence et illustré à la Figure 2.6, est un modèle de parapet standard coulé en place de niveau TL-5 utilisé actuellement au Québec.

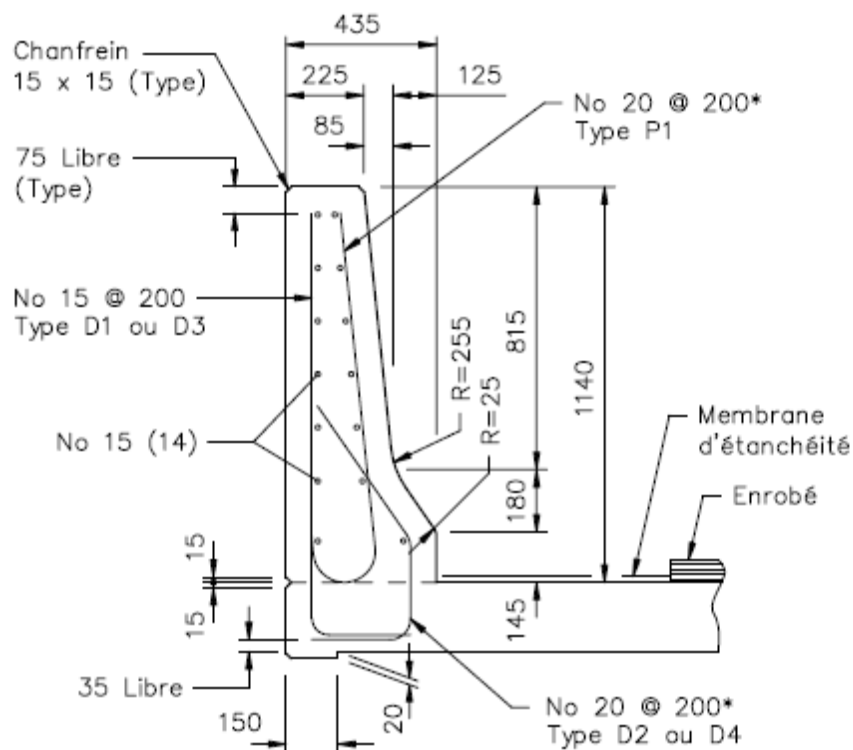


Figure 2.5 - Coupe type du parapet MTQ301 (MTQ, 2017)

Pour chacun des deux types d'équations (AASHTO, Fadaee et al.) et donc pour chacune des deux formes géométriques proposées (triangulaire ou trapézoïdale), deux versions des lignes de ruptures ont été étudiées (Figure 2.6). Ces lignes de rupture ont été numérotées LR1 et LR2 pour la forme triangulaire (AASHTO, 2017) et LR3 et LR4 pour la forme trapézoïdale. Les lignes de rupture LR1 et LR3 supposent une rupture sur la hauteur complète du parapet, alors que les lignes de rupture LR2 et LR4 supposent une rupture seulement dans la partie supérieure du parapet (au-dessus du point de changement de pente). Le cas où la rupture se produit sur toute la hauteur du

parapet correspond directement à ce qui est prescrit pour l'application de ces deux types d'équations. Cependant, le cas où la rupture se produirait seulement dans la partie supérieure est assez réaliste pour qu'il soit nécessaire de procéder à cette vérification.

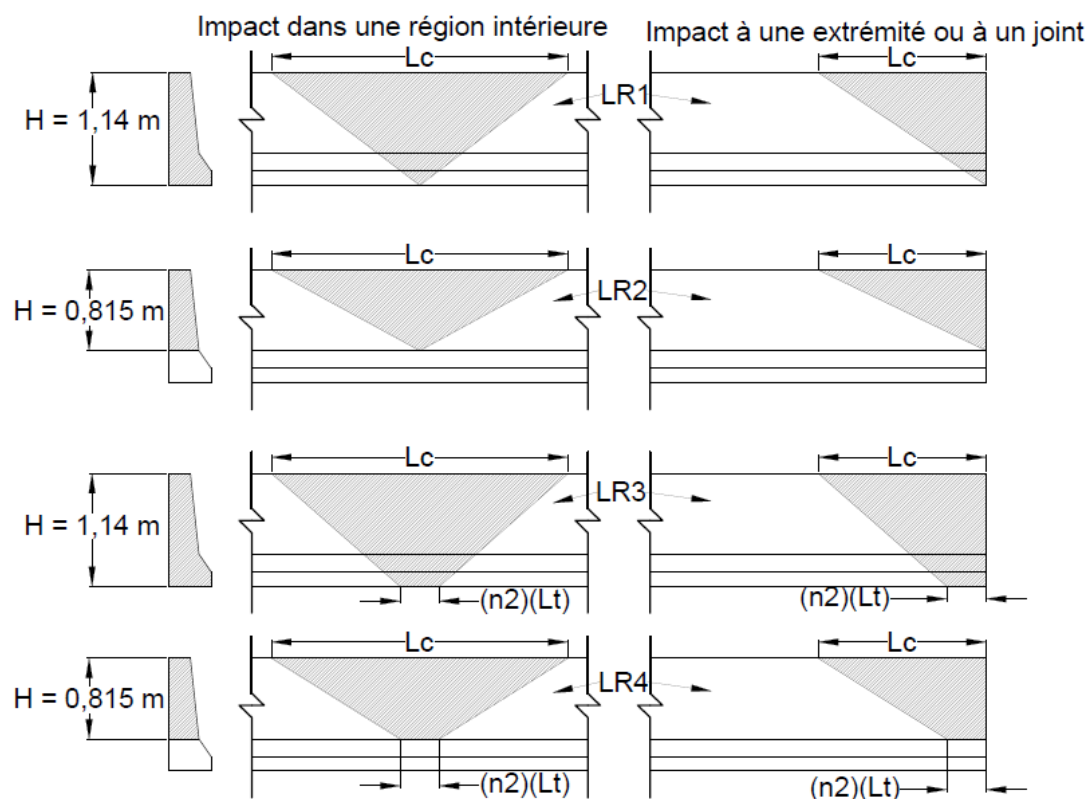


Figure 2.6 - Lignes de rupture considérées lors de l'analyse du parapet de référence

Le Tableau 2.2 regroupe les paramètres nécessaires à l'analyse théorique de la capacité maximale du parapet MTQ301. Ces paramètres ont ensuite été implémentés dans les équations 2.1 à 2.8 pour deux configurations de chargement, soit un chargement réparti sur 700 mm de longueur (condition avec la plaque utilisée dans les essais expérimentaux passés) et un chargement réparti sur 2400 mm (exigences de la norme CSA-S6 pour un parapet TL5). Les valeurs de L_c (longueur critique de développement du plan de rupture) et R_w (capacité flexionnelle) sont présentées au Tableau 2.3 et au Tableau 2.4, respectivement pour les cas de chargement sur une longueur de 700 et 2400 mm.

Tableau 2.2 - Paramètres utilisés pour évaluer la capacité maximale du parapet MTQ301

Paramètre	LR1	LR2	LR3	LR4
Équations	AASHTO	AASHTO	Fadaee et al	Fadaee et al
H	1,14 m	0,815 m	1,14 m	0,815 m
M_b	0 kN-m	0 kN-m	0 kN-m	0 kN-m
M_c	105 kN-m/m	79 kN-m/m	105 kN-m/m	79 kN-m/m
$M_{c\ base}$	-	-	188 kN-m/m	151 kN-m/m
M_w	153 kN-m	76 kN-m	153 kN-m	76 kN-m

Tableau 2.3 - Capacité du parapet MTQ301 déterminée par la méthode des lignes de rupture,
pour $L_t = 700$ mm

Méthode	Chargement intérieur		Chargement à l'extrémité	
	L_c [m]	R_w [kN]	L_c [m]	R_w [kN]
YL1* AASHTO	4.012	739	1.686	310
YL3* Fadaee et al	4.016	738	1.690	309
YL2# AASHTO	2.882	559	1.303	253
YL4# Fadaee et al	2.883	559	1.304	252

* : Ligne de rupture sur la hauteur complète du parapet

: Ligne de rupture au-dessus du point de changement de pente du parapet

Tableau 2.4 - Capacité du parapet MTQ301 déterminée par la méthode des lignes de rupture,
pour $L_t = 2400$ mm

Méthode	Chargement intérieur		Chargement à l'extrémité	
	L_c [m]	R_w [kN]	L_c [m]	R_w [kN]
YL1* AASHTO	5.038	928	2.961	545
YL3* Fadaee et al	5.023	923	2.973	533
YL2# AASHTO	3.980	772	2.961	522
YL4# Fadaee et al	3.983	770	2.695	517

* : Ligne de rupture sur la hauteur complète du parapet

: Ligne de rupture au-dessus du point de changement de pente du parapet

Le Tableau 2.3 et le Tableau 2.4 permettent tout d'abord d'observer que les équations de l'AASHTO et les équations proposées par Fadaee et al donnent, pour une même configuration de chargement et de plan de rupture considérés, des résultats très similaires pour le parapet MTQ301 étudié. Deuxièmement, le fait de considérer les plans de rupture seulement sur la partie supérieure de la glissière plutôt que sur sa pleine hauteur induit des résistances moindres du parapet. Aussi, le fait de charger le parapet sur une longueur de 700 mm versus 2400 mm réduit également la capacité maximale du parapet. Pour les lignes de ruptures étudiées et pour le parapet MTQ301 ici considéré, cette baisse de capacité se situe entre 20 et 30 % pour un chargement intérieur et entre 40 et 50 % pour un chargement à l'extrémité du parapet.

Ces résultats mènent à trois constats principaux pour ce projet de recherche. Ils indiquent tout d'abord que l'application du chargement sur une longueur de 700 mm, soit une longueur inférieure à celle prescrite par la norme, résulte en des capacités maximales conservatrices du parapet par rapport à si celui-ci avait été chargé sur 2400 mm de longueur tel que prescrit dans la norme CSA-S6 Ceci signifie que la réalisation d'essais sur parapets de 2 m avec une plaque de chargement de 700 mm de longueur représente une condition très conservatrice. Ensuite, une diminution de capacité, comprise entre 30 et 60 % selon la configuration considérée, est observée pour un chargement à l'extrémité du parapet par rapport à un chargement en zone intérieure. Il importe donc de bien évaluer la résistance de tout nouveau concept de parapet sous charge excentrée. L'effet des chargements excentrés sera présenté plus en détail à la Section 2.3.

Enfin, la longueur critique (L_c) sur laquelle se produit la rupture du parapet se situe entre 3 et 5 m pour un chargement intérieur et entre 1 et 3 m pour un chargement à l'extrémité. Pour un parapet préfabriqué, cette longueur peut être interprétée comme étant la longueur minimale que doit avoir l'élément préfabriqué afin de développer sa pleine capacité et donc pour obtenir un comportement semblable au même parapet continu. L'effet de la longueur des éléments préfabriqués sur leur résistance sera discuté plus en détail à la Sections 2.4.

À l'exception des chargements excentrés appliqués sur 700 mm de longueur, tous les cas de chargement appliqués sur le parapet MTQ301 dépassent la charge transversale pondérée de 476 kN exigée par la norme CSA-S6 (cf. Tableau 2.3 et Tableau 2.4).

2.3 Excentricité de la charge

L'objectif de cette section est d'étudier l'impact d'une charge appliquée à l'extrémité d'un parapet sur sa capacité structurale. Avec l'utilisation d'éléments préfabriqués, le nombre de régions d'extrémité est grandement augmenté par rapport à un parapet continu coulé en place. C'est pourquoi l'étude de l'effet d'un tel type de chargement est essentielle lors du développement de parapets préfabriqués.

Les chargements excentrés sont les plus critiques pour les parapets en béton armé. La capacité plus faible du parapet sous ce type de chargement s'explique par le plan de rupture qui se développe seulement d'un côté du point de chargement (Figure 2.7a), comparativement à un plan de rupture symétrique pour un chargement en zone intérieure (Figure 2.7b) qui implique donc une plus grande zone du parapet pour la reprise des efforts.



(a) Chargement à l'extrémité



(b) Chargement intérieur

Figure 2.7 - Plans de rupture d'un parapet en béton armé selon le type de chargement (Alberson et al., 2004)

Afin d'améliorer le comportement des parapets en béton armé sous chargement excentré, il est d'usage d'augmenter le nombre de barres à leurs extrémités. Au Québec, le manuel de conception des structures recommande de doubler les armatures sur 1 m de longueur à partir d'un joint ou

d'une extrémité pour tous les détails de parapets en béton armé (MTQ, 2017). Pour les parapets préfabriqués, cette recommandation peut s'avérer pénalisante. Par exemple, en doublant les armatures sur 1 m à chaque extrémité d'éléments de 4 m de longueur, cela revient à doubler l'armature sur 50 % du parapet. Lorsque nécessaire pour assurer une capacité mécanique adéquate, l'utilisation de connexions longitudinales entre les éléments peut permettre de renforcer le comportement aux extrémités sans augmenter la quantité d'armature.

Les calculs théoriques effectués à la Section 2.2 sur le parapet MTQ301 à l'aide des méthodes avec lignes de rupture ont montré que la capacité maximale pour ce parapet est de 30 à 60 % moindre à l'extrémité qu'en zone intérieure. Plusieurs études se sont également intéressées à la diminution de résistance entre un chargement excentré et centré, sur différents types de parapets. Le Tableau 2.5 présente un sommaire des résultats de quelques études ayant fait des essais de chargement statique au centre et à l'extrémité de parapets en béton armé.

Tableau 2.5 - Pertes de capacité pour un chargement à l'extrémité versus un chargement centré

Étude	Objectif de l'étude	$F_{\max}$ chargement intérieur	$F_{\max}$ chargement à l'extrémité	Perte de capacité (extrémité vs intérieur)	Longueur du spécimen d'essai
Alberson et al. (2004)	Vérifier si les parapets new jersey coulés en place utilisés en Floride répondent aux normes actuelles	325 kN	156 kN	- 52 %	7.3 m (24 pi)
Ngan (2008)	Valider les parapets préfabriqués utilisés en Colombie-Britannique	493 kN	272 kN	- 45 %	5.8 m
Patel (2008)	Tester un nouveau modèle de parapet préfabriqué	174 kN	132,5 kN	- 23 %	3.0 m
Khederzadeh et Sennah (2014)	Tester une nouvelle conception de parapets coulés en place avec des barres d'armatures polymère renforcé aux fibres de ver	655 kN	541 kN*	- 17 %	6.0 m

* La zone d'extrémité comportait le double de l'armature de la zone centrale sur une longueur de 1 m

Le Tableau 2.5 permet de mettre en relief deux éléments, soient la baisse de capacité pour un chargement à l'extrémité par rapport à un chargement intérieur et l'effet de la longueur des parapets sur cette diminution de capacité. Pour les essais effectués sur des spécimens de plus de 4 m dont la longueur devrait être suffisante pour développer la pleine capacité du parapet dans le cas d'un chargement centré (cf. Section 2.2), la perte de résistance devrait être assez constante peu importe la longueur du parapet. Une perte de capacité d'environ 50 %, du même ordre de grandeur que celle obtenue sur le parapet MTQ301 par la méthode d'évaluation avec lignes de rupture, est observée.

L'étude de Khederzadeh et Sennah (2014) peut sembler contredire cette conclusion avec seulement 17 % de perte de capacité pour un parapet de 6 m. Cependant, l'armature avait été doublée à l'extrémité, ce qui explique la plus petite perte de capacité observée.

Patel (2008), qui a étudié un parapet plus court d'environ 3 m, observe une perte de capacité moindre de 23 %. Cette diminution plus faible de capacité entre un chargement excentré et centré s'explique par le fait que la capacité mesurée pour un chargement intérieur est affectée par un effet de longueur. Ainsi, la perte de résistance est moindre que si la longueur du parapet avait été suffisante pour développer la pleine capacité (similaire au parapet continu) du parapet. Comme la capacité pour un chargement intérieur n'a pas atteint son maximum, la perte de capacité pour un chargement à l'extrémité qui est moins affectée par l'effet de longueur, est logiquement moins importante en proportion que pour les parapets plus longs.

2.4 Continuité longitudinale des parapets préfabriqués

Une différence importante entre les parapets préfabriqués et les parapets coulés en place est la présence de discontinuités longitudinales entre les éléments préfabriqués placés côtes-à-côtes. L'étude de la continuité longitudinale des parapets préfabriqués est donc essentielle au développement de ces parapets. La Section 2.4.1 présente quelques considérations générales concernant la continuité longitudinale des parapets préfabriqués. Une présentation détaillée des types de connexions entre les éléments de parapets préfabriqués en béton sera ensuite faite à la Section 2.4.2.

2.4.1 Considérations générales

Tout type de glissières doit offrir un profil continu de redirection des véhicules en cas d'impact. Pour un parapet continu, l'étude de la continuité consiste à s'assurer que l'interaction entre les véhicules hors de contrôle et la glissière demeure acceptable aux joints, aux extrémités de glissières ainsi qu'aux transitions.

Pour les parapets préfabriqués, l'étude de la continuité longitudinale est d'autant plus importante qu'il s'agit d'un système d'éléments discontinus placés côtes-à-côtes. En plus d'un impact possible de la jonction entre deux parapets adjacents sur l'interaction entre le parapet et les véhicules, la discontinuité des parapets peut également avoir un impact sur la capacité mécanique du parapet. En effet, tel que présenté à la Section 2.2.2, il existe une longueur critique d'élément de parapet en-dessous de laquelle la capacité structurale d'un parapet préfabriqué sera moindre que celle de du même parapet continu. Ce résultat s'explique par le fait que la longueur de l'élément préfabriqué est dans ce cas trop faible pour que le plan de rupture complet ne se développe entièrement dans cet élément (cf. Section 2.2.2).

Pour une performance optimale, des éléments préfabriqués plus longs sont souhaitables afin de limiter cet effet de longueur sur la résistance mécanique et de diminuer le nombre de discontinuités. En contrepartie, l'utilisation d'éléments plus longs présente des inconvénients pour la mise en place, le suivi d'éventuelles sections courbes, le transport et la manipulation des éléments, l'espace requis dans les usines de préfabrication pour la coulée des éléments, etc. En pratique, des parapets préfabriqués de 4 m de longueur sont généralement utilisés pour un bon compromis entre la performance mécanique et les considérations pratiques.

Des connexions longitudinales sont souvent incorporées entre les parapets préfabriqués. Ces connexions permettent entre autres d'assurer que le profil de redirection reste continu en empêchant des déplacements relatifs trop importants entre les éléments, de compenser les effets de longueur sur la résistance mécanique et d'améliorer le comportement sous un chargement excentré en transférant les efforts d'un élément à l'autre.

De nombreux détails de connexions longitudinales entre des éléments de parapets en béton sont disponibles dans la littérature, pour différents contextes d'application. La Section 2.4.2 présente les principaux types de connexion retrouvés dans la littérature et met en avant les contextes d'utilisation auxquels ils se prêtent le mieux.

2.4.2 Types de connexion pour la continuité

Les connexions longitudinales sont ici regroupées en trois catégories: les connexions par effet de butée, les connexions boulonnées et les connexions coulées en place. Celles-ci sont respectivement présentées aux sous Sections 2.4.2.1 à 2.4.2.3.

De façon générale, plus la connexion est performante et plus elle exige de la précision de fabrication et d'installation en chantier des parapets préfabriqués. À l'inverse, les connexions géométriquement simples ont une performance parfois limitée. Lors du choix du type de connexion, il est important de connaître le niveau de performance souhaité et le jeu disponible pour l'installation. Il faut effectivement considérer que, pour les parapets permanents, en plus de connecter les parapets entre eux, ceux-ci doivent être ancrés à une dalle. Dans ce cas, la précision requise pour la connexion du parapet à la dalle s'ajoute à celle requise pour la connexion longitudinale des parapets adjacents, ce qui peut rapidement devenir problématique lors de l'installation au chantier.

2.4.2.1 Connexions par effet de butée

Les connexions par effet de butée sont les connexions entre éléments de glissière préfabriqués les plus courantes. La connexion se fait par emboîtement d'une partie mâle dans une partie femelle qui crée une clé de cisaillement. De cette façon, dès qu'un élément préfabriqué se déplace à la suite d'un impact, celui-ci vient s'appuyer sur les éléments adjacents qui contribuent à la reprise des efforts et empêchent des déplacements relatifs trop importants entre éléments.

Il existe un grand nombre de détails possible pour ce type de connexion dont la plupart sont composées de pièces métalliques. Quelques détails communs de connexions par effet de butée à l'aide de pièces métalliques sont présentés à la Figure 2.8 Un point négatif des connexions métalliques est que les pièces qui composent la connexion doivent absolument être protégées contre la corrosion afin d'assurer leur bon fonctionnement en tout temps. Il existe aussi des connexions du même type en béton armé qui sont moins sensibles aux conditions d'exposition extérieure qu'une connexion métallique.

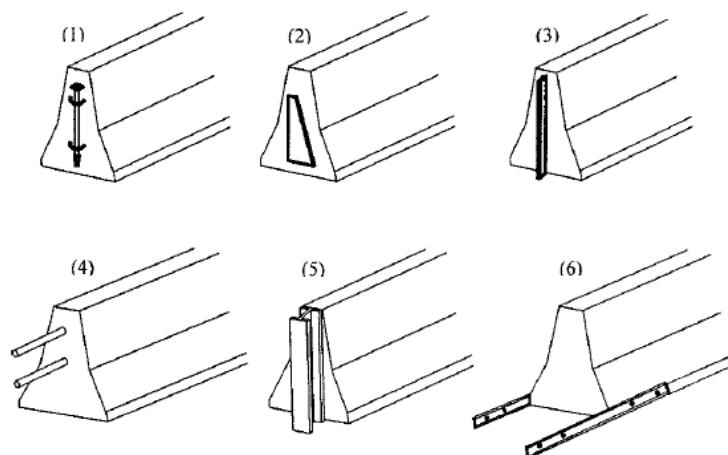


Figure 2.8 - Connexions longitudinales métalliques courantes (1) tige et anneaux; (2) rainure et languette; (3) plaque d'insertion; (4) gougeons doubles; (5) poutre en I; et (6) chenal de raccordement (Atahan, 2006)

Les connexions présentées à la Figure 2.8 ont toutes en commun leur facilité d'installation étant donné le jeu dans la connexion. L'utilisation de ce type de connexion ne pose donc généralement pas trop de problème pour des segments courbes. Évidemment, certains détails se prêtent mieux que d'autres à cet usage comme par exemple la connexion présentée à l'illustration 1 de la Figure 2.8.

Les connexions longitudinales par butée sont couramment utilisées pour des glissières portables aussi appelées glissières de chantier ou glissières temporaires. Ce type de glissière n'est pas ancrée au sol et peut donc subir de plus grands déplacements horizontaux lors d'un impact, d'où la nécessité d'une connexion longitudinale. De plus, ce type de glissières étant fréquemment transporté d'un site à un autre, il est important de pouvoir les installer et désinstaller efficacement, d'où l'intérêt des connexions par effet de butée qui permettent une plus grande flexibilité d'installation.

Pour des parapets permanents ancrés à une dalle, c'est-à-dire avec un déplacement nul à leur base, le déplacement de la partie supérieure du parapet est généralement bien moindre. Il est donc important de s'assurer que le déplacement de la partie supérieure soit plus grand que le jeu dans la connexion pour assurer que la butée puisse se produire si ce type de connexion est désiré. Au vu

de cette considération, ce type de connexion a une performance mécanique moindre dans ce contexte d'utilisation.

2.4.2.2 Connexions boulonnées

Comme l'indique le nom, il s'agit de connecter deux parapets consécutifs par une série de boulons insérés dans des trous perforés prévus à cet effet dans le parapet. Pour comprendre ce qui a amené aux connexions boulonnées, il est intéressant de se référer à une problématique rencontrée par le département des transports de l'état du Texas (TxDOT) (Bligh et al., 2003). Suite à l'évaluation selon les critères du rapport 350 de la NCHRP d'un type de glissière portable utilisée dans leur juridiction et utilisant une connexion par effet de butée semblable à celle représenté à l'illustration 4 de la Figure 2.8, le TxDOT a constaté que la performance exigée par la norme était atteinte, mais que le déplacement maximal de 2.7 m de la glissière était problématique pour l'utilisation de cette glissière en zone de travaux à espace restreint.

Suite à cette étude, Bligh et al. (2003) ont cherché à développer un type de connexion pour les glissières portables en béton armé qui puisse limiter le déplacement total de la glissière lors d'un impact pour utilisation dans des zones de travaux à espace restreint. Leur objectif étant de produire une glissière portable qui aurait un déplacement total d'au plus 0.9 m. Pour ce faire, ils ont procédé à la modélisation par éléments finis d'une séquence d'impact basée sur les conditions normées des essais d'impacts afin d'évaluer la performance de quelques types de connexions prometteurs. La connexion retenue, illustrée à la Figure 2.9, consiste à connecter les éléments de parapets par deux boulons placés en «X». Par la suite, des essais d'impact à pleine échelle ont été réalisés sur des glissières de performance TL-3. Les résultats ont montré un déplacement total de la glissière de 0.483 m comparativement aux 2.7 m de la glissière initiale avec connexion par effet de butée.



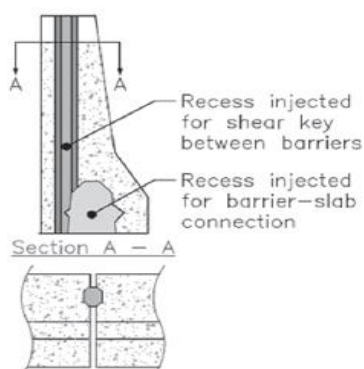
Figure 2.9 - Connexion boulonnée croisée (Bligh et al., 2003)

Cet exemple illustre l'intérêt d'utiliser une telle connexion pour limiter le déplacement horizontal des glissières. En plus de cet avantage, ce type de connexion permet, par rapport à la connexion par effet de butée, d'améliorer le transfert d'efforts entre les éléments puisque le système de connexion entre directement en action dès qu'il y a un déplacement de l'un des éléments. En contrepartie, il s'agit d'un système plus complexe à mettre en place puisque les éléments doivent être bien alignés. Considérant que plusieurs éléments doivent être connectés l'un à la suite de l'autre, une erreur d'alignement ou une erreur de fabrication peut s'avérer problématique. En ce sens, l'utilisation de cette connexion pour un segment courbe de glissières semble délicate. Aussi, une attention particulière doit être portée pour éviter d'éventuelles infiltrations d'eau à l'intérieur du parapet par les trous des boulons. Finalement, le temps d'installation requis pour ce type de connexion est plus important que pour une connexion par butée qui ne nécessite généralement pas d'intervention manuelle sur la connexion.

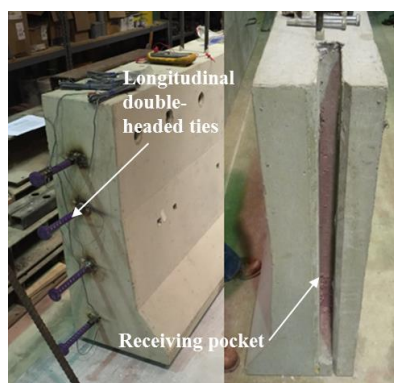
Malgré la bonne performance mécanique de ce type de connexion, la précision requise pour la mise en place le rend difficilement applicable aux parapets de ponts préfabriqués étudiés dans ce projet. Cependant, il demeure une alternative à garder en mémoire dans le cas où une performance mécanique supérieure serait nécessaire.

2.4.2.3 Connexions coulées en place

Les clés de connexion coulées en place sont un type de connexion très peu (voir pas du tout) retrouvé sur des structures existantes. Cependant, avec l'intérêt grandissant pour des parapets préfabriqués, il s'agit d'un type de connexion prometteur. Ce type de connexion consiste en une cavité pré-moulée sur chaque face latérale des parapets préfabriqués. Une fois les éléments ancrés à la dalle de pont, la cavité est remplie avec un béton ou un mortier afin de créer une clé de cisaillement entre les éléments. La Figure 2.10a présente un détail possible pour ce type de connexion et la Figure 2.10b illustre qu'il peut être possible d'ajouter des barres d'armature à la connexion, afin d'améliorer la performance mécanique et le déplacement relatif entre les parapets et d'obtenir un comportement plus proche de celui d'un parapet continu.



(a) Namy et al. (2015a)



(b) Wipf et al. (2018)

Figure 2.10 - Connexions coulées en place (a) clé de cisaillement (b) ajout de barres dans la connexion

L'option illustrée à la Figure 2.10a se prête bien à des segments courbes de glissières et ne requiert pas de précision supplémentaire au chantier étant donné que la connexion est coulée une fois les éléments ancrés au pont. Tandis que l'option avec des barres (Figure 2.10b) demande beaucoup plus de précision à l'installation étant donné que les barres doivent être insérées correctement dans le parapet voisin avant de couler la connexion. L'utilisation de ce concept dans un segment courbe

est donc plus complexe, voire impraticable. De plus, ce détail de connexion requiert un plus grand volume de matériau cimentaire coulé en chantier.

Comme la clé de cisaillement est coulée en place, il n'y a aucun jeu dans la connexion, contrairement aux connexions par effet de butée. D'un autre côté, la séquence d'installation est légèrement plus longue que pour les autres types de connexions étant donné qu'une coulée supplémentaire au chantier est requise.

Ce type de connexion ne serait pas adéquat pour des glissières portables temporaires, puisqu'une fois la connexion coulée il est impossible de séparer les éléments sans les endommager.

La performance des connexions par butée ou boulonnées est généralement évaluée via des essais d'impacts visant des critères spécifiques (d'interaction glissière véhicule, de déplacement, de flèche ou autre selon les besoins des projets). Des études plus approfondies ont été réalisées sur les connexions longitudinales coulées en place afin d'évaluer plus en détail la performance mécanique de ces dernières.

Namy et al. (2015a) ont en effet étudié l'effet de la continuité de parapets préfabriqués présentés à la Figure 2.11. Trois configurations de parapets PL-2 (équivalent TL-4) ont été testées en laboratoire et modélisées à l'aide de modèles par éléments finis non-linéaires. Les configurations ont été testées sous chargement statique centré sur la longueur totale du ou des parapets, soit :

- C1 : un parapet continu coulé en place de 6 m de longueur.
- C2 : trois parapets préfabriqués à niche fermée de 2 m de longueur côtes-à-côtes non connectés.
- C3 : trois parapets préfabriqués à niche fermée de 2 m de longueur connectés à l'aide d'une connexion (illustrée à la Figure 2.11) coulée en place à l'aide d'un mortier fibré.

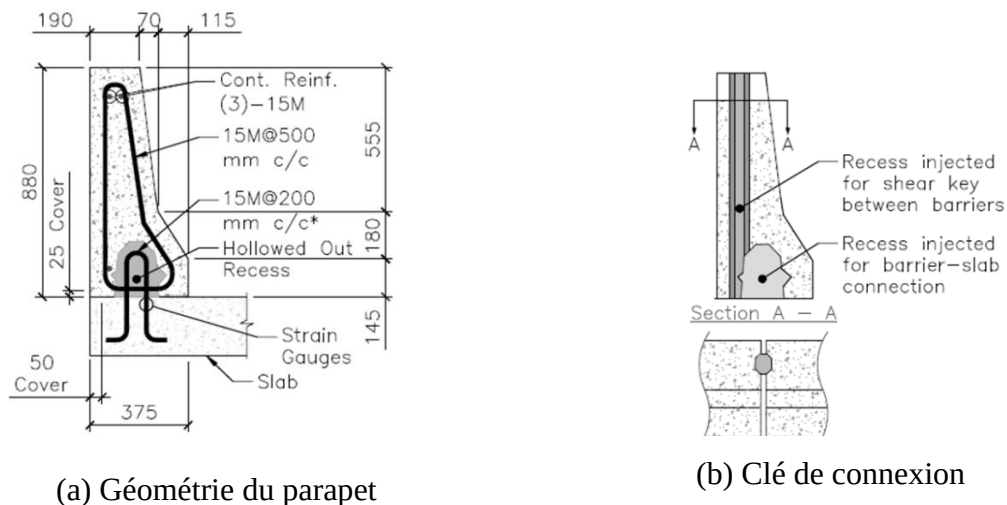


Figure 2.11 - Parapet préfabriqué étudié par Namy et al. (2015a)

Les courbes de comportement global force-déplacement latéral au centre des 6 m de parapets obtenues des modèles numériques ainsi que des essais expérimentaux sont présentés à la Figure 2.12.

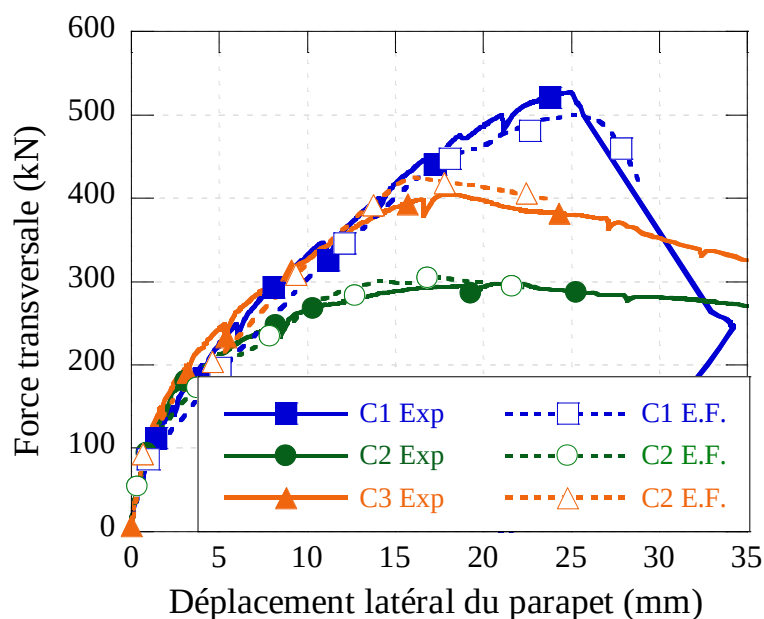


Figure 2.12 - Comparaison des résultats numériques (E.F.) et expérimentaux (Exp) pour chacune des configurations étudiées par Namy et al. (2015b)

La Figure 2.12 permet d'observer que la plus grande capacité mécanique, soit de 527 kN, est atteinte par le parapet continu (configuration C1), tel qu'attendu. La plus faible capacité, 44 % plus faible (296 kN) que le parapet continu, est quant à elle obtenue pour la configuration sans connexion entre les parapets (configuration C2). La clé de connexion (configuration C3) a permis d'atteindre une capacité intermédiaire de 404 kN, soit 36 % de plus que les parapets non connectés, mais 24 % de moins que le parapet continu.

Il est aussi possible d'observer que les résultats numériques reproduisent bien les résultats expérimentaux, ce qui a permis de valider le modèle numérique. Ce dernier a donc pu être utilisé pour ensuite modéliser les trois mêmes configurations (C1, C2 et C3), mais cette fois avec des parapets préfabriqués de 4 m de longueur. Ces résultats, présentés à la Figure 2.13, montrent que les trois configurations donnent des comportements globaux très similaires. Ceci signifie que, pour le parapet étudié et avec l'utilisation d'éléments de 4 m de longueur chargés au centre, la clé de connexion n'a pas d'impact significatif sur la reprise des efforts. Ceci peut s'expliquer par le fait que les parapets de 4 m sont assez longs pour développer leur pleine capacité sur un seul élément sans avoir besoin de la contribution mécanique de la clé de connexion et des parapets adjacents. Évidemment, cette conclusion n'est valable que pour un chargement intérieur (centré) pour des éléments assez longs n'étant pas affectés par l'effet de longueur discuté à la Section 2.2.

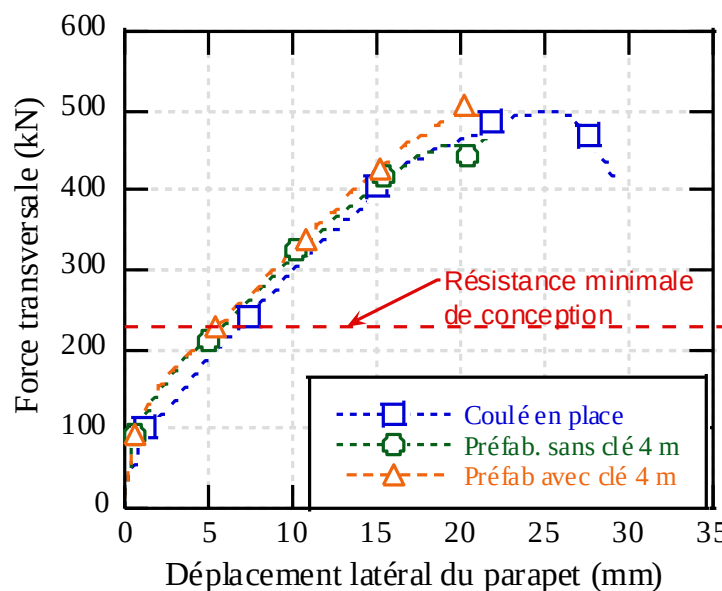


Figure 2.13 - Résultats numériques sur des parapets de 4 m connectés ou non (Namy et al., 2015a)

2.5 Bétons renforcés de fibres

Outre les aspects structuraux relatifs au positionnement de la charge sur le parapet et de la continuité longitudinale, ce projet s'intéresse aussi à l'utilisation de bétons fibrés ultra performants (BFUP) afin d'améliorer les performances mécaniques et la durabilité des parapets de pont.

Afin de bien comprendre quel sont les bénéfices de l'utilisation du BFUP, cette section présente de façon sommaire les principales caractéristiques des BFUP en mettant de l'avant les différences fondamentales qui existent entre les BFUP et les autres gammes de bétons disponibles. Il est question de la composition, des propriétés mécaniques et de la durabilité des BFUP.

2.5.1 Composition

Le Tableau 2.6 présente la classification de différents types de bétons selon Charron et Desmettre (2013). On y retrouve les bétons ordinaires (BO), les bétons à hautes performances (BHP), les bétons fibrés à hautes performances (BFHP) et les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP).

Tableau 2.6 - Composition et propriétés de différentes gammes de bétons (Charron & Desmettre, 2013)

Composition	BO	BHP	BFHP	BFUP
Rapport eau/liant	≥ 0.4	0.30 à 0.40	0.30 à 0.40	0.15 à 0.25
Liants	300-400 kg/m ³	350-450 kg/m ³	350-550 kg/m ³	800-1000 kg/m ³
Ajouts minéraux	Parfois	Oui	Oui	Oui
Sable	Oui	Oui	Oui	Oui
Pierre	Oui	Oui	Oui	Non
Fibres	Non	Non	40 à 120 kg/m ³ (0.5 à 1.5 %-vol.)	160 à 480 kg/m ³ (0.5 à 1.5 %-vol.)
Propriétés	BO	BHP	BFHP	BFUP
Compression – f'_c	20 à 40 MPa	50 à 90 MPa	50 à 90 MPa	120 à 180 MPa
Traction – f'_t	1.5 à 2.5 MPa	3.0 à 4.5 MPa	3.0 à 4.5 MPa	7 à 15 MPa
Module - E_c	20 à 25 GPa	25 à 35 GPa	25 à 35 GPa	30 à 45 GPa

Les bétons ordinaires (BO) représentent la gamme de bétons de base. Ceux-ci ont un rapport eau/liant supérieur à 0.40 et une composition traditionnelle. Ce type de béton à une résistance à la

compression à 28 jours entre 20 et 40 MPa et une matrice de densité moyenne (Charron & Desmettre, 2013).

Les bétons à hautes performances (BHP) se distinguent des bétons ordinaires par un rapport eau/liant plus faible soit entre 0.30 et 0.40 et l'utilisation systématique d'ajouts minéraux. Ces modifications permettent d'obtenir des résistances plus élevées et une matrice de densité élevée. La résistance à la compression à 28 jours de cette gamme de béton se situe entre 50 et 90 MPa (Charron & Desmettre, 2013).

Ensuite, les bétons fibrés à hautes performances (BFHP) sont obtenus en incorporant un volume de fibres longues entre 0.5 % et 1.5 % à une composition typique de BHP. Étant donné la faible différence entre ces deux types de béton, les résistances des BFHP sont égales à celles de BHP (Charron & Desmettre, 2013). L'ajout des fibres permet d'obtenir un comportement post-pic adoucissant en traction. L'effet des fibres sur le comportement en traction sera présenté plus en détail à la Section 2.5.2.

Finalement, la composition des bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP) diffère des autres types de bétons. En effet, sa composition granulaire est beaucoup plus fine et ne contient pas de pierre, mais une grande quantité d'ajouts minéraux et entre 2% et 6% du volume en fibres courtes. La matrice est très dense et la résistance à la compression à 28 jours de ce type de béton varie entre 120 et 180 MPa (Charron & Desmettre, 2013). Les fibres ont un impact significatif sur le comportement en traction écouissant permettant d'atteindre des résistances jusqu'à 15 MPa avec un comportement post-pic adoucissant.

2.5.2 Propriétés mécaniques

Le principal effet de l'ajout de fibres sur les propriétés mécaniques est l'amélioration du comportement en traction. La résistance à la traction des bétons non fibrés (BO et BHP) est systématiquement négligée dans la conception puisque l'apport de sa résistance structurale est minime. D'un autre côté, les bétons fibrés (BFHP et BFUP) ont un comportement ductile en traction et une résistance plus élevée dans le cas des BFUP. La Figure 2.14 présente le comportement en traction de BFUP et de BFHP. Rossi (1998) explique l'action des fibres sur le comportement en traction par deux scénarios possibles :

- Les fibres des BFHP agissent exclusivement sur les macrofissures c'est-à-dire après l'atteinte du maximum de résistance. Les fibres permettent de « coudre » les macrofissures, ce qui ralentit la propagation de ces fissures et assure un comportement post-pic adoucissant (ductile). Ce comportement adoucissant correspond à la phase 3 illustrée à la Figure 2.14. Pour cet usage, il est préférable d'utiliser des fibres plus longues afin de s'assurer qu'elles soient bien ancrées dans la matrice. Cependant, il faut se limiter à un pourcentage faible de fibres longues afin d'assurer une maniabilité suffisante pour la mise en place. Pour cette gamme de bétons, le Tableau 2.6 indique une résistance à la traction de 3.0 à 4.5 MPa.
- Les fibres des BFUP permettent de « ponter » les microfissures dès leur formation ce qui retarde la localisation des fissures. En retardant l'apparition de macrofissures et en contrôlant la fissuration, les fibres permettent d'obtenir un comportement pré-pic écrouissant (plus grande résistance) tout en assurant un comportement post-pic adoucissant (ductile). Les comportements écrouissant et adoucissant correspondent respectivement aux phases 2 et 3 illustrées à la Figure 2.14. Pour cet usage, il est préférable d'avoir un fort pourcentage de fibres courtes afin d'assurer qu'il y ait des fibres pour bloquer la propagation de chacune des microfissures qui se développent. Logiquement, les pourcentages de fibres élevés permettent d'atteindre des résistances maximales en traction entre 7 et 15 MPa tel qu'indiqué au Tableau 2.6.

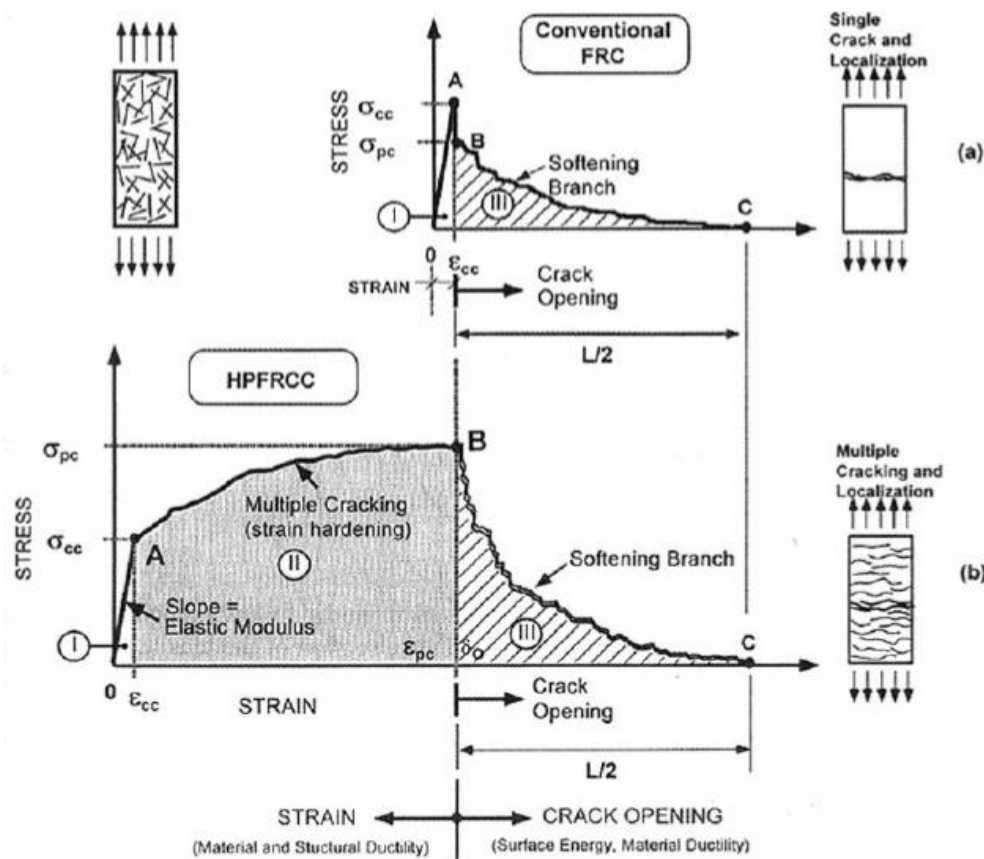


Figure 2.14 - Comportement en traction de BFUP et de BFHP (Naaman & Reinhardt, 2003)

Il n'y a pas que le pourcentage de fibres dans le mélange qui influence les propriétés mécaniques des bétons fibrés. L'orientation des fibres est un facteur qui influence grandement les propriétés des bétons fibrés. Pour une action idéale des fibres, il est souhaitable que toutes les fibres soient parfaitement parallèles à l'effort de traction (perpendiculaires aux fissures). En pratique, plusieurs facteurs comme la méthode de mise en place, la géométrie des coffrages et l'écoulement du béton influencent l'orientation des fibres (Alberti et al., 2018).

Plagué et al. (2017) ont cherchés à quantifier l'effet de l'orientation des fibres sur les performances mécaniques et sur la durabilité de bétons fibrés par des essais de traction directe sur os et des essais de perméabilité. La Figure 2.15 présente les résultats d'essais de traction sur des BFHP pour quatre conditions de fibres et d'orientation soit : des fibres d'acier et une orientation favorable (HPFRC-ST-F), des fibres d'acier et une orientation intermédiaire (HPFRC-ST-A), des fibres

d'acier et une orientation défavorable (HPFRC-ST-U) et des synthétiques d'acier et une orientation favorable (HPFRC-SY-F).

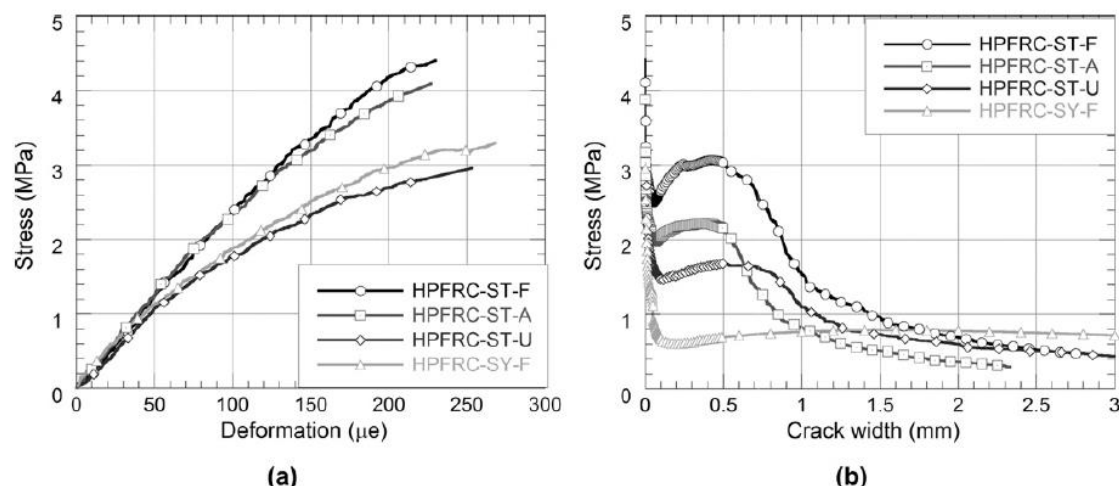


Figure 2.15 - Courbes de comportement en traction de BFHP selon l'orientation des fibres (a) comportement pré-pic (contrainte-déformation) et (b) comportement post-pic (contrainte-ouverture de fissure) (Plagué et al., 2017)

Les résultats présentés à la Figure 2.15 montrent une diminution de la résistance maximale de 33 % entre les conditions favorables et défavorables. Aussi, les résultats des essais de perméabilité montrent une augmentation importante de la perméabilité en condition fissurée pour une orientation défavorable des fibres. L'augmentation de la perméabilité du BFHP provient essentiellement d'un moins bon contrôle de la fissuration et laisse présager une moins bonne durabilité, la perméabilité du BFHP demeure néanmoins toujours inférieure à celle du BHP. La durabilité des bétons fibrés sera présentée à la Section 2.5.3.

Pour sa Delsol (2012) a étudié l'effet de l'orientation des fibres sur le comportement en traction des BFUP. Il a réalisé des essais de traction directe sur des os en BFUP avec différentes orientations de fibres. Les résultats de ces essais sont présentés à la Figure 2.16, elle présente le comportement pré-pic et post pic d'os en BFUP selon des orientations des fibres variant de 0 degré à 90 degrés. Une orientation des fibres de 0 degré correspond au cas où les fibres sont parfaitement

perpendiculaires aux fissures (orientation parfaite) tandis que le cas à 90 degrés correspond au cas où les fibres sont parallèles aux fissures (orientation très défavorable).

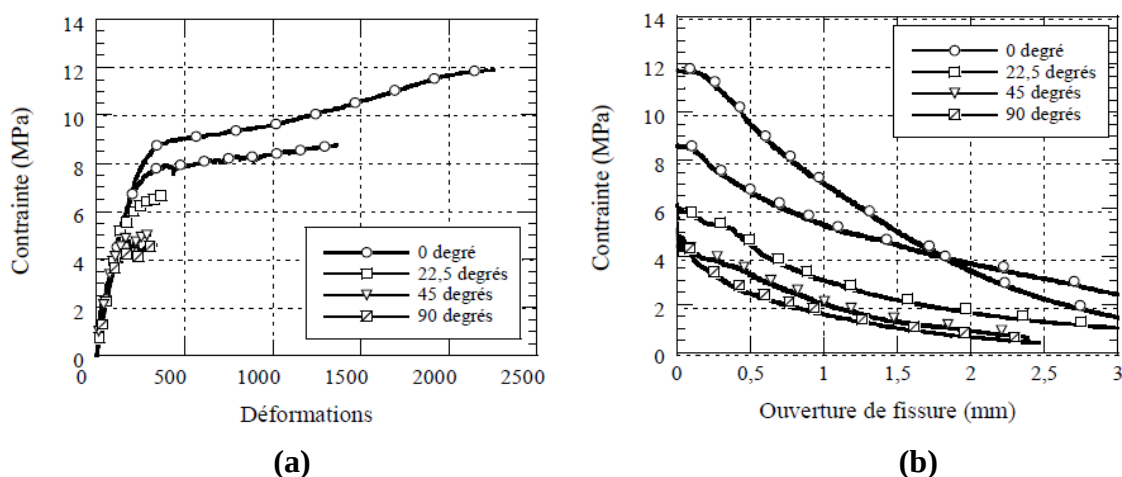


Figure 2.16 - Courbes de comportement en traction de BFUP selon l'orientation des fibres (a) comportement pré-pic (contrainte-déformation) et (b) comportement post-pic (contrainte-ouverture de fissure)

Les résultats présentés à la Figure 2.16 montrent clairement l'importance de l'orientation de fibres dans le BFUP pour la contrainte maximale et pour la déformation au pic. Par exemple, entre une orientation de 0 degré (orientation parfaite) et une orientation de 22.5 degrés (orientation intermédiaire) la contrainte maximale est diminuée de 27 % de la contrainte maximale et la déformation au pic 43 % moins élevée.

2.5.3 Durabilité

La durabilité est un élément essentiel à considérer lors du choix de béton à utiliser. Dans le contexte des parapets de pont développés dans ce projet, ceux-ci sont soumis à des sollicitations environnementales sévères, le béton choisi doit donc naturellement avoir une excellente durabilité. Charron et Desmettre (2013) expliquent les mécanismes qui influencent la durabilité des bétons et présente des indices de durabilité pour les gammes de bétons présentés à la Section 2.5.1.

Le Tableau 2.7 présente un sommaire de différents indicateurs de durabilités en condition non-fissurée pour les différentes gammes de bétons. Les indicateurs de durabilité présentés sont la perméabilité à l'air, la perméabilité à l'eau, la diffusion effective, la sorptivité, la vitesse de corrosion et la porosité à l'eau. Ceux-ci ont été tirés à partir d'une vingtaine d'articles de la littérature et sont comparés en prenant le BO comme référence relative. Plus l'indicateur est petit et plus le béton a un potentiel de durabilité élevé. En condition non fissurée, c'est essentiellement la porosité et la densité de la matrice qui influence la perméabilité des bétons non fissurés. En effet, un matériau moins poreux et plus dense aura tendance à ralentir la pénétration des agents agressifs dans la matrice. En ce sens, les BHP et le BFHP, qui ont le même comportement en condition non fissurée et une matrice de forte densité, ont un indicateur de durabilité minimalement trois fois plus petit que les BO. Pour les BFUP, avec une matrice de densité exceptionnelle cet indicateur est minimalement 100 fois plus petit, toujours en comparaison des BO (Charron & Desmettre, 2013).

Tableau 2.7 - Indicateurs de durabilité de différentes gammes de bétons en condition non fissurée
(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
Indicateurs de durabilité relatifs	BO	BHP et BFHP*	BFUP
$K_{\text{air}}/K_{\text{air BO}}$	1	0.018	< 0.0002
$K_{\text{eau}}/K_{\text{eau BO}}$	1	0.018	< 0.0091
$D_{\text{eff}}/D_{\text{eff BO}}$	1	0.100	0.0018
S/S_{BO}	1	0.325	0.015
C/C_0	1	0.208	< 0.0083
Indicateur de durabilité relatif critique	1	≤ 0.325	≤ 0.015

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

Le Tableau 2.8 présente l'ouverture de fissures et la perméabilité à l'eau des différentes gammes de bétons en fonction de la contrainte dans l'armature lors d'essais de tractions directe sur tirants. En condition fissurée c'est l'ouverture des fissures qui a le plus grand impact sur la pénétration des agents agressifs dans le béton. Plus l'ouverture de fissure est grande et plus les agents agressifs peuvent pénétrer facilement dans le béton. En ce sens, la durabilité des bétons fibrés en condition fissurée est la même pour les BO et les BHP. Tel qu'expliqué précédemment, la présence de fibres dans un béton permet de ralentir la progression et donc l'ouverture des fissures. Pour les BFHP les ouvertures de fissures sont environ deux fois plus petites et la perméabilité à l'eau est trois fois plus faible que celle du BO et du BHP pour une même contrainte dans l'armature. Pour les BFUP les ouvertures de fissures sont réduites d'environ un facteur de six et la perméabilité à l'eau est 1000 fois plus faible que pour le BO et le BHP, ce qui laisse présager une durabilité exceptionnelle en comparaison des autres types de bétons.

Tableau 2.8 - Ouverture de fissures et perméabilité à l'eau selon la contrainte dans l'armature lors d'essai sur tirants (Charron & Desmettre, 2013)

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

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

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

2.6 Synthèse

Cette revue de la documentation a mis en évidence les critères de conception requis dans la norme canadienne (CSA, 2014) pour les parapets de performance TL-5 faisant l'objet de ce projet de recherche. Pour ces parapets, la charge de conception statique pondérée à atteindre est de 476 kN. Cette charge doit être appliquée à 900 mm au-dessus du haut du revêtement de chaussée, où 965 mm par rapport au haut de la dalle de pont, et répartie sur 2400 mm de longueur pour un parapet de niveau TL-5.

Grâce à la méthode des lignes de rupture, la capacité théorique du parapet MTQ301 a été évaluée théoriquement selon les méthodes de l'AASHTO (2017) et de Fadaee et al. (2018). Les résultats ont montré la similitude entre les résultats obtenus selon les deux méthodes de calcul (AASHTO et Fadaee et al.). Aussi, la capacité maximale du parapet est diminuée de 20 à 50 % lorsque la charge est appliquée sur 700 mm, tel que réalisé lors de projets antérieurs, par rapport à une charge répartie sur 2400 mm, tel que prescrit par la norme CSA S6. Lorsque le chargement est appliqué à l'extrémité, la capacité maximale est diminuée de 30 à 60 % par rapport à un chargement appliqué en zone intérieure. Finalement, la longueur critique (L_c) sur laquelle se produit la rupture se situe entre 3 et 5 m pour un chargement intérieur et entre 1 et 3 m pour un chargement à l'extrémité. Cette longueur représente la longueur à partir de laquelle le parapet peut développer sa pleine capacité sans être influencé par un effet de longueur. La longueur de 4 m des parapets préfabriqués semble donc pertinente.

Cette estimation théorique ayant mis en avant la plus faible capacité des parapets sous chargement excentré que sous chargement intérieur, un recensement des données de la littérature sur les différences de capacité observées pour ces deux types de chargement a été réalisé. Ceci a permis de relever une perte de capacité pour un chargement à l'extrémité par rapport à un chargement intérieur d'approximativement 50 % pour un parapet qui n'est pas, ou très peu, affecté par un effet de longueur (parapet de 4 m et plus). Pour les parapets plus courts, cette différence de capacité est plus faible.

Afin de palier à un manque possible de capacité dans les extrémités des parapets préfabriqués, sans avoir à augmenter la quantité d'armature dans ces parapets, il est possible d'ajouter une connexion longitudinale entre les parapets. Une telle connexion longitudinale a aussi son intérêt afin d'assurer la continuité du profil de redirection de véhicules en cas d'impact. Une revue des différentes

connexions longitudinales existantes a donc été réalisée afin d'en faire ressortir leurs avantages et inconvénients.

Parmi ces types de connexions longitudinales, les connexions par effet de butée en béton armé et les connexions coulées en place sont les plus intéressantes pour une application sur des parapets préfabriqués de pont. Ces types de connexion ont comme particularité de ne pas requérir beaucoup de précision à l'installation, ce qui permet de faciliter la connexion du parapet à la dalle de pont. Cependant, les connexions par effet de butée s'activent seulement au moment où le déplacement du parapet est plus grand que le jeu dans la connexion. Pour utiliser ce type de connexion, il faut donc vérifier que le déplacement du parapet est assez grand pour permettre une contribution appréciable de la connexion.

Finalement, cette revue a permis d'illustrer les avantages de l'utilisation de bétons fibrés et plus spécialement les bétons fibrés ultra performants. Ceux-ci montrent des résistances à la compression et à la traction supérieures à celles observées pour les autres gammes de bétons. De plus, les BFUP ont des indicateurs de durabilité 10 et 1000 fois inférieurs que pour des bétons à hautes performances actuellement utilisés pour les parapets de ponts respectivement pour des conditions non fissurée et fissurée.

CHAPITRE 3 CONCEPTION DES PARAPETS PRÉFABRIQUÉS

Tel que mentionné dans les objectifs du projet (cf Section 1.3), deux concepts de parapets sont étudiés. Il s'agit du parapet hybride à niche ouverte développé dans la Phase 1 du projet de recherche avec le MTQ (Charron et al., 2013) et d'une version préfabriquée du parapet MTQ301 coulée en place, qui doit être développée. Le Chapitre 3 présente la démarche de conception des parapets étudiés dans ce projet de recherche. Cette démarche se divise en deux étapes, soit le dimensionnement des parapets et la validation que les détails exigences de conception sont atteintes.

L'objectif de la conception des parapets testés dans ce projet est de développer des alternatives préfabriquées aux parapets coulés en place traditionnels. Pour y arriver, il faut modifier le mode de connexion des parapets à la dalle de pont pour que ceux-ci puissent être préfabriqués en usine, transportés au chantier puis installés sur la dalle de pont. Aucune modification à la géométrie extérieure des parapets n'est cependant requise.

Selon les informations relevées dans la revue de littérature, en modifiant seulement la connexion des parapets à la dalle de pont, il n'est pas requis de procéder à un essai d'impact à échelle réelle pour valider la performance des concepts de parapets proposés. En effet, il est possible de vérifier la performance des concepts proposés en appliquant un chargement statique en laboratoire au parapet pour valider sa capacité structurale. Pour un parapet de type TL 5, une résistance minimale de 476 kN est exigée pour un chargement statique appliqué à 965 mm de hauteur par rapport au dessus de la dalle et réparti sur 2400 mm de longueur (cf. Section 3.1).

Les concepts de parapets proposés sont présentés à la Section 3.1. La procédure suivie ainsi que les choix de conception y sont expliqués. Les paramètres utilisés dans les modèles numériques afin de valider la performance des concepts proposés selon les critères prescrits par les exigences de conception sont ensuite détaillés à la Section 3.2. Par la suite, les résultats des modélisations préliminaires pour le parapet hybride à niche ouverte et pour le parapet MTQ301 préfabriqué à niche ouverte sont respectivement présentés aux Sections 3.3 et 3.4. Finalement, des études paramétriques sur l'effet des propriétés matériaux et sur l'effet des conditions structurales sont réalisées aux Sections 3.5 et 3.6.

3.1 Concepts de parapets proposés

Dans cette section, le concept de parapet hybride à niche ouverte (Charron et al., 2013) est présenté à la Section 3.1.1. Ensuite la conception du parapet MTQ301 préfabriqué à niche ouverte est détaillée à la Section 3.1.2.

3.1.1 Parapet hybride à niche ouverte

Le parapet hybride à niche ouverte en BFUP (Figure 3.2 et Figure 3.2), qui est généralement nommé parapet hybride dans ce rapport, est un parapet préfabriqué avec un profil « F-Shape » conçu pour le niveau d'essai TL-5.

L'appellation hybride indique que le parapet est composé d'une coque extérieure en BFUP et d'un cœur en béton ordinaire (BO). La coque en BFUP de 4% de fibres s'épaissit de manière proportionnelle à l'intensité des efforts, soit avec une épaisseur minimale à la crête du parapet (30 mm) et une épaisseur maximale à la base près de la connexion (85 mm). Cette utilisation du BFUP dans la coque du parapet permet à la fois d'utiliser les excellentes propriétés mécaniques du BFUP pour la reprise des efforts, mais également sa durabilité exceptionnelle.

La connexion du parapet à la dalle, développé par Charron et al. (2013), consiste en un chevauchement de barres 20M espacées aux 175 mm dans la niche de connexion située à la base avant du parapet. Le chevauchement des barres de connexion, provenant en alternance de la dalle et du parapet, est réalisé en utilisant des manchons de type « Terminator » (nVent, 2019). La niche de connexion présente un détail particulier, puisqu'elle est légèrement encavée dans la dalle. Ce détail permet de réduire la hauteur de la niche dans le parapet, un confinement de la niche dans la dalle et une protection contre l'infiltration d'eau à l'interface parapet-dalle. Une fois les parapets correctement positionnés, cette niche de connexion est remplie avec un BFUP de 4% de fibres. Le fait que la niche de connexion soit située à l'avant du parapet permet de remplir la niche avec l'utilisation d'un coffrage conventionnel et de pouvoir ensuite valider visuellement la qualité du remplissage.

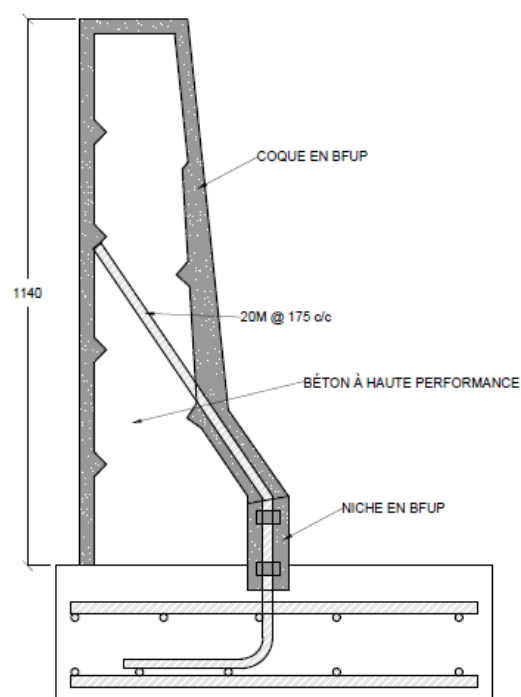


Figure 3.1 - Parapet hybride à niche ouverte en BFUP - vue de profil

Note : dimensions en mm

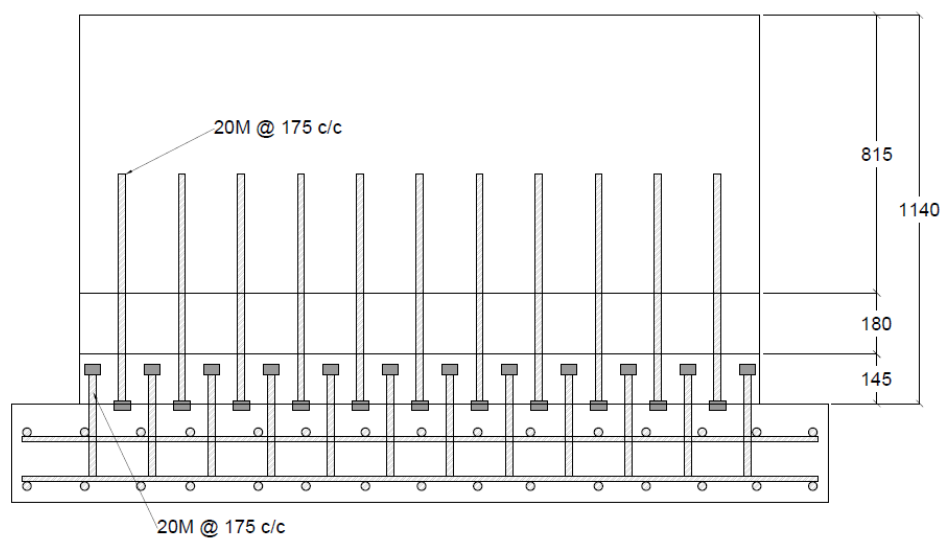


Figure 3.2 - Parapet hybride à niche ouverte en BFUP - vue de face

Note : dimensions en mm

3.1.2 Parapet MTQ301 préfabriqué à niche ouverte

L'objectif visé est d'adapter le parapet MTQ301 coulé en place en un parapet MTQ301 préfabriqué. Ceci requiert qu'il n'y ait pas d'armature qui soit à la fois dans le parapet et la dalle, excepté dans la zone de connexion parapet-dalle. Outre la connexion, aucune modification n'est prévue quant au type de béton utilisé dans le parapet, ce qui requiert de garder le même recouvrement (75 mm) des barres d'armatures que dans le parapet MTQ301 de référence lorsque celles-ci sont recouvertes de BO.

Selon les informations recensées dans la littérature et les conclusions du projet de la Phase 1 du projet avec le MTQ (Charron et al., 2013), la connexion avec une niche ouverte en BFUP de 4% de fibres est une option à privilégier pour le parapet MTQ301 préfabriqué. En effet, la performance mécanique de ce mode de connexion a été démontrée par Charron et al. (2013) et ce type de connexion permet une mise en place efficace au chantier en plus d'un contrôle qualité visuel du remplissage.

Le concept du parapet MTQ301 préfabriqué est illustré à la Figure 3.3b et à la Figure 3.4. Les barres d'armatures transversales présentes dans le parapet MTQ301 (Figure 3.3a) ont été légèrement modifiées pour rendre le parapet préfabriqué. La barre qui liait l'arrière du parapet à la dalle (Type D1 à la Figure 3.3a) a été raccourcie pour être exclusivement dans le parapet tout en respectant le recouvrement minimal de 75 mm par rapport au-dessous du parapet. La barre présente sur toute la hauteur du devant du parapet (Type P1 à la Figure 3.3a) a seulement été raccourcie afin de respecter l'enrobage minimal par rapport au-dessous du parapet. Pour éviter la confusion, il faut mentionner que la barre à l'avant et à l'arrière du parapet ne sont pas situées dans le même plan longitudinal. En observant la Figure 3.4 il peut être possible de penser que les armatures sont doublées, mais en réalité les barres sont simplement placées côtes à côtes. Finalement, la barre présente sur le devant de la partie inférieure du parapet (Type D2 à la Figure 3.3a) a été subdivisée en deux barres pour faire la connexion du parapet à la dalle, la première barre provient du parapet et se termine dans la niche de connexion, alors que la deuxième barre provient de la dalle et se termine également dans la niche de connexion. Ces deux types de barres sont placés en alternance de telle sorte qu'il y ait une barre de connexion à tous les 100 mm (Figure 3.4). Le chevauchement des barres dans la niche de connexion parapet-dalle a lieu de la même manière que pour le parapet hybride présenté à la Section 3.1.1, soit avec l'utilisation de coupleurs de type « Terminator » aux

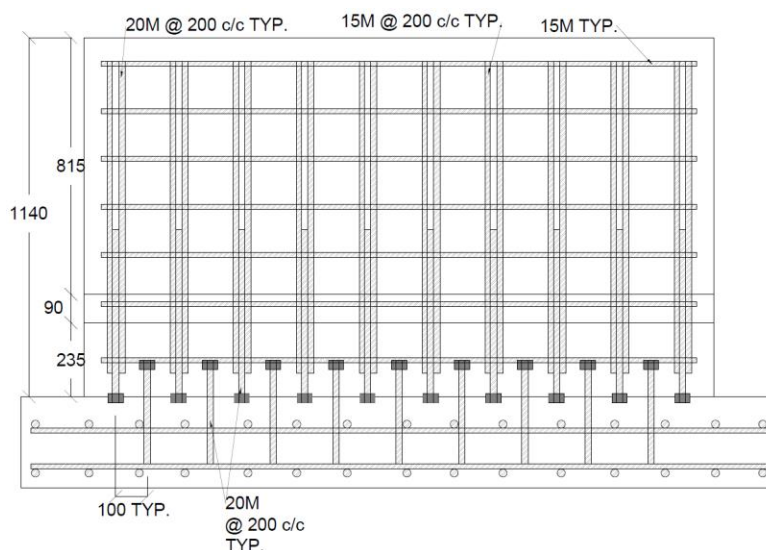


Figure 3.4 - Parapet MTQ301 préfabriqué – vue de face

Note : dimensions en mm

3.2 Modèles numériques

Cette section présente les informations relatives aux modèles numériques qui sont utilisés. Tout d'abord, la Section 3.2.1 décrit les différentes caractéristiques des modèles soit les modèles constitutifs du béton, les lois d'adhérence des barres d'armatures, les propriétés des contacts, les conditions d'appui, les conditions de chargement, les éléments finis, le maillage, la méthode de résolution et les propriétés des matériaux.

3.2.1 Présentation des propriétés des modèles numériques

Les modélisations par éléments finis non linéaires présentées dans ce mémoire ont été réalisées avec la version 5.4.1 du logiciel ATENA 3D. Ce logiciel est commercialisé par la compagnie tchèque Červenka Consulting. Le nom ATENA est un acronyme qui signifie « Avance Tool for Engineering Nonlinear Analysis » (Červenka et al., 2016). Ce logiciel a été utilisé avec succès pour reproduire les résultats d'essai lors de la Phase 1 du projet et pour tous les autres développements de parapets réalisés à Polytechnique Montréal. Cette section présente l'intégralité des paramètres de ces modélisations.

3.2.1.1 Modèles constitutifs du béton

Les bétons qui constituent les parapets et les dalles d'essai étudiés ont été modélisés à l'aide du module « CC3DNonLinCementitious2User » disponible dans le logiciel ATENA. Il s'agit d'un modèle de type fissuration-plasticité c'est-à-dire qu'il considère à la fois un modèle de fissuration en traction et un modèle de plasticité en compression. Le modèle constitutif en compression correspond à la surface de rupture de Menétrey-Willam avec un comportement écrouissant (pré-pic) et adoucissant (post-pic). En traction, il s'agit d'un modèle orthotrope de fissuration répartie et de bande de fissuration basé sur le critère de Rankine. À noter que cette loi de comportement en traction permet d'utiliser des fissures rotatives ou fixes (rotated crack ou fixed crack).

Dans les modélisations réalisées dans cette section, les fissures ont été considérées comme fixes. Ceci signifie que l'orientation de la fissure demeure la même dans l'élément fini au cours du chargement. Ce module a été préféré aux autres modules disponibles puisqu'il permet à l'utilisateur d'entrer manuellement les lois de contrainte-déformation souhaitées. Cela permet de modéliser correctement le comportement écrouissant et adoucissant du BFUP en utilisant les résultats des essais traction directe sur os pour modéliser le comportement en traction (cf. Section 3.2.1.6). Un exemple de loi de comportement écrouissant pré-pic et adoucissant post-pic entrée manuellement est présentée à la Figure 3.5 Pour le comportement en compression, en cisaillement ainsi que le comportement en traction des bétons non-fibrés, les lois de comportement par défaut du logiciel ont été utilisées.

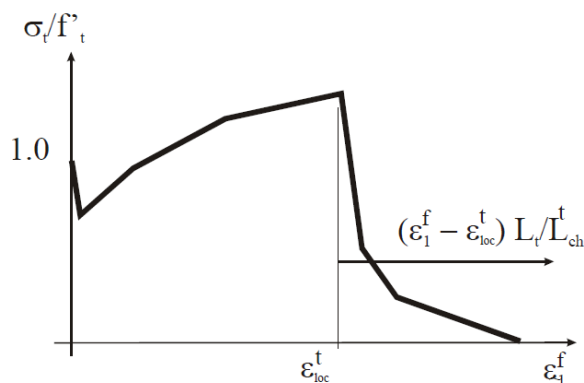


Figure 3.5 - Exemple d'une loi en traction entrée manuellement dans le logiciel ATENA 3D
(Červenka et al., 2016)

3.2.1.2 Géométrie des modèles

Les modèles étant réalisés en 3D, les modélisations reprennent donc fidèlement la géométrie réelle des parapets étudiés (Figure 3.6). Les modèles comprennent les éléments suivants : le ou les parapets étudiés, la dalle de pont, la niche de connexion, la plaque de chargement, les plaques d'appui des barres de connexion et si requis, la clé de connexion longitudinale. Chacun des éléments mentionnés sont modélisés en un seul macroélément et le lien entre ceux-ci est fait via des éléments de contact.

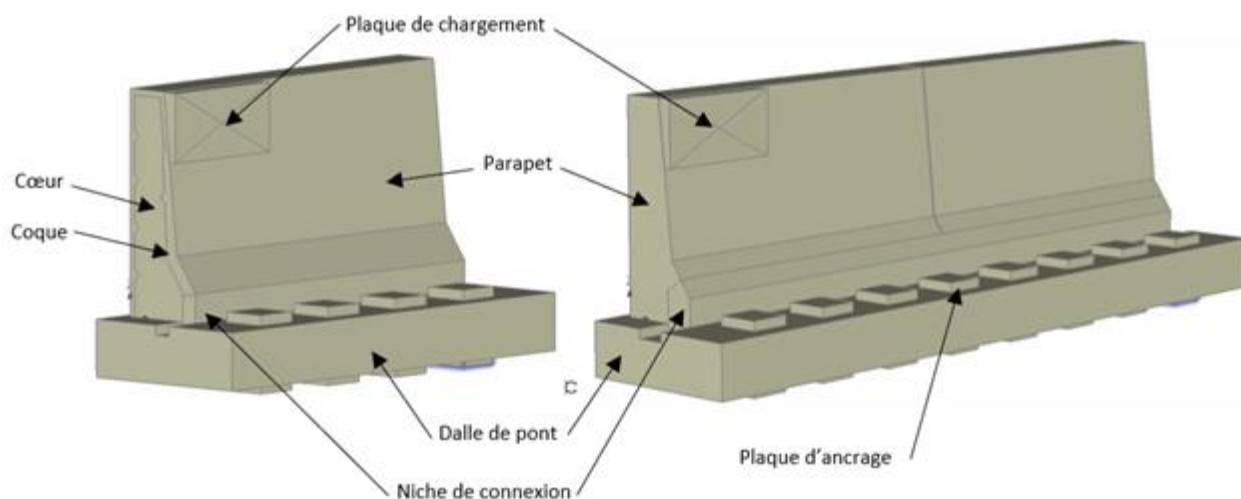
Ces éléments de contact entre deux surfaces basées sur le modèle « CC3DInterface » disponible dans ATENA. Ce modèle utilise un critère de Mohr-Coulomb avec une valeur minimale en traction, c'est à dire que la rupture est contrôlée par le critère de Mohr-Coulomb et par la suite c'est la friction entre les éléments qui contrôle. Ce modèle permet de calculer les contraintes de cisaillement ainsi que les glissements aux interfaces. Pour y arriver, le modèle a besoin de la rigidité normale K_{nn} , la rigidité en cisaillement K_{tt} , la résistance à la traction f_t , la cohésion C ainsi qu'un coefficient de friction (Červenka et al., 2016). Les propriétés des contact utilisés sont résumées au Tableau 3.1, ils proviennent de projets antérieurs réalisés à Polytechnique Montréal sur le développement de parapets préfabriqués, qui comportaient des contacts similaires à ceux retrouvés sur les parapets étudiés dans ce projet. Les contacts entre les éléments retrouvés dans les modèles (Figure 3.6) se trouvent entre les paques d'ancrage et la dalle de pont, entre la plaque de chargement et le parapet, entre le béton ordinaire et le BFUP (niches de connexion et interface cœur-coque du parapet hybride), dans le mortier qui fait la jonction entre le parapet préfabriqué et la dalle de pont et finalement sur les surfaces de la clé de connexion longitudinale.

Tableau 3.1 - Propriétés des interfaces utilisées dans les modélisations

Interface	K_{nn} (kN/m³)	K_{tt} (kN/m³)	f_t (MPa)	C (MPa)	Coefficient de frottement (-)
Plaques d'ancrage/dalle de pont	0.05E+09	2.00E+06	0.10	0.70	0.60
Plaque de chargement/parapet	10.0E+09	10.0E+09	0.50	1.00	0.30
Béton ordinaire/BFUP	0.50E+09	0.02E+09	3.00	0.50	1.00
Béton ordinaire/mortier	200E+09	200E+09	0.50	0.50	0.50
BFUP/mortier	0.50E+09	0.02E+09	1.83	0.50	1.00
Clé/parapet	0.45E+09	0.02E+09	1.80	1.80	0.8

Ensuite, les barres d'armatures ont été modélisées par des éléments « CCRéinforcement » dans ATENA. Ces éléments considèrent les armatures comme des éléments de treillis (Červenka et al., 2016). Les lois de comportement utilisées pour les armatures correspondent aux valeurs mesurées par les essais de traction sur les barres d'armatures (cf. Section 3.2.1.6). L'adhérence des barres d'armatures a été modélisée selon les paramètres du code CEB-FIP 1990. La relation entre le glissement et la force d'adhérence est principalement fonction de la résistance à la compression du béton et du confinement du béton (confiné ou non-confiné) (Červenka et al., 2016). De plus, afin de représenter correctement la présence des ancrages mécaniques « Terminator », les barres d'armatures dans les niches de connexion ont été modélisées avec une retenue qui empêche le glissement à l'extrémité de la barre. Finalement, pour simplifier les modélisations, les barres d'armatures présentes seulement dans la dalle de pont ont été modélisées avec une adhérence parfaite puisque celles-ci n'influencent pas les résultats.

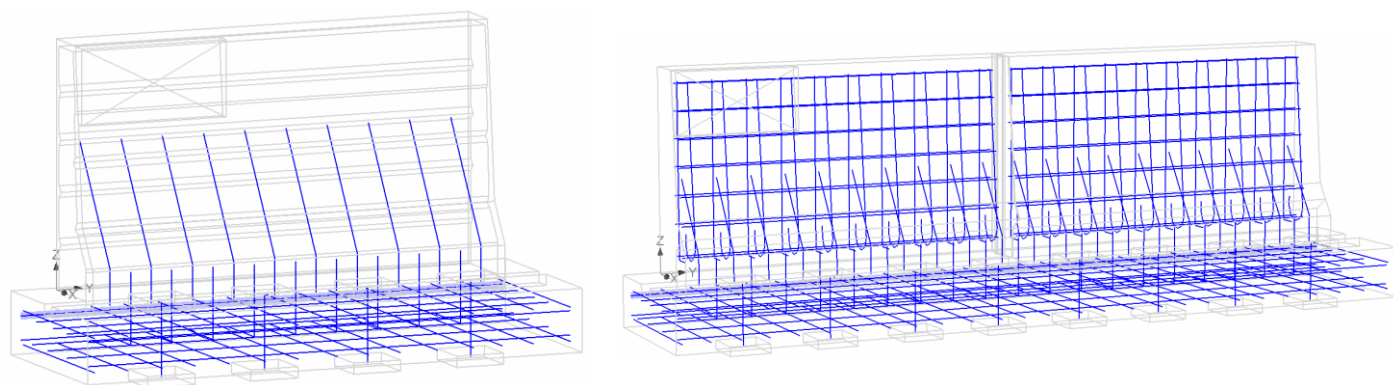
La géométrie des modèles (Figure 3.6) ainsi que la géométrie de l'armature (Figure 3.7) sont illustrées pour un modèle représentant un parapet hybride de 2 m et pour deux parapets MTQ301 préfabriqués de 2 m avec une connexion longitudinale, afin d'illustrer les deux parapets étudiés et un modèle avec plusieurs parapets connectés.



(a) Un parapet hybride de 2 m

(b) Deux parapets MTQ301 préfabriqués de 2 m avec une connexion longitudinale

Figure 3.6 - Géométries des modèles



(a) Un parapet hybride de 2 m

(b) Deux parapet MTQ301 préfabriqués de 2 m avec une connexion longitudinale

Figure 3.7 - Géométries de l'armature

3.2.1.3 Conditions limites

Les conditions limites ont été choisies afin de représenter correctement les conditions expérimentales des spécimens d'essai réalisés lors de la Phase 1 du projet entre 2011 et 2013 (Charron et al., 2013). Tout d'abord, les conditions d'appuis sont appliquées en bloquant le déplacement de la dalle de pont dans les trois directions principales. Les conditions d'appui modélisées représentent une dalle de pont qui est déposée à plat au sol de façon à reproduire les conditions d'appui des spécimens d'essai de la Phase 1 du projet qui étaient déposés directement sur la dalle du laboratoire. En réalité, les parapets sont positionnés sur une portion de la dalle de pont qui est en porte-à-faux. Les travaux de Namy (2012) ont montré qu'une dalle en porte-à-faux permet de mieux répartir les efforts et ainsi obtenir une capacité maximale plus importante. Les conditions d'appui choisies pour ces modélisations, soit une dalle déposée à plat, correspondent donc à un cas de chargement plus critique que lorsque les parapets sont positionnés sur une dalle en porte-à-faux.

Par la suite, la précontrainte appliquée à la dalle de pont fixée à la dalle du laboratoire est reproduite par des câbles externe reliés à des plaques d'ancrage sont tendus. Cette précontrainte est de 500 kN par barre d'ancrage et son application est répartie sur quatre pas de calcul. Ensuite, le chargement est appliqué par un déplacement contrôlé appliqué ponctuellement au centre de la plaque de

chargement. Il s'agit d'un chargement quasi-statique appliqué à une vitesse de chargement de 0.20 mm par pas de calcul. Comme l'ont montré les travaux de Niamba (2009) et de Duchesneau (2011), l'application d'un chargement statique constitue un cas de chargement plus critique qu'un chargement dynamique (cf. Section 2.1). Il est aussi important de noter que le poids propre des éléments n'est pas considéré pendant les analyses.

Finalement, certaines modélisations considèrent l'effet du retrait sur les niches de connexion (cf. Section 3.5.2). Le retrait est appliqué au moyen d'une déformation imposée au béton à la vitesse de $50 \mu\epsilon$ par pas de calcul jusqu'à l'atteinte de la valeur souhaitée.

3.2.1.4 Éléments finis et maillage

Le maillage utilisé pour les analyses a été réalisé en utilisant un élément tétraédrique à quatre nœuds et à un point d'intégration tel qu'illustré à la Figure 3.8.

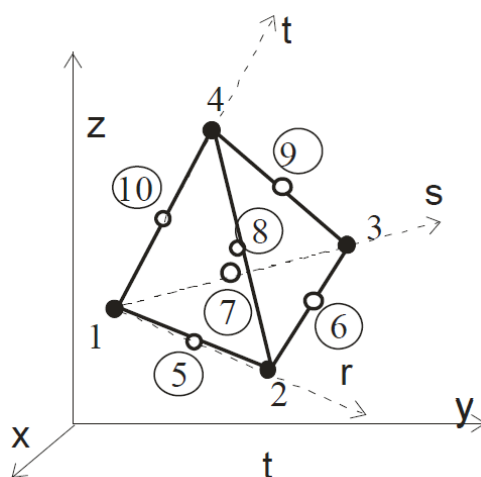


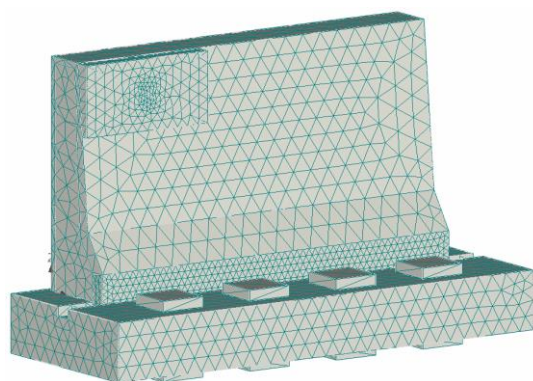
Figure 3.8 - Élément fini tétraédrique utilisé (Červenka et al., 2016)

Pour chacune des composantes des modèles (dalles de pont, parapets, plaques, etc.) la taille du maillage a été ajusté en fonction de la taille des composantes. Les tailles de maillage retenues pour les modélisations sont présentées au Tableau 3.2, celles-ci ont été reprises des travaux de la Phase 1 du projet. De plus, des raffinements ont été effectués au maillage de deux composantes. Le maillage est raffiné ponctuellement sur la plaque de chargement au point d'application de la charge avec des

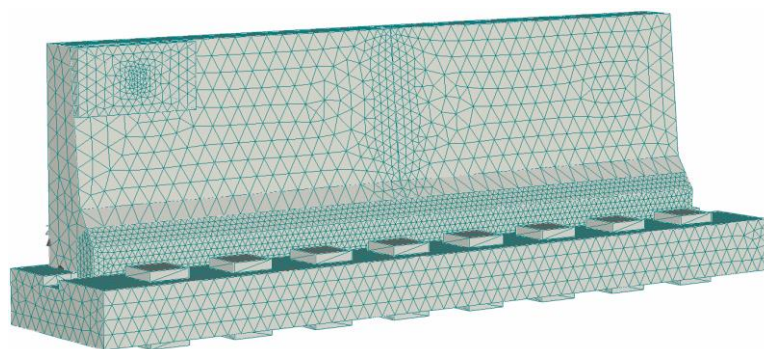
mailles de 6 mm. Le maillage a aussi été raffiné sur les parapets aux surfaces de contact entre la clé de connexion longitudinale pour assurer la compatibilité du maillage. La Figure 3.9 illustre le maillage final.

Tableau 3.2 - Taille des éléments pour chacun des composants des modèles

Élément	Taille (mm)
Plaques d'ancrage	200
Plaque de chargement	60
Dalles de pont	80
Niches de connexion	35
Parapets MTQ301 préfabriqué	100
Cœur du parapet hybride	100
Coque du parapet hybride	100
Clé de connexion longitudinale	20



(a) Un parapet hybride de 2 m



(b) Deux parapets MTQ301 préfabriqués de 2 m avec une connexion longitudinale

Figure 3.9 - Maillages utilisés pour les modélisations

3.2.1.5 Méthode de résolution

Les analyses numériques présentées dans ce mémoire sont des analyses incrémentales par éléments finis non-linéaires, c'est-à-dire qu'à chaque incrément de chargement (pas de calcul) le logiciel résout les équations d'équilibre ayant comme état initial les résultats du pas de calcul précédent. Il est d'ailleurs à noter que les analyses considèrent à la fois les non-linéarités des matériaux (cf. Section 3.2.1.1) ainsi que les non-linéarités géométriques.

Pour la résolution des systèmes d'équations non linéaires, la méthode de résolution itérative de Newton-Raphson jumelée à la méthode d'intégration de Gauss avec des fonctions d'intégrations linéaires a été utilisée.

3.2.1.6 Propriétés des matériaux

Une bonne partie des modélisations numériques réalisées dans le chapitre ont pris la forme d'études paramétriques préliminaires basées sur les essais expérimentaux de la Phase 1 du projet avec le MTQ. Ainsi, les propriétés matériaux utilisées pour ces analyses correspondent à celles mesurées dans le programme de caractérisation des matériaux de la Phase 1 (Charron et al., 2013). Les propriétés utilisées dans les modèles constitutifs pour les bétons sont résumées au Tableau 3.3. Il est important de noter que la coque du parapet hybride a été modélisée avec la même loi réduite en traction qui avait permis de valider les résultats expérimentaux à l'époque. Cette réduction des propriétés en traction pour la coque du parapet hybride est expliquée par la différence d'orientation des fibres entre les spécimens de caractérisation et les parapets causée par la méthode de mise en place du béton. Les courbes de comportement en traction des bétons sont présentées à la Figure 3.10 et à la Figure 3.11 pour les aciers d'armatures.

Tableau 3.3 - Propriétés des bétons utilisées dans les modélisations préliminaires (données extraites de (Charron et al., 2013))

Béton	E_c (MPa)	f'_c (MPa)	f_t (MPa)	$L^{t_{ch}}$ (mm)	ϵ_t^{loc} (m/m x 10^6)
Dalles de pont	37 400	47.7	2.76	30	0
Niches de connexion	40 400	100.8	11.5	35	1730
Cœur du parapet hybride	38 100	52.8	2.91	30	0
Coque du parapet hybride	40 100	128.7	8.19	100	1040
Parapet MTQ301 préfabriqué	30 000	45.4	2.70	30	0
Clé de connexion longitudinale	26 000	60.4	3.00	25	226

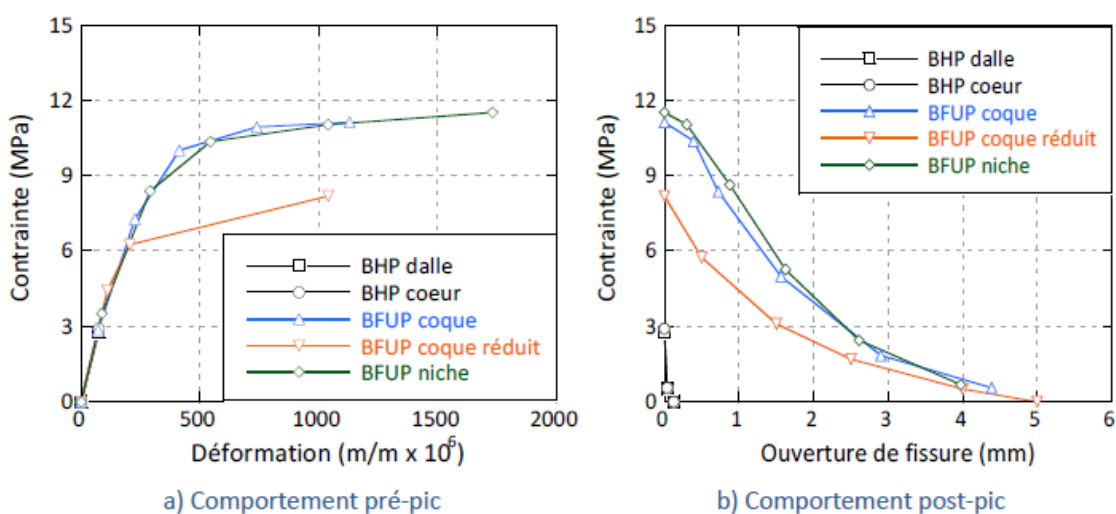


Figure 3.10 - Comportement en traction des bétons (Charron et al., 2013)

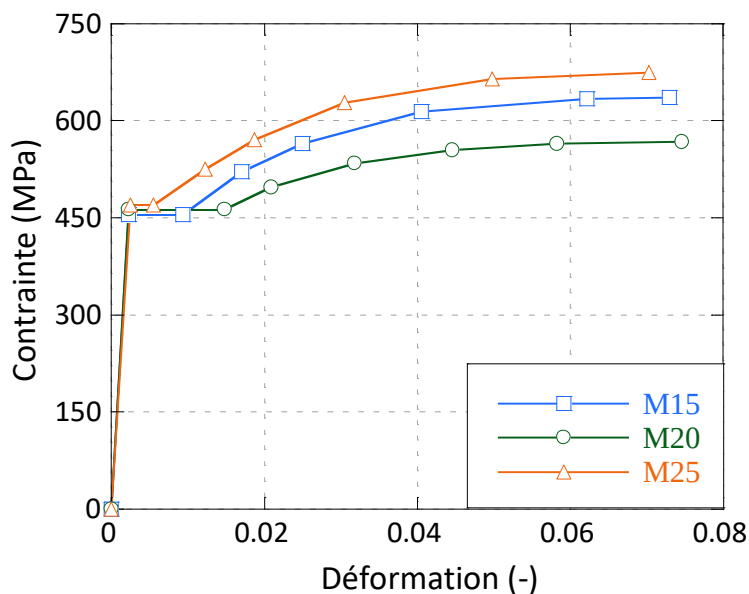


Figure 3.11 - Comportement en traction des aciers d'armature (Charron et al., 2013)

3.3 Modélisation du parapet hybride à niche ouverte

Avec les informations et les propriétés présentées à la Section 3.2, un parapet hybride (présenté à la Section 3.1.1) de 4 m de longueur a été modélisé numériquement. Deux cas de chargement ont été effectués, une avec un chargement central et l'autre avec le chargement appliqué à une extrémité du parapet. Pour ces modèles, la charge a été appliquée via une plaque de chargement de dimensions 2400 x 100 x 113 mm ($L \times h \times e_{\text{moy}}$). La longueur de 2400 mm est celle fixée par les exigences de conception, la hauteur de 100 mm ainsi que l'épaisseur moyenne de 113 mm ont été choisies afin de représenter la même rigidité flexionnelle qu'une poutre I (W150X22) pouvant réalistement être utilisée lors d'essais au laboratoire. Aussi, la charge est appliquée à une hauteur de 965 mm mesurée à partir du bas du parapet pour rencontrer les exigences de la norme (cf. Section 2.2).

La Figure 3.12 illustre les courbes force-déplacement horizontal obtenues pour les deux cas de chargement (centré et excentré) ainsi que la charge minimale pondérée de conception, en trait pointillé rouge. Pour les deux cas de chargement, la rigidité initiale est la même, mais la résistance maximale est de 17.4 % plus faible pour le cas du chargement à l'extrémité (résistance maximale de 711 kN versus 861 kN pour le chargement centré, cf. Tableau 3.4). Cette diminution de capacité

correspond aux valeurs retrouvées dans la littérature pour des parapets de plus de 3 m de longueur (cf. Section 2.3). Pour les deux cas de chargement étudiés, les plans de rupture obtenus (Figure 3.13) sont relativement similaires. En effet pour le cas de chargement centré, la fissure qui contrôle la rupture se produit dans le haut du parapet et contourne la plaque de chargement, un mode de rupture en flexion-cisaillement est alors observé. Pour le cas de chargement à l'extrémité la fissure contourne la plaque de chargement et se poursuit aussi sur le côté du parapet. Dans ce cas, le mode de rupture observé correspond à une rupture en cisaillement. La Figure 3.14 présente la contrainte maximale dans les barres d'armatures au pic de résistance, soit lorsque les contraintes dans les barres sont maximales. Il faut rappeler que conformément aux informations présentées à la Section 3.2.1.6 la contrainte de plastification des barres d'armatures est d'environ 450 MPa. Il est possible d'observer que les barres d'armatures dans la niche de connexion ne plastifient pas pour les deux cas de chargement. La contrainte maximale est d'environ 400 MPa pour un chargement centré et de 350 MPa pour un chargement excentré. La niche de connexion ne constitue donc pas la zone faible de la rupture ce qui permet d'obtenir le même mode de rupture que les parapets coulés en place retrouvés dans la littérature.

Pour le parapet hybride soumis à des chargements centré et excentré selon les critères prescrits par la norme, la résistance observée dépasse la charge minimale pondérée de conception de 476 kN. De plus, comme la résistance obtenue pour le cas de chargement critique (chargement à l'extrémité) excède grandement (de 49 %) les exigences de conception et que le déplacement transversal en service (à 357 kN) est très faible (< 2 mm), la présence d'une clé de connexion longitudinale n'est pas requise. Le concept de parapet hybride surpasse nettement la résistance requise et est assez rigide pour assurer la continuité du profil de redirection des véhicules sans nécessiter de continuité longitudinale. Les résultats de ces modélisations montrent que le concept de parapet hybride rencontre les critères et exigences de conception de la norme CSA-S6.

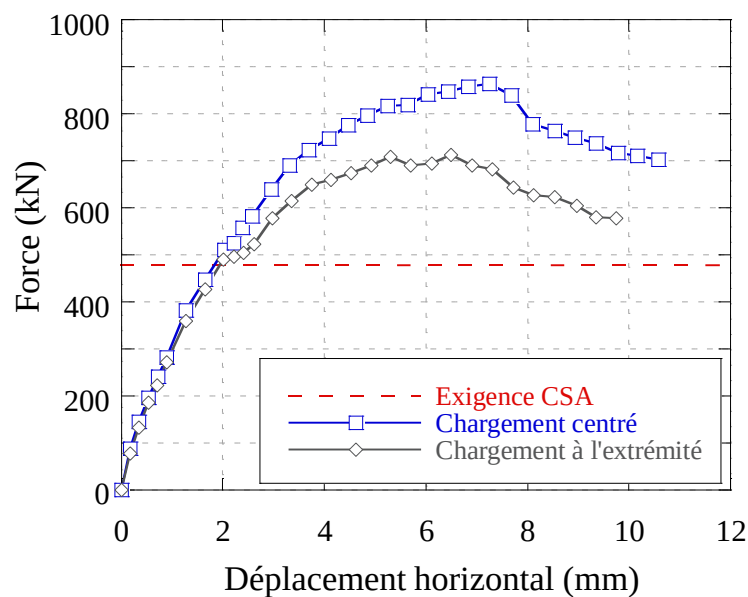


Figure 3.12 - Modélisation d'un parapet hybride de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm sous chargement centré et à l'extrémité

Tableau 3.4 : Capacité maximale d'un parapet hybride de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm sous chargement centré et à l'extrémité

Longueur du parapet	$F_{\text{max centrée}}$ (kN)	$F_{\text{max excentrée}}$ (kN)
4 m	861	711

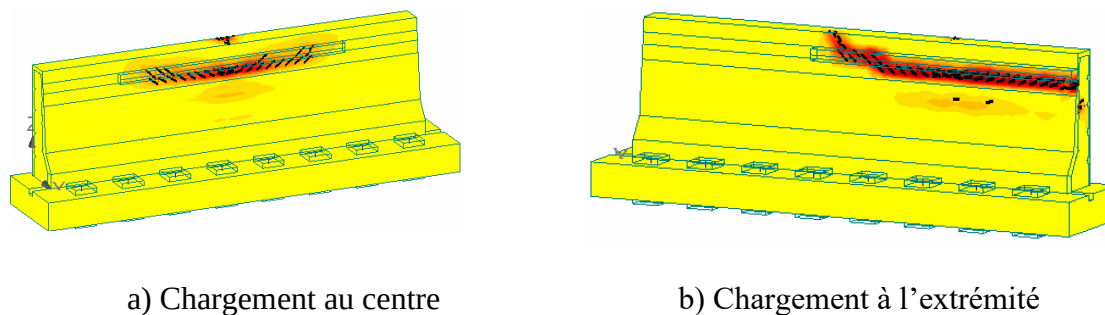
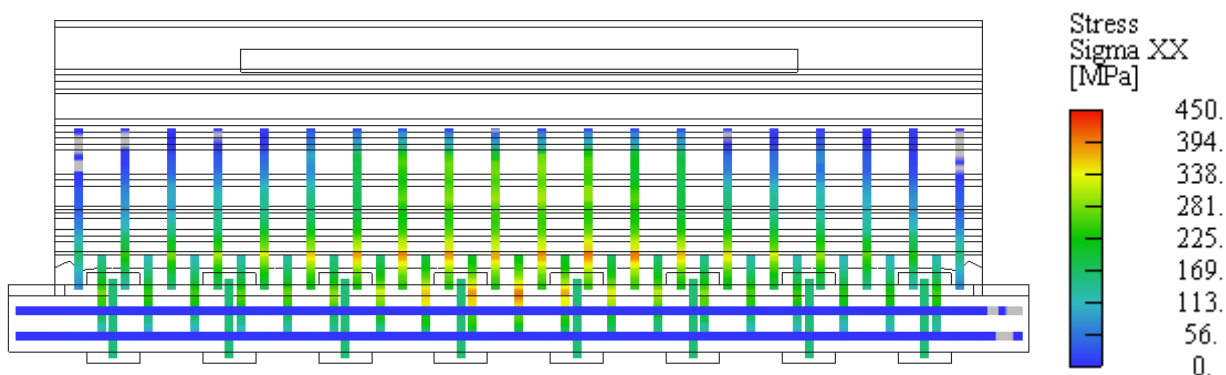
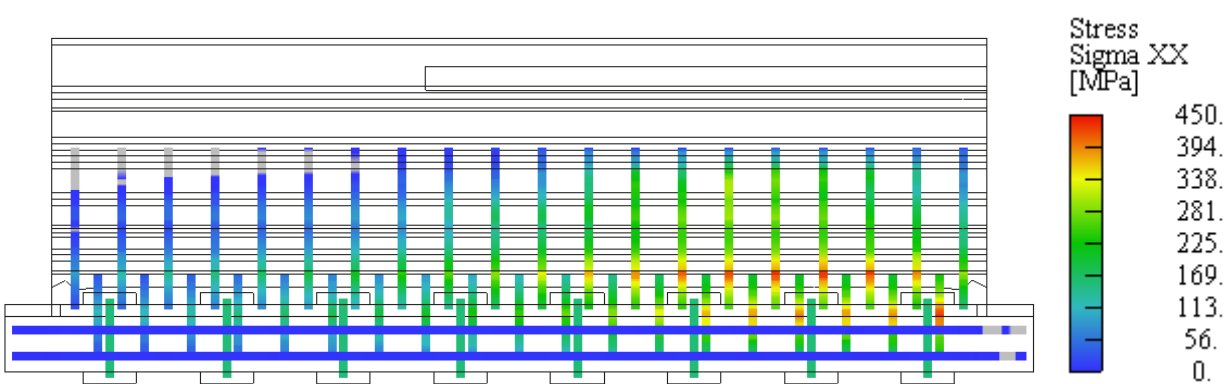


Figure 3.13 - Plan de rupture d'un parapet hybride de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm, (a) chargé au centre et (b) chargé à l'extrémité, $w > 0.3$ mm



a) Chargement au centre (à 861 kN)



b) Chargement à l'extrémité (à 771 kN)

Figure 3.14 - Contraintes maximales dans les barres d'armatures du parapet hybride de 4 m chargé par une plaque de 2400 mm

3.4 Modélisation du parapet MTQ301 préfabriqué à niche ouverte

Comme pour le parapet hybride, des modélisations ont été effectuées sur le concept de parapet MTQ301 préfabriqué conçu et présenté à la Section 3.1.2. Les modélisations ont été effectuées pour un chargement centré et excentré pour des parapets de 4 m de longueur. Le chargement est appliqué de manière identique à celui appliqué sur le parapet hybride (Section 3.3), soit selon les conditions de chargement prescrites par la norme.

Les résultats des modélisations pour le parapet MTQ301 préfabriqué sont sensiblement les mêmes que pour le parapet hybride. Tout d'abord, la Figure 3.15 et le Tableau 3.4 montrent que la résistance maximale est de 682 kN pour un chargement central et 612 kN pour un chargement excentré, soit

10 % inférieur dans le cas du chargement excentré. Dans les deux cas la rigidité initiale du parapet est la même et la résistance maximale est atteinte à un déplacement horizontal similaire d'environ 9 mm. Le patron de fissuration observé, présenté à la Figure 3.16, est globalement similaire à celui observé pour le parapet hybride, à la différence que la fissuration secondaire est plus nombreuse et s'étend un peu plus sur la hauteur du parapet. La fissure qui contrôle la rupture, dans le cas d'un chargement central, se produit dans le haut du parapet et contourne la plaque de chargement, un mode de rupture en flexion-cisaillement est alors observé. Pour le cas de chargement à l'extrémité la fissure contourne la plaque de chargement et se poursuit aussi sur le côté du parapet. Dans ce cas, le mode de rupture observé correspond à une rupture en cisaillement. La Figure 3.17 permet d'observer les contraintes dans les barres d'armatures au sommet lorsque la charge appliquée est maximale. Il faut rappeler que conformément aux informations présentées à la Section 3.2.1.6 la contrainte de plastification des barres d'armatures est d'environ 450 MPa. Il est possible d'observer que certaines barres d'armatures plastifient (couleur noir sur la Figure 3.17) dans le haut du parapet à l'endroit où la fissure principale se développe. La contrainte dans les barres de la niche de connexion demeure élastique et inférieure à 400 MPa, la niche de connexion ne constitue donc pas la zone faible de la rupture ce qui permet d'obtenir le même mode de rupture que les parapets coulés en place retrouvés dans la littérature.

Pour le parapet MTQ301 préfabriqué chargé selon les critères prescrits par la norme, la résistance observée dépasse largement la charge minimale pondérée de conception de 476 kN. De plus, comme la résistance obtenue pour le cas de chargement critique (chargement à l'extrémité) excède grandement (de 29 %) les exigences de conception et que le déplacement transversal en service (à 357 kN) est très faible (≈ 3 mm), la présence d'une clé de connexion longitudinale n'est pas requise. Le concept de parapet MTQ301 préfabriqué surpasse la résistance requise et est assez rigide pour assurer la continuité du profil de redirection des véhicules sans nécessiter de continuité longitudinale. Ces modélisations viennent confirmer que la conception du parapet MTQ301 préfabriqué est adéquate et répond à tous les critères et exigences de conception de la norme CSA-S6.

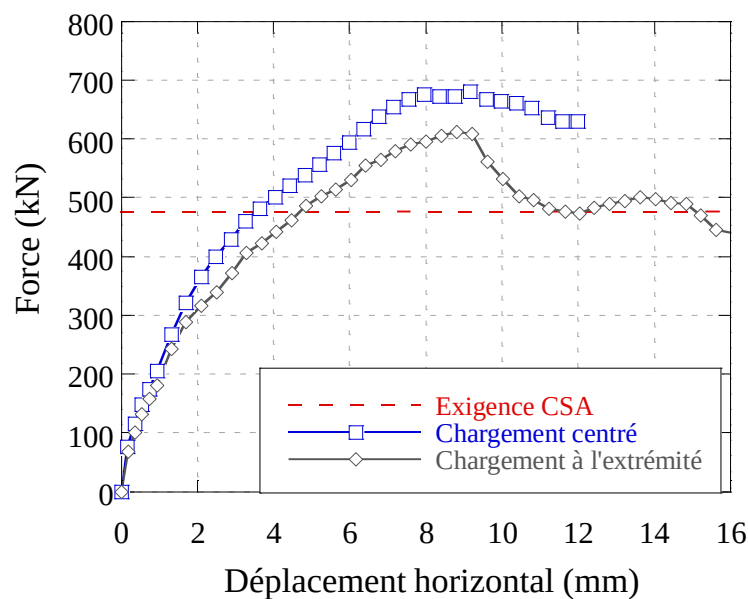
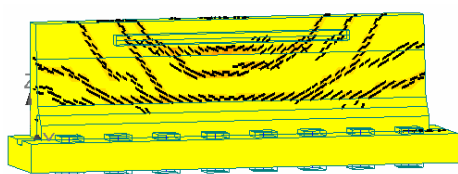


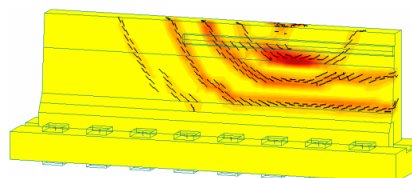
Figure 3.15 - Modélisation d'un parapet MTQ301 préfabriqué de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm sous chargement centré et à l'extrémité

Tableau 3.5 - Capacité maximale d'un parapet MTQ301 préfabriqué de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm sous chargement centré et à l'extrémité

Longueur du parapet	$F_{\text{max centrée}}$ (kN)	$F_{\text{max excentrée}}$ (kN)
4 m	682	612

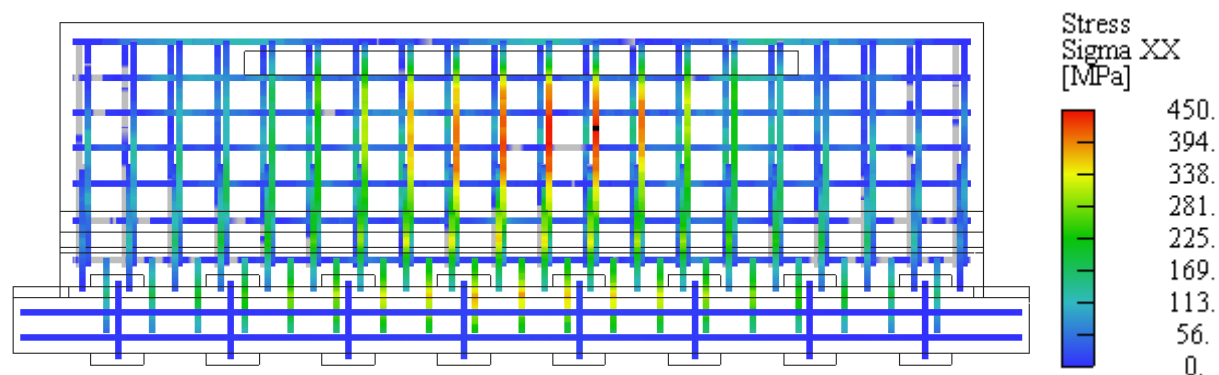


a) Chargement au centre

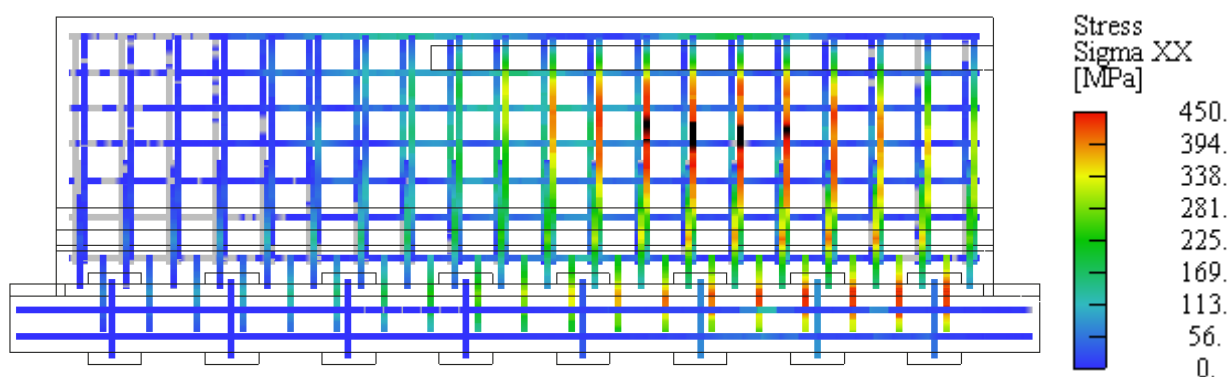


b) Chargement à l'extrémité

Figure 3.16 - Plan de rupture d'un parapet MTQ301 préfabriqué de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm, (a) chargé au centre et (b) chargé à l'extrémité, $w > 0.3$ mm



a) Chargement au centre (à 682 kN)



b) Chargement à l'extrémité (à 612 kN)

Figure 3.17 - Contraintes maximales dans les barres d'armatures du parapet MTQ301 préfabriqué de 4 m chargé par une plaque de 2400 mm

3.5 Études paramétriques sur les propriétés matériaux

Étant donné la réserve de capacité observée aux Sections 3.3 et 3.4 sur les concepts de parapets proposés en utilisant des BFUP à 4% de fibres, cette section présente les résultats d'une étude paramétrique préliminaire visant à étudier l'effet de certaines propriétés matériaux (pourcentage de fibres dans le BFUP et retrait) sur la performance des parapets. Cette étude permettra de faire le choix final de BFUP à utiliser. L'effet du pourcentage de fibres dans les éléments en BFUP est présenté à la Section 3.5.1, alors que l'effet du retrait est présenté à la Section 3.5.2.

Cette étude a été réalisée sur des parapets de 4 m de longueur, soit la longueur à laquelle les parapets préfabriqués seraient produits. Les parapets ont été chargés sur une longueur de 2400 mm, à une hauteur de 965 mm, tel que prescrit dans la norme CSA S6, via la plaque de chargement de $2400 \times 100 \times 113 \text{ mm}^3$ présentée à la Section 3.3. Les paramètres de modélisation sont les mêmes que ceux présentées à la Section 3.2.

3.5.1 Effet du pourcentage de fibres dans le BFUP

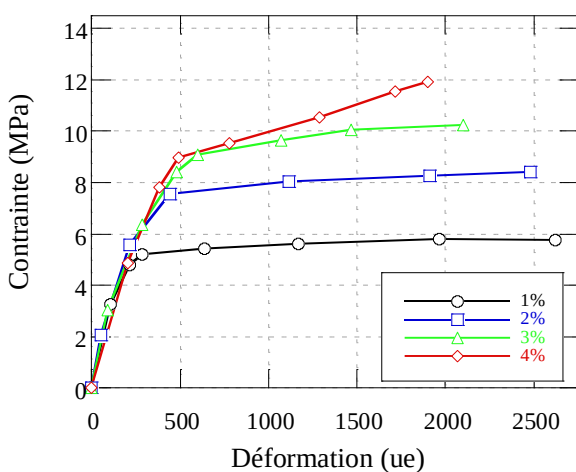
L'utilisation d'un pourcentage de fibres plus élevé dans le BFUP accroît sa résistance en traction. En contrepartie, un tel BFUP est plus coûteux à produire. La conception initiale des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué prévoit l'utilisation d'un BFUP contenant 4 % volumique de fibres pour les niches de connexion des deux types de parapets ainsi que pour la coque du parapet hybride. L'objectif de cette section est d'évaluer l'impact de la diminution du pourcentage de fibres dans les éléments en BFUP sur la performance des parapets à l'étude. L'impact du pourcentage de fibres dans le BFUP de la coque du parapet hybride et de la niche de connexion du parapet hybride est présenté respectivement aux Sections 3.5.1.1 et 3.5.1.2. Cet impact est évalué pour les deux cas de chargement à l'étude, soit un chargement centré ou excentré. Aucune modélisation n'est réalisée pour la niche de connexion du parapet MTQ301 préfabriqué, puisqu'il est supposé que celle-ci se comporte de façon similaire à la niche de connexion du parapet hybride.

L'impact du pourcentage de fibres a été évalué pour des dosages compris entre 1 et 4 % volumique. Des courbes de comportement typique obtenues de spécimens de caractérisation en traction de BFUP comprenant 1, 2, 3 et 4 % volumique de microfibres d'acier (Lagier, 2015) ont été introduites dans le logiciel Atena. Étant donné qu'il avait été observé lors de la Phase 1 du projet (Charron et al., 2013) que la loi de comportement en traction du BFUP constituant la coque du parapet hybride était réduite par rapport à la loi obtenue des spécimens de caractérisation (cf. Section 3.2.1.6), des lois de comportement réduites de 30 % pour la contrainte maximale et de 40 % pour la déformation au pic de chacun de ces BFUP ont aussi été introduites pour la modélisation de la coque du parapet hybride. Les propriétés utilisées pour les BFUP avec 1, 2, 3 et 4 % vol. de fibres sont résumées au Tableau 3.6 et leurs courbes de comportement en traction sont présentées aux Figure 3.18 et Figure 3.19 respectivement pour les lois réelles et les lois réduites. À noter que le BFUP à 1 % vol. de fibres a été étudié seulement pour information et n'aurait pas de

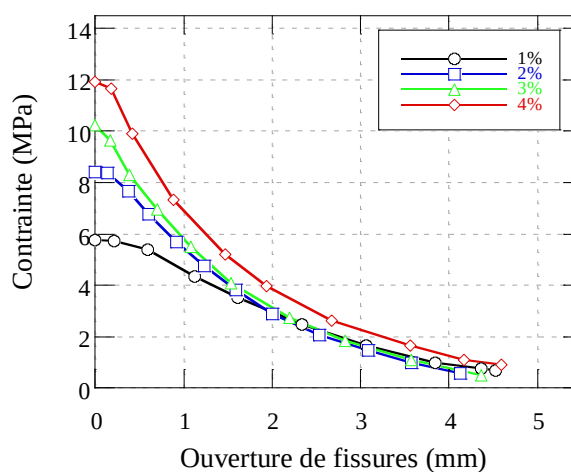
réel intérêt a être utilisé, puisque le dosage en fibres n'est pas suffisant pour bénéficier d'une réelle amélioration du comportement en traction ainsi que de la durabilité du matériau.

Tableau 3.6 - Résumé des propriétés utilisées pour les différents BFUP considérés

Propriétés	BFUP 1 %	BFUP 2 %	BFUP 3 %	BFUP 4 %	BFUP 1 % réduit	BFUP 2 % réduit	BFUP 3 % réduit	BFUP 4 % réduit
Module élastique E_c (MPa)	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000
Résistance à la traction f_t (MPa)	5,8	8,4	10,2	11,9	4,1	6,0	7,3	8,5
Résistance à la compression f'_c (MPa)	120	120	120	120	120	120	120	120
Taille caractéristique en traction L_{ch}^t (mm)	35	35	35	35	100	100	100	100
Déformation de la localisation ε_t^{loc} ($\times 10^6$)	2600	2500	2100	1900	1600	1500	1300	1100



(a) Comportement en pré-pic



(b) Comportement en post-pic

Figure 3.18 - Courbes de comportement utilisées pour l'étude du pourcentage de fibres du BFUP dans les niches de connexion

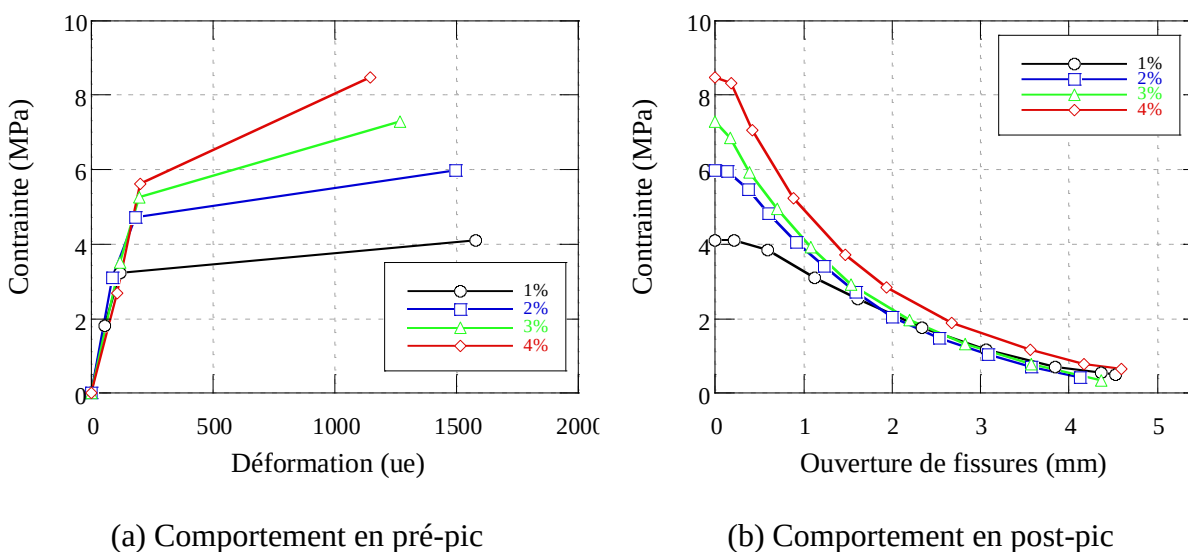


Figure 3.19 - Courbes de comportement réduites utilisées pour l'étude du pourcentage de fibres du BFUP dans la coque du parapet hybride

3.5.1.1 Coque du parapet hybride

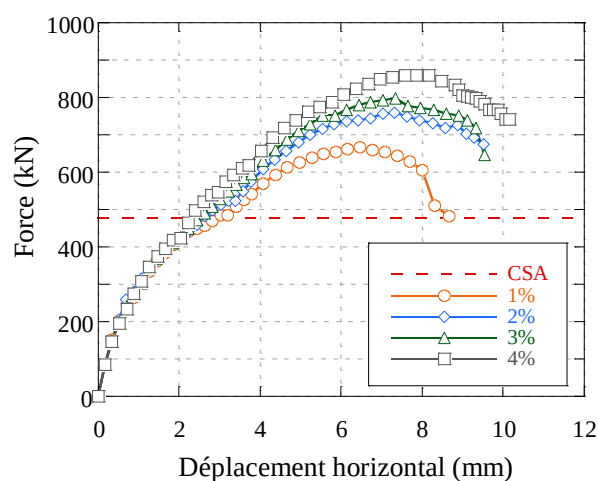
Le comportement global du parapet hybride en fonction du pourcentage de fibres utilisé dans le BFUP de la coque est présenté au Tableau 3.7 et Tableau 3.8 (capacités maximales atteintes, respectivement pour les chargements centré et excentré) ainsi qu'à la Figure 3.20. Pour ces modèles, la niche de connexion était modélisée par un BFUP à 4 % de fibres. Pour une même configuration de chargement (centré ou excentré), la rigidité initiale demeure la même quel que soit le pourcentage de fibres, mais la propagation de la fissuration se produit plus tôt lorsque le pourcentage de fibres diminue. La résistance maximale est logiquement atteinte avec la coque en BFUP 4 %. Les résultats montrent ensuite une réduction d'environ 7 % à 10 % de la capacité maximale lorsque le pourcentage de fibres diminue de 1 %, autant pour les conditions de chargement centré qu'excentré. Le fait que le comportement du BFUP de la coque influence le comportement global des parapets est logique, puisque le mode de rupture du parapet hybride est essentiellement contrôlé par la rupture de la coque. Bien qu'une diminution du pourcentage de fibres dans le BFUP diminue la capacité maximale du parapet, celle-ci reste, pour tous les pourcentages de fibres testés, largement supérieure à la résistance minimale exigée de 476 kN, et ce, pour les cas de chargements centré et excentré.

Tableau 3.7 - Capacité maximale du parapet hybride selon le pourcentage de fibres dans la coque pour un chargement central

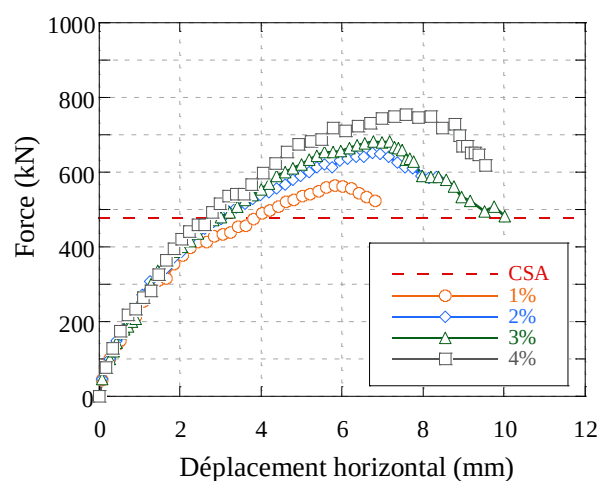
Pourcentage de fibres	$F_{\max}$ centrée (kN)	Diminution $F_{\max}$ vs $F_{\max}$ 4%
BFUP 4%	859	-
BFUP 3%	797	-7.2%
BFUP 2%	757	-11.9%
BFUP 1%	667	-22.4%

Tableau 3.8 - Capacité maximale du parapet hybride selon le pourcentage de fibres dans la coque pour un chargement excentré

Pourcentage de fibres	$F_{\max}$ excentrée (kN)	Diminution $F_{\max}$ vs $F_{\max}$ 4%
BFUP 4%	754	-
BFUP 3%	683	-9.4%
BFUP 2%	650	-13.8%
BFUP 1%	564	-25.2%



(a) Chargement centré



(b) Chargement à l'extrémité

Figure 3.20 - Effet du pourcentage de fibres dans la coque du parapet hybride

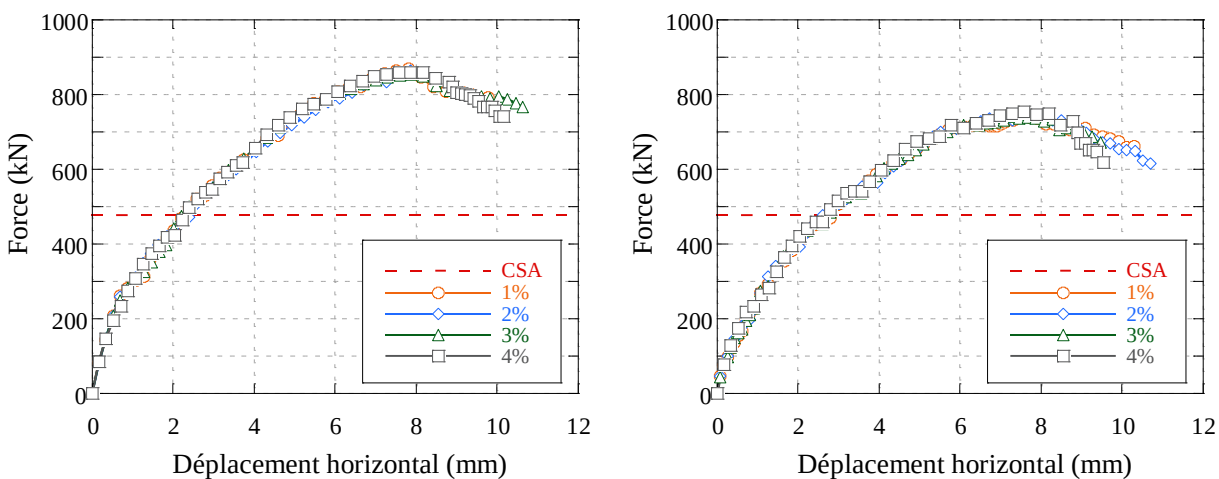
D'après les résultats présentés au Tableau 3.7, Tableau 3.8 et Figure 3.20, il apparaît intéressant de profiter de la surcapacité observée pour le parapet hybride et d'utiliser un BFUP 2 % pour la coque. Il faut cependant garder à l'esprit qu'une orientation des fibres moins favorable que celle considérée dans les lois de comportement pourrait survenir. De plus, la coque est extrêmement exposée aux conditions climatiques en plus des sollicitations mécaniques. Afin d'assurer une performance et une durabilité maximale, le BFUP 4 % a été conservée. De plus, étant donné que la production de la coque est appelée à être produite en usine, où les conditions de fabrication sont favorables et contrôlées, les problématiques de fabrication (grande énergie de malaxage, etc.) que pourrait amener l'utilisation d'un fort dosage en fibres sont évitées.

3.5.1.2 Niche de connexion du parapet hybride

Pour étudier l'effet du pourcentage de fibres dans le BFUP constituant la niche de connexion du parapet hybride, la coque a été modélisée à l'aide d'un BFUP à 4 % de fibres, soit la configuration qui permet d'atteindre la capacité maximale la plus élevée et donc le cas potentiellement le plus critique pour la niche de connexion. Les courbes de comportement global (force-déplacement) du parapet hybride (Figure 3.21), sont toutes quasiment superposées quel que soit le pourcentage de fibres dans le BFUP (1 à 4 %), pour un même type de chargement. Ceci indique que le pourcentage de fibres dans la niche du parapet hybride n'a aucune influence sur la capacité maximale, autant pour un chargement centré qu'excentré, et donc que la résistance minimale exigée de 476 kN est atteinte dans tous les cas. Ces résultats indiquent que la niche de connexion est relativement peu sollicitée et qu'elle transfère efficacement les efforts à la dalle.

La seule différence visible entre les BFUP considérés (1 à 4 %) est au niveau de la fine fissuration qui se produit dans la niche de connexion. La Figure 3.22 présente la fissuration totale (fissure de toutes tailles comprenant même les fissures non visibles ($\leq 100 \mu\text{m}$) du parapet hybride au pic de la courbe force déplacement et le Tableau 3.9 regroupe les ouvertures de fissure maximales observées au même moment dans la niche. Pour cette analyse, il a volontairement choisi de mettre aucun filtre sur l'ouverture minimale des fissures présentées à la Figure 3.22 afin d'observer la microfissuration. Il ne faut pas confondre la microfissuration présentée et le patron de fissuration visible à l'œil nu du parapet. Si le parapet est fortement fissuré à cette charge, la niche est quant à elle relativement peu endommagée d'où le besoin d'afficher les microfissures. Avec un BFUP 4 %, seules quelques microfissures très fines ($\leq 20 \mu\text{m}$) sont présentes dans la niche. À chaque

diminution de 1 % du pourcentage de fibres, le nombre de microfissures double. Pour les BFUP 2 % et 3 %, les microfissures demeurent cependant très fines soit avec des ouvertures maximales respectives de 20 μm et de 30 μm , alors que celles pour le BFUP 1% sont légèrement plus ouvertes ($\leq 75 \mu\text{m}$).



(a) Chargement centré

(b) Chargement à l'extrémité

Figure 3.21 - Effet du pourcentage de fibres dans la niche du parapet hybride

Tableau 3.9 - Ouvertures de fissures dans la niche pour un chargement centré

Pourcentage de fibres	Ouverture de fissures maximale
	w_{max} (μm)
BFUP 4%	20
BFUP 3%	20
BFUP 2%	30
BFUP 1%	75

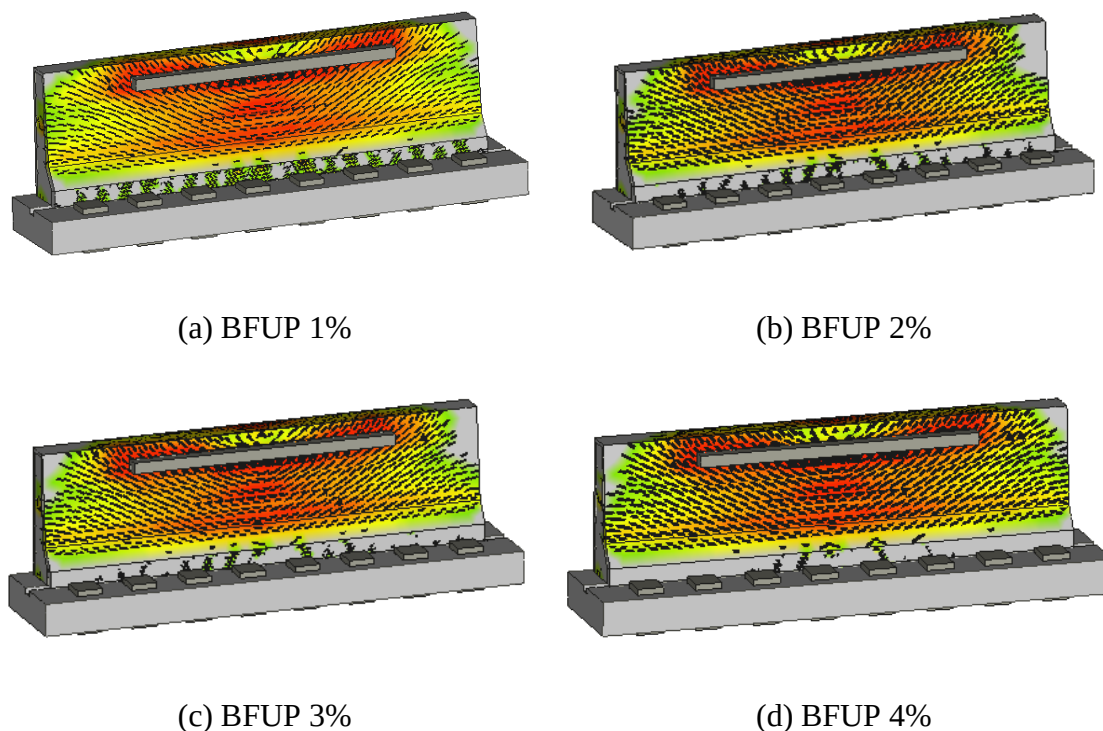


Figure 3.22 - Effet du pourcentage de fibres sur la fissuration de toute dimension dans la niche de connexion au pic ($F_{max} = 868 \text{ kN}$, $d = 7,8 \text{ mm}$), aucun filtre sur w

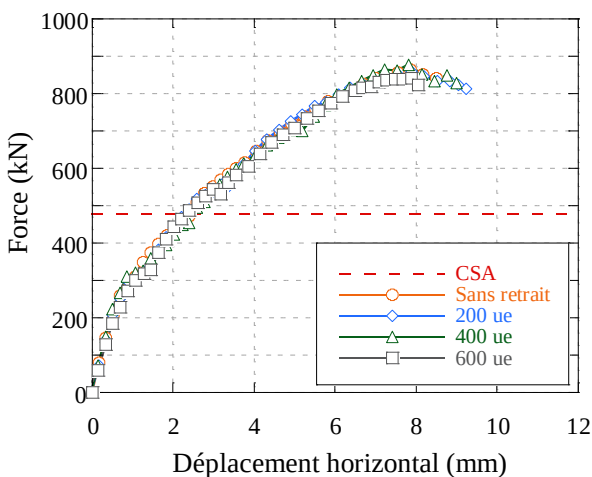
Considérant les résultats présentés dans cette section, l'utilisation d'un BFUP à 4 % de fibres n'est pas nécessaire pour obtenir un comportement adéquat de la niche de connexion du parapet hybride. Or, la production de BFUP avec 4 % vol. de fibres peut s'avérer plus complexe que pour les BFUP comprenant un plus faible dosage en fibres, puisqu'elle requiert une plus grande énergie de malaxage que seuls certains modèles de malaxeurs plus performants peuvent fournir. Considérant cet aspect pratique, l'utilisation de BFUP à 2 ou 3 % semble plus adéquate pour la niche de connexion qui doit être produite en chantier avec de petits malaxeurs. Les BFUP à 2 et 3 % pour la niche de connexion du parapet hybride seront comparés à la Section 3.5.2 étudiant l'effet du retrait.

3.5.2 Effet du retrait du BFUP

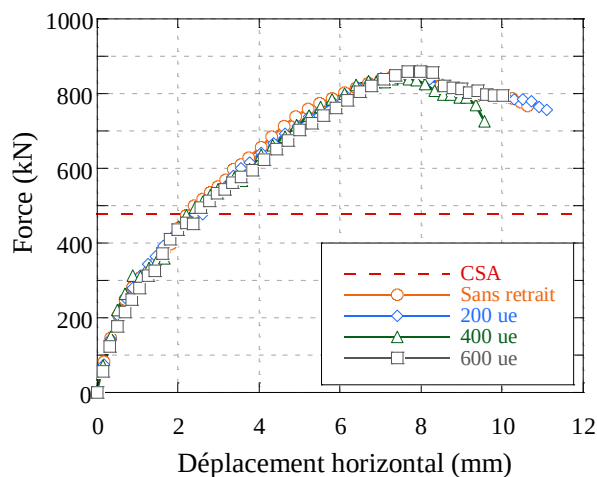
Les parapets hybride et MTQ301 préfabriqué sont destinés à être fabriqués en usine de préfabrication. Les déformations dues au retrait dans les parapets ne sont donc pas restreintes par

la dalle de pont, ou dans une moindre mesure par les armatures présentes dans ces parapets. Pour cette raison, l'étude sur l'effet du retrait s'est concentrée sur le retrait du BFUP mis en place dans les niches de connexion où les déformations sont restreintes à la fois par la dalle de pont et par les parapets, soit deux éléments très rigides. Comme il est assez difficile de prévoir précisément la valeur du retrait effectif (après restriction) du BFUP mis en place dans la niche, trois valeurs réalistes ont été considérées soit 200, 400 et 600 microdéformation ($\mu\epsilon$). De cette façon, il sera possible d'observer l'effet du retrait sur toute la plage de retrait envisageable. Le retrait est appliqué au BFUP de la niche en lui imposant une déformation globale.

Pour le parapet hybride, cette étude a été réalisée pour une niche comprenant un BFUP de 2 ou 3 % vol. de fibres selon les constats faits lors de l'étude sur l'effet du pourcentage de fibres dans la niche (cf. Section 3.5.1.2). La coque est ici modélisée par une BFUP à 4 % vol. de fibres pour étudier le comportement mécanique avec la sollicitation maximale qui pourrait être appliquée à la niche. Tout comme observé lorsque différents pourcentages de fibres étaient utilisés dans le BFUP de la niche, les courbes de comportement du parapet hybride (Figure 3.23) sont parfaitement superposées, quel que soit le retrait appliqué, autant lors de l'utilisation de BFUP à 2 % que de BFUP à 3 % de fibres. La résistance minimale exigée de 476 kN est donc atteinte dans tous les cas. Cela signifie que le retrait dans les niches de connexion n'a aucun effet sur la capacité maximale du parapet hybride. En comparant la fissuration de toute dimension (microfissuration à ne pas confondre avec le plan de fissuration visible à l'œil nu) de la niche pour le cas sans retrait et le cas de retrait maximal de 600 $\mu\epsilon$ (Tableau 3.10 et Figure 3.24), il est possible d'observer une nette augmentation de la microfissuration dans la niche lorsque le retrait du BFUP est considéré, autant pour l'utilisation du BFUP avec 2 % que le BFUP avec 3 % de fibres. Malgré un plus grand nombre de fissures avec considération d'un retrait de 600 $\mu\epsilon$, leur ouverture maximale n'augmente pas pour la niche en BFUP à 3 % de fibres, alors qu'elle augmente jusqu'à une valeur de 0,1 mm pour la niche en BFUP à 2 % de fibres. À partir de cette valeur (0.1 mm), la fissuration commence à ne plus être négligeable du point de vue de la durabilité et pourrait également influencer légèrement la résistance (Hubert et al., 2015). Il est recommandé d'utiliser un BFUP avec 3 % de fibres pour la niche de connexion du parapet hybride et du parapet MTQ301 préfabriqué.



(a) BFUP 2%



(b) BFUP 3%

Figure 3.23 - Effet du retrait de la niche du parapet hybride

Tableau 3.10 - Ouvertures de fissures dans la niche pour un chargement centré

Pourcentage de fibres	Retrait appliqué ($\mu\epsilon$)	Ouverture de fissures maximale w_{max} (μm)
BFUP 2%	-	30
BFUP 2%	- 600	100
BFUP 3%	-	20
BFUP 3%	- 600	20

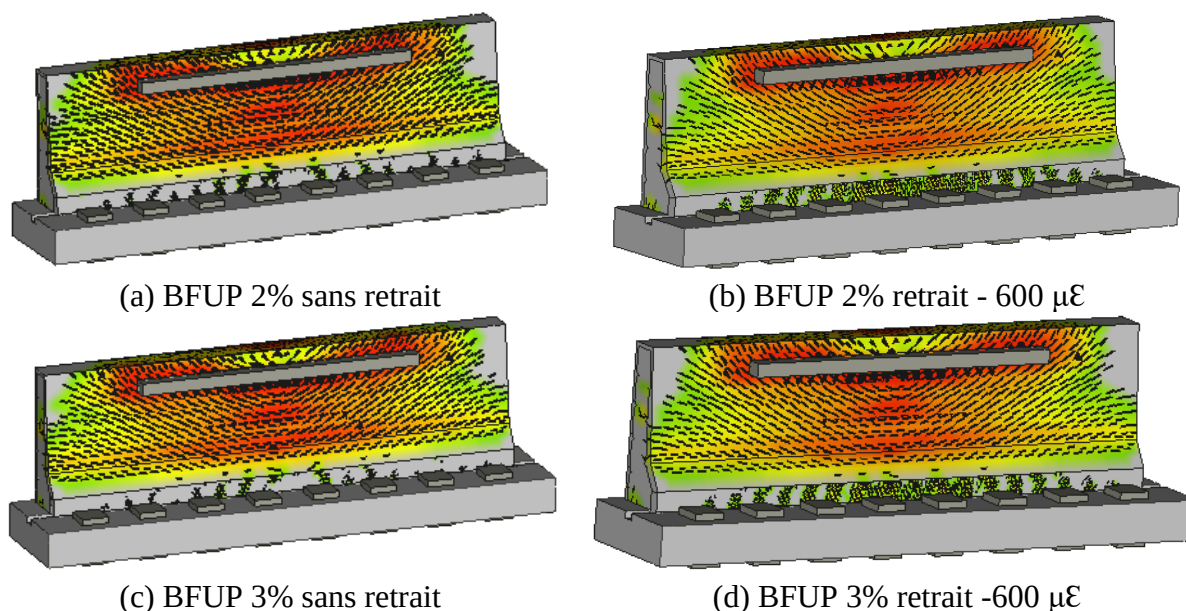


Figure 3.24 - Effet du retrait sur la fissuration de toute taille dans la niche de connexion au pic
($F_{max} = 868 \text{ kN}$, $d = 7.8 \text{ mm}$), aucun filtre sur w

3.6 Étude paramétrique sur les effets structuraux

Alors que la Section 3.5 s'intéressait à l'influence de certaines propriétés du BFUP (% de fibres et retrait) sur le comportement des parapets préfabriqués, cette section vise à étudier l'influence de différentes configurations d'essai (positionnement de la charge, longueur des parapets, dimension de la plaque de chargement et effet de continuité entre 2 parapets adjacents). L'objectif de cette étude est de comprendre l'influence de ces différents paramètres sur le comportement des parapets à l'étude et de choisir la configuration à tester expérimentalement dans le cadre de ce projet. Cette étude a été réalisée en utilisant les propriétés et paramètres de modélisations présentés à la Section 3.2.1 sur les concepts de parapet hybride (Section 3.1.1) et de parapet MTQ301 préfabriqué (Section 3.1.2). L'étude paramétrique sera réalisée de façon complète pour le parapet hybride et de façon plus sommaire pour le parapet MTQ301 préfabriqué, étant donné que les résultats obtenus avec la modélisation de ce parapet ont permis d'observer un comportement mécanique similaire à celui obtenu avec le parapet hybride.

Pour certaines études paramétriques, des parapets de 2 m de longueur et une plaque de 700 mm de longueur ont été considérés afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec les essais de

laboratoire réalisés dans la Phase 1 du projet. Ces choix de longueurs avaient été fixés par des impératifs de laboratoire, c'est-à-dire d'utiliser des parapets plus faciles à produire, manipuler et tester. La longueur couramment utilisée pour des parapets préfabriqués est plutôt de 4 m et la plaque de chargement exigée dans la norme CSA-S6 est de 4 m.

L'effet de l'excentricité de la charge, soit la différence de comportement entre un chargement appliqué à l'extrémité d'un parapet par rapport à un chargement appliqué en son centre, sera en premier lieu étudié à la Section 3.6.1. L'effet de la longueur des éléments de parapets ainsi que l'effet des dimensions de la plaque de chargement seront ensuite étudiés respectivement aux Sections 3.6.2 et 3.6.3. L'effet de la continuité longitudinale sera traité à la Section 3.6.4.

3.6.1 Effet de l'excentricité du chargement

Des parapets de 2 m soumis à un chargement centré avaient été testés expérimentalement et modélisés lors de la Phase 1 du projet (Charron et al., 2013). L'expérience acquise et la littérature démontrent que la résistance d'un parapet est moindre lors d'un chargement excentré que lors d'un chargement centré (cf. Section 2.3). Afin d'évaluer cette perte de résistance sous chargement excentré, les parapets hybride et MTQ301 préfabriqué ont été modélisés selon les conditions expérimentales de la Phase 1 du projet (Charron et al., 2013). Cependant, cette fois, la charge a été appliquée à l'extrémité des parapets (Figure 3.25).

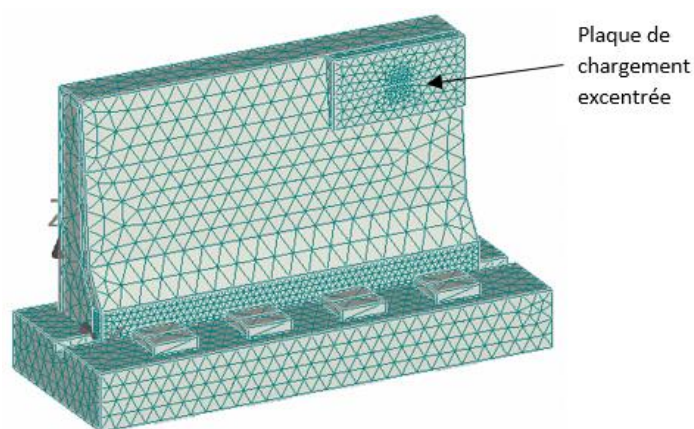


Figure 3.25 - Modèle du parapet hybride de 2 m sous chargement excentré

Le comportement mécanique des parapets sous un chargement centré et excentré est présenté à la Figure 3.26, ces résultats diffèrent de ceux présentés aux la Section 3.3 et 3.4 qui considérait des parapets de 4 m. Conformément aux données de la littérature, le fait d'appliquer la charge à l'extrémité d'un parapet de 2 m plutôt qu'en son centre a réduit sa capacité maximale. Cette réduction est de 24,5 % et de 28,4 % respectivement pour les parapets hybride et MTQ301 préfabriqué (Figure 3.26 et Tableau 3.11). Cette diminution est du même ordre de grandeur que celle observée par Patel (2008) sur un parapet préfabriqué de 3 m (réduction de 23 %). Les parapets hybride et MTQ301 préfabriqué de 2 m soumis à un chargement excentré présentent une capacité maximale moindre que la surcharge transversale pondérée de conception de 476 kN (illustrée en trait pointillé rouge sur la Figure 3.26).

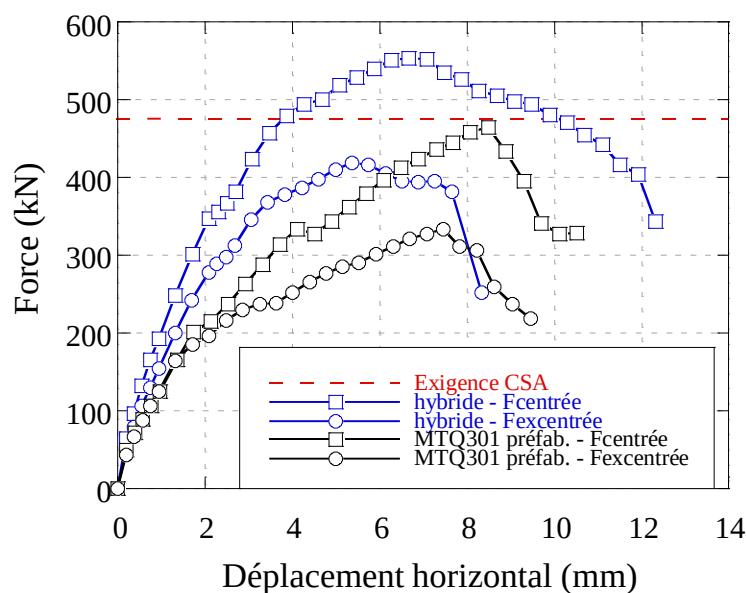


Figure 3.26 - Effet de l'excentricité de la charge sur les parapets hybride et MTQ 301 préfabriqué de 2 m

Tableau 3.11 - Diminution de la capacité maximale pour les parapets hybride et MTQ301 préfabriqué de 2 m dû à l'excentricité de la charge

Modèle de parapet et longueur	$F_{\max}$ centrée (kN)	$F_{\max}$ excentrée (kN)	Diminution $F_{\max}$ avec excentricité
Hybride 2 m	554	418	- 24.5 %
MTQ301 préfabriqué 2 m	465	333	- 28.4 %

Le patron de fissuration final obtenu sur le parapet hybride de 2 m chargé à son extrémité est comparé, à la Figure 3.27a) et b), à celui obtenu lors du chargement centré pour un même niveau de déplacement, de 8.3 mm. Seules les ouvertures de fissures (w) supérieures à 0.3 mm sont illustrées en traits noirs, plus l'ouverture de fissure est grande, plus la fissure est marquée par une couleur rouge vive. Alors que la rupture a plutôt lieu en flexion-cisaillement dans le cas du chargement centré (Figure 3.27a), la rupture a lieu en cisaillement autour de la plaque de chargement dans le cas du chargement excentré (Figure 3.27b). Il est à noter également que les barres d'armatures verticale du parapet plastifient lors du chargement centré avec une rupture en flexion-cisaillement, tandis qu'elles ne plastifient pas lors du chargement excentré avec rupture en cisaillement. Des modes de rupture similaires sont observés pour le parapet MTQ301 préfabriqué (Figure 3.27c et d).

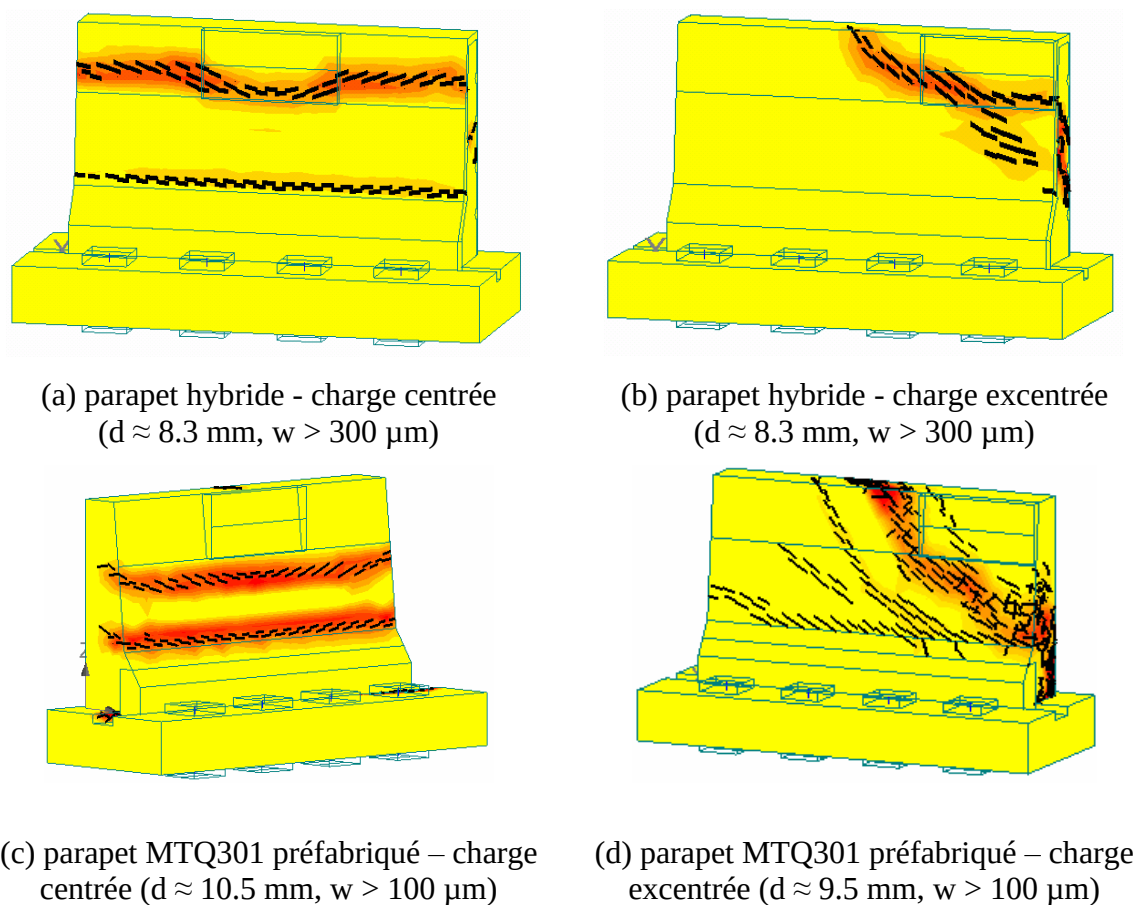


Figure 3.27 - Plans de rupture des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué de 2 m

Les modélisations numériques réalisées dans cette section confirment que d'appliquer un chargement excentré constitue le cas de chargement critique pour des parapets. Les résultats ont montrés une capacité maximale inférieure d'environ 25 % pour un chargement excentré par rapport à un chargement centré.

3.6.2 Effet de longueur du parapet

Tel que mentionné précédemment, les parapets testés expérimentalement lors de la Phase 1 du projet (Charron et al., 2013) avaient une longueur de 2 m. Les parapets préfabriqués installés sur les ponts ayant généralement une longueur de 4 m, une étude paramétrique a été réalisée afin d'évaluer la différence de comportement avec l'utilisation de parapets plus longs. Cette différence de comportement en fonction de la longueur du parapet a été étudiée pour des chargements centré et excentré. Les résultats pour le parapet hybride sont présentés aux Sections 3.6.2.1 et 3.6.2.2,

respectivement pour les chargements centré et excentré. Afin d'éviter la répétition, les résultats sont présentés seulement pour le parapet hybride, puisque ceux pour le parapet MTQ301 préfabriqués ont permis d'observer les mêmes tendances.

3.6.2.1 Parapet hybride sous chargement centré

Des parapets hybrides de 2, 3, 4 et 6 m ont été modélisés avec un chargement centré. Les courbes force versus déplacement horizontal du parapet à l'arrière de la charge sont présentées à la Figure 3.28 et les charges maximales obtenues sont résumées au Tableau 3.12. La capacité maximale du parapet augmente de manière significative avec l'augmentation de sa longueur (Tableau 3.12), jusqu'à environ 3 à 4 m et ensuite un allongement supplémentaire a peu d'influence significative sur la résistance du parapet (Figure 3.28 et Tableau 3.12). Cette longueur seuil de 3 à 4m s'explique par le fait qu'une augmentation supplémentaire de longueur n'induit pas de modification (forme et longueur) du plan de rupture (Figure 3.29). En dessous de ce seuil, la longueur du parapet est trop petite pour qu'il y ait formation du plan de rupture « complet » et le développement de la pleine capacité du parapet.

Pour un parapet de plus de 4 m pour lequel il n'y a plus d'augmentation significative de la charge maximale, la capacité maximale du parapet hybride est environ 65 % plus élevée que pour un parapet de 2 m, pour la même condition de chargement (type de chargement, plaque de chargement) (Tableau 3.12). Quelle que soit la longueur du parapet hybride (2, 3, 4 ou 6 m), la capacité maximale est supérieure à la charge pondérée de conception de 476 kN lors d'un chargement centré.

En ce qui concerne les contraintes dans les barres d'armatures, seule une barre d'armature du parapet hybride de 2 m chargé au centre atteint la plastification. Un carré rouge sur la Figure 3.28 illustre le moment de la plastification. Plus la longueur du parapet augmente, plus la contrainte maximale atteinte dans les barres d'armature diminue. Ceci s'explique pourquoi il n'y a aucun carré rouge d'illustré pour les parapets de plus de 2 m.

Tableau 3.12 - Augmentation de la capacité maximale du parapet hybride avec augmentation de sa longueur

Longueur du parapet	$F_{\max}$ centrée (kN)	Augmentation $F_{\max}$ vs $F_{\max}$ parapet 2m
2 m	554	-
3 m	799	+ 44.2 %
4 m	904	+ 63.2 %
6 m	926	+ 67.1 %

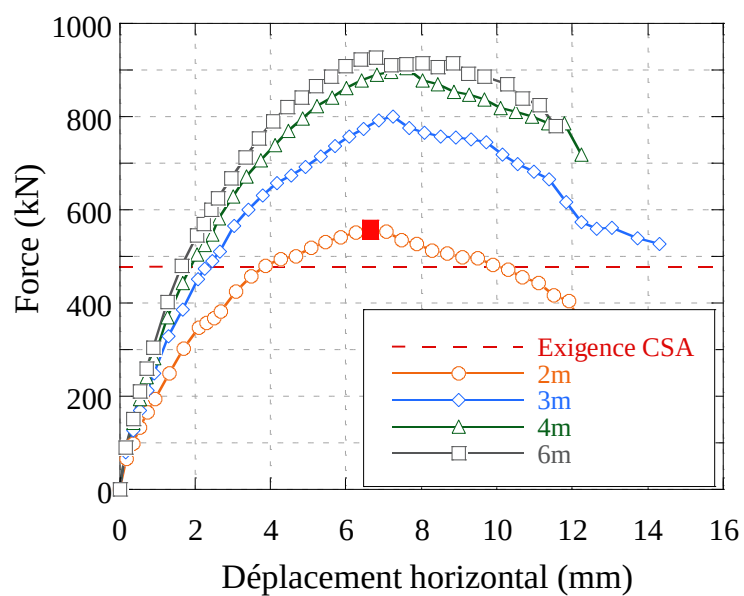


Figure 3.28 - Effet de la longueur du parapet hybride sous chargement centré sur le comportement mécanique

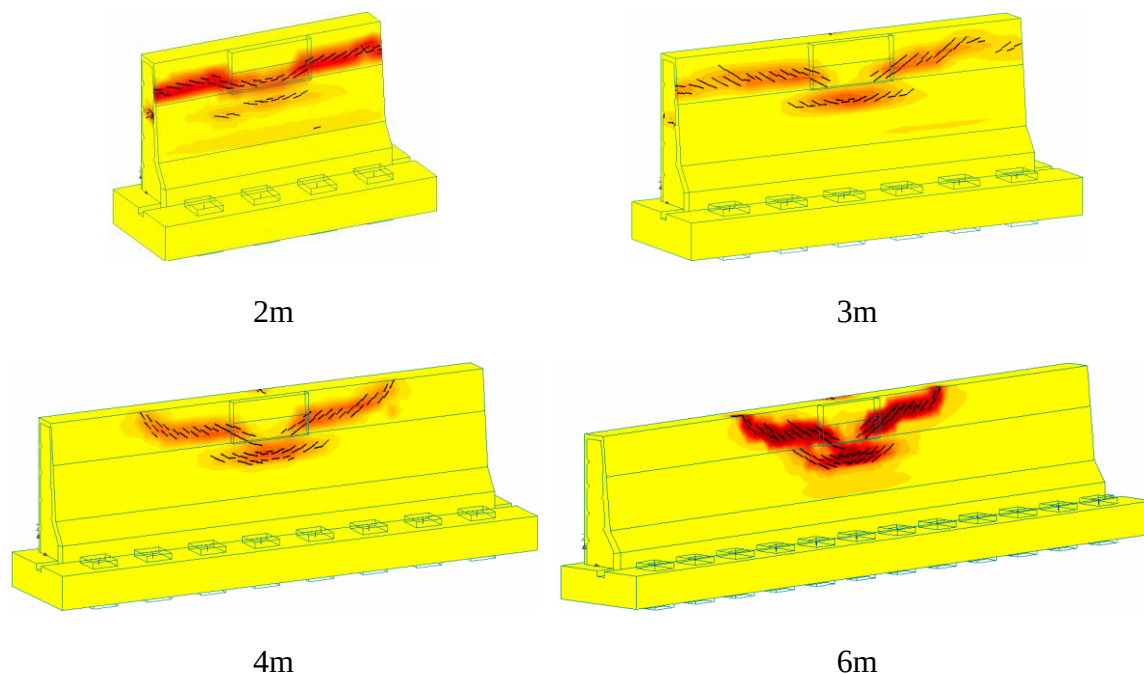


Figure 3.29 - Plans de rupture des parapets hybrides de 2, 3, 4 et 6 m, chargement centré
($d \approx 11.5$ mm, $w > 500$ μ m)

3.6.2.2 Parapet hybride sous chargement excentré

Contrairement au cas où la charge est appliquée au centre du parapet, la longueur du parapet hybride a très peu d'influence sur le comportement mécanique du parapet chargé à son extrémité (Figure 3.30) pour les longueurs testées de parapet de 2, 3 et 4 m. Ce résultat s'explique par le fait que le plan de rupture en cisaillement est similaire quelle que soit la longueur du parapet (Figure 3.31), à partir du moment où cette longueur est suffisante pour que ce plan de rupture puisse se développer. Ce résultat indique que, quelle que soit la longueur du parapet hybride soumis à un chargement excentré, la charge pondérée de conception de 476 kN n'est pas atteinte avec une plaque de chargement de 700 mm de longueur. Il est à noter que la plastification des barres n'est atteinte pour aucun des parapets hybrides (2, 3 ou 4 m) chargé à son extrémité.

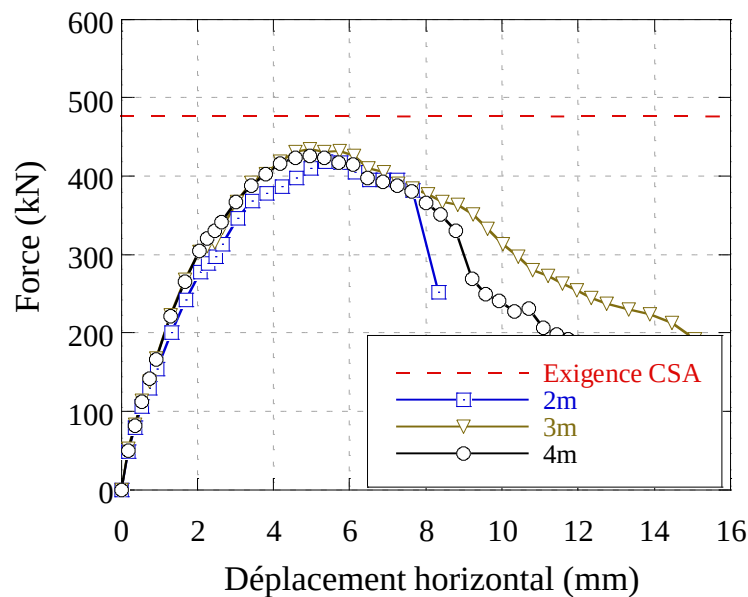


Figure 3.30 - Effet de la longueur du parapet hybride sous chargement excentrée sur son comportement mécanique

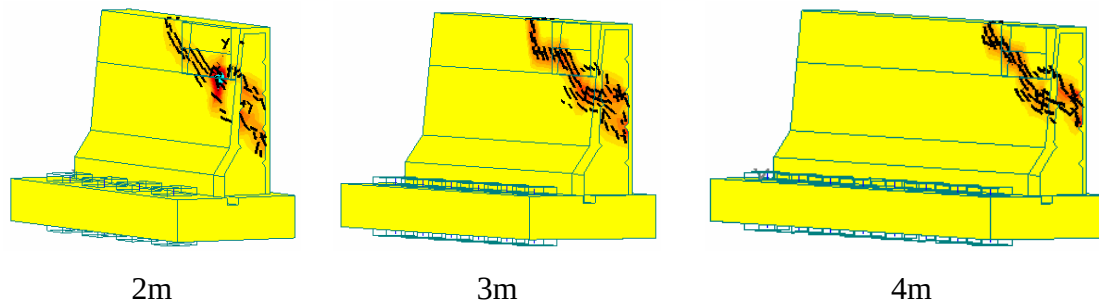


Figure 3.31 - Plans de rupture des parapets hybrides de 2, 3 et 4 m, chargés à leur extrémité ($F_{\text{post-pic}} \approx 250 \text{ kN}$, $w > 500 \mu\text{m}$)

Le Tableau 3.13 résume les capacités maximales obtenues sous chargements centré et excentré pour les différentes longueurs de parapet hybride testées. L'analyse des résultats indique que la réduction de la capacité maximale dans le cas d'une charge excentrée versus centrée est d'autant plus importante que la longueur du parapet augmente, et ce jusqu'à une longueur seuil d'environ 4 m (Tableau 3.13). Les diminutions de 24.5 % et 52.9 % obtenues respectivement pour les

parapets de 2 et 4 m sont cohérentes avec les données observées dans la littérature sur des parapets de longueurs similaires (Alberson et al., 2004; Ngan, 2008) et présentées à la Section 2.3.

Tableau 3.13 – Diminution de capacité maximale du parapet hybride de différentes longueurs due à l'excentricité de la charge

Longueur du parapet	F_{max} centrée (kN)	F_{max} excentrée (kN)	Diminution F_{max} avec excentricité
2 m	554	418	- 24.5 %
3 m	799	435	- 45.6 %
4 m	904	426	- 52.9 %

Cette étude paramétrique a démontré que le choix de longueur de 4 m des parapets préfabriqués leur permet de développer leur pleine capacité pour des chargements centré et excentré

3.6.3 Effet de la plaque de chargement

La Section 3.6.1 a mis en évidence un manque de capacité des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué sous chargement excentré, lorsque chargés avec la plaque de chargement (longueur = 700 mm, hauteur = 350 mm et épaisseur moyenne = 57 mm) utilisée lors des essais de laboratoire de la Phase 1 du projet (Charron et al., 2013). Tel que stipulé à la Section 2.1, la norme CSA-S6 (2014) indique que, pour un parapet TL-5, la charge doit être appliquée linéairement sur une longueur de 2400 mm, soit une longueur différente de celle utilisée lors des essais expérimentaux ou encore dans les modèles numériques présentés aux sections précédentes. Une étude numérique supplémentaire a alors été menée pour étudier l'influence de la plaque de chargement sur le comportement des parapets sous chargements centré et excentré. Étant donné la longueur de chargement requise dans le code (2.4 m), cette étude a été menée sur des parapets de 4 m de longueur.

Deux plaques de chargement pouvant être utilisées lors de la réalisation des essais ont été étudiées soit : la plaque de chargement de 2400 x 100 x 113 mm³ (L x l x emoy) utilisée aux Sections 3.3 à 0 afin de valider la conception des parapets selon les critères normatifs et la plaque de chargement 700 x 350 x 57 mm³ (L x l x emoy) utilisée lors des essais de la Phase 1 et dans les modélisations

présentées aux Sections 3.6.1 et 3.6.2. Afin de simplifier la nomenclature dans les tableaux et figures, la plaque de 2400 mm de longueur sera nommée L2400 et celle de 700 mm de longueur sera appelée L700.

La Figure 3.32 présente l'effet de la plaque de chargement sur le comportement mécanique des parapets et le Tableau 3.14 résume les capacités maximales. Ils illustrent une augmentation de la capacité maximale de 67 % et 84 % respectivement pour les parapets hybride et MTQ301 préfabriqué sous chargement excentré lorsque la longueur de la plaque de chargement augmente de 700 mm à 2400 mm. Ce résultat est expliqué par un allongement du plan de rupture avec la modification de la longueur de la plaque de chargement. L'allongement du plan de rupture fait participer d'avantage d'armature et un volume de béton plus important à la reprise d'effort, coïncidant à une hausse de la résistance. Le plan de rupture avec un chargement excentré sur 2.4 m ressemble davantage à celui observé dans le cas d'un chargement centré (flexion-cisaillement) que de la rupture en cisaillement observée lorsque le chargement excentré est appliqué sur 0.7 m (Figure 3.33).

Le fait d'appliquer le chargement excentré via la plaque de 2400 mm procure une capacité maximale aux parapets hybride et MTQ301 préfabriqué de 4 m largement supérieure à la charge pondérée de conception requise de 476 kN.

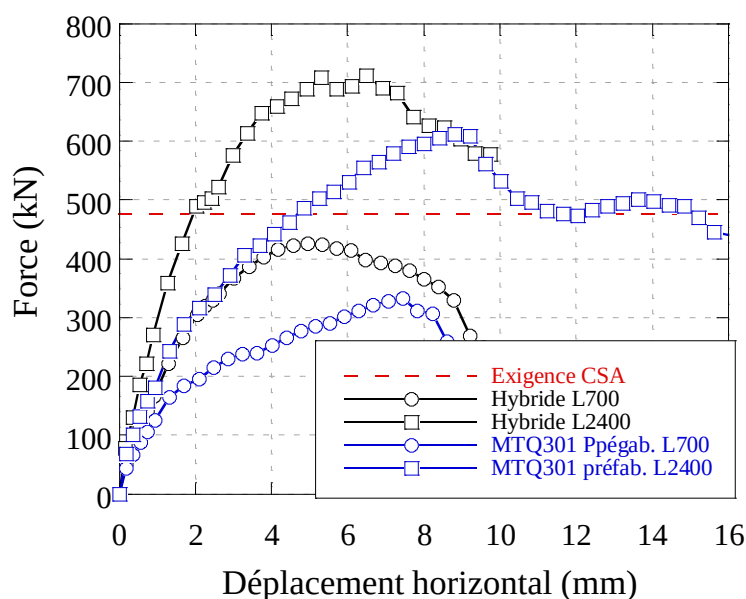
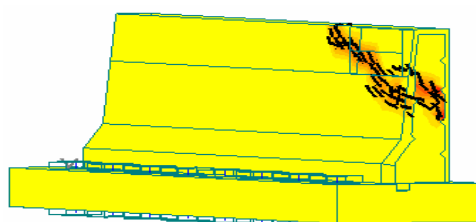


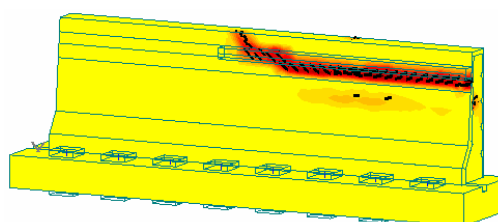
Figure 3.32 - Effet de la longueur de la plaque de chargement sur le comportement mécanique des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué sous chargement excentré

Tableau 3.14 - Effet de plaques sélectionnées sur la capacité maximale de parapets de 4 m sous chargement excentré

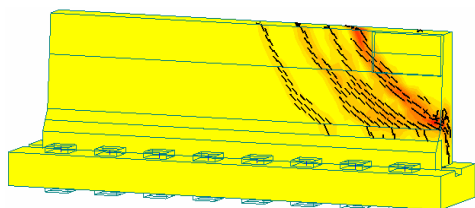
Modèle de parapet et longueur	$F_{\max}$ L700 (kN)	$F_{\max}$ L2400 (kN)	Augmentation $F_{\max}$ Avec L2400
Hybride 4 m	426	711	+ 67.0 %
MTQ301 préfabriqué 4 m	333	612	+ 83.8 %



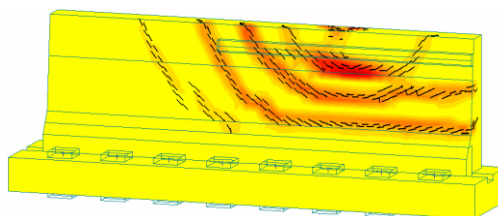
(a) Parapet hybride L700



(b) Parapet hybride L 2400



(c) Parapet MTQ301 préfabriqué L700



(d) Parapet MTQ301 préfabriqué L2400

Figure 3.33 - Effet des plaques chargement sélectionnées sur le plan de rupture de parapets de 4 m sous chargement excentré

La même procédure a cette fois été reprise pour un chargement centré. La Figure 3.34 et la Figure 3.35 montre respectivement l'impact de la plaque de chargement sur le comportement mécanique des parapets soumis à un chargement centré et les plans de rupture associés. Le Tableau 3.15 résume les capacités maximales. Les résultats, que ce soit en termes de courbe force déplacement transversal (Figure 3.34) ou de la capacité maximale (Tableau 3.15), montrent que l'utilisation d'une ou l'autre des plaques de chargement étudiées permet d'obtenir des capacités maximales similaires. Cela est expliqué par la similitude des plans de rupture entre le cas de chargement avec la plaque de 700 mm et celui avec la plaque de 2400 mm.

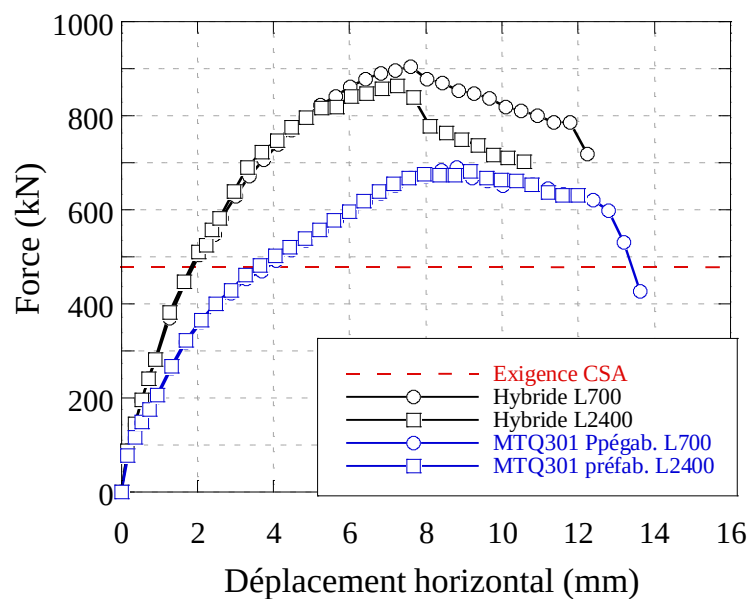


Figure 3.34 - Effet de la longueur de la plaque de chargement sur le comportement global des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué sous chargement centré

Tableau 3.15 - Effet de plaques sélectionnées sur la capacité maximale de parapets de 4 m sous chargement excentré

Modèle de parapet et longueur	$F_{\max \text{ L700}}$ (kN)	$F_{\max \text{ L2400}}$ (kN)	Augmentation $F_{\max}$ Avec L2400
Hybride 4 m	903	863	- 4.6 %
MTQ301 préfabriqué 4 m	688	681	- 1.0 %

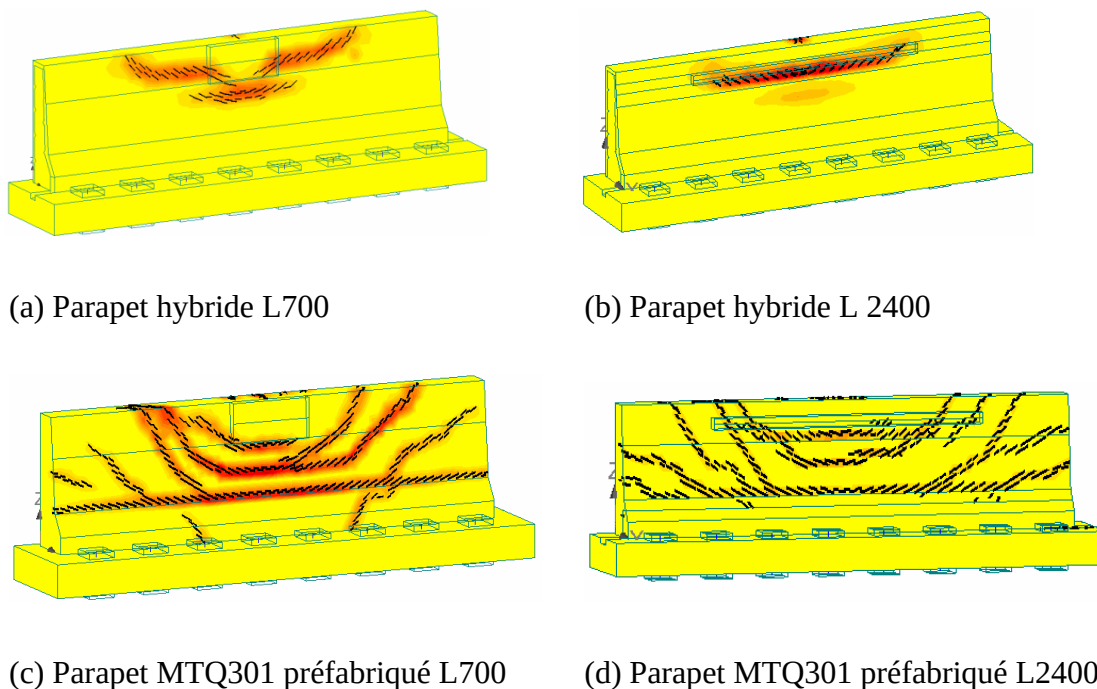


Figure 3.35 - Effet des plaques chargement sélectionnées sur le plan de rupture de parapets de 4 m sous chargement centré

En résumé, l'allongement de la plaque de chargement contribue surtout à augmenter la résistance maximale de parapets soumis à un chargement excentré. Lorsque la plaque de chargement normative est utilisée (2.4 m), les parapets hybride et MTQ301 préfabriqué surpassent les exigences de la norme CSA-S6.

3.6.4 Effet de la continuité

La revue de la littérature a révélé que la continuité longitudinale est un élément important à considérer pour les parapets préfabriqués. En effet, les chargements aux extrémités des parapets représentent le cas de chargement critique et qu'il est essentiel d'avoir un profil continu de redirection des véhicules en cas d'impact.

En pratique, pour des parapets coulés en place, il est d'usage de doubler les armatures sur une distance de 1 m à partir des extrémités pour augmenter la résistance lors d'un chargement à l'extrémité. Pour les concepts de parapets préfabriqués proposés, il a été décidé de ne pas doubler

les armatures à l'extrémité des parapets, puisque doubler les armatures sur 1 m à partir de chaque extrémité pour des éléments de 4 m reviendrait à doubler les armatures sur 50 % de la longueur du parapet. D'ailleurs, les modélisations présentées aux Sections 3.3 et 3.4 montrent que les parapets hybrides et MTQ301 préfabriqués de 4 m soumis à un chargement excentré selon les conditions de la norme (chargement appliqué par une plaque de 2400 mm) ont une capacité maximale suffisante. Malgré ça, une clé de connexion longitudinale peut être utilisée pour assurer la continuité du profil de redirection des véhicules et par la même occasion pour renforcer l'extrémité des parapets en transférant les efforts d'un élément à l'autre.

La revue de la littérature a démontré qu'une connexion de type coulée en place est plus adaptée pour des parapets préfabriqués puisqu'elle laisse suffisamment de marge de manœuvre pour permettre une mise en place efficace. Une clé de connexion longitudinale de géométrie rectangulaire (dimensions à la Figure 3.36), remplie d'un mortier fibré de 60 MPa a été considérée. Les propriétés du mortier sont décrites au Tableau 3.16 et ont été extraites des travaux de Namy (2012). Les dimensions de la clé ont aussi été déterminées à partir des dimensions utilisées dans les travaux de Namy (2012), sauf que dans ce cas la clé n'était pas rectangulaire, mais hexagonale. La clé carrée utilisée correspond à une version simplifiée qui reproduit un comportement similaire à la clé hexagonale (Namy, 2012). La clé de connexion est présente sur toute la hauteur du parapet. Des éléments solides 3D brick à 8 points d'intégration de dimension 20 mm ont été utilisés pour le maillage des clés de connexion longitudinale. Un raffinement de maillage a également été effectué sur les surfaces verticales de la clé de connexion.

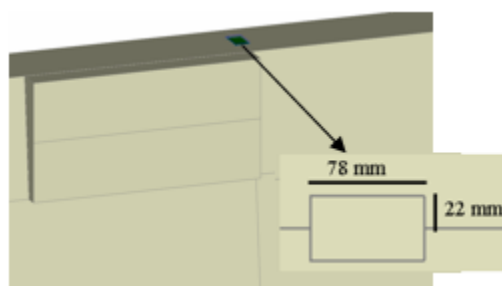
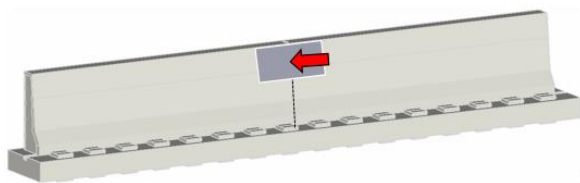


Figure 3.36 - Géométrie de la clé de connexion longitudinale modélisée

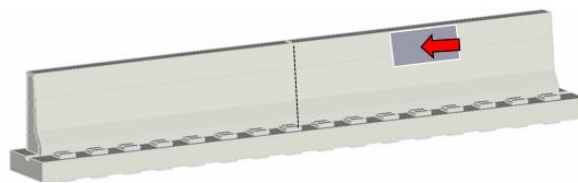
Tableau 3.16 - Propriétés du mortier utilisé dans les clés de connexion longitudinale

Propriétés	Mortier fibré
Module élastique E_c (MPa)	26100
Résistance à la traction f_t (MPa)	2.4
Résistance à la compression f'_c (MPa)	60.4
Quantité de fibres (% vol.)	1 %
Taille caractéristique en traction L_{ch}^t (mm)	25
Déformation de la localisation $\varepsilon_t^{loc}(-)$	226×10^{-6}

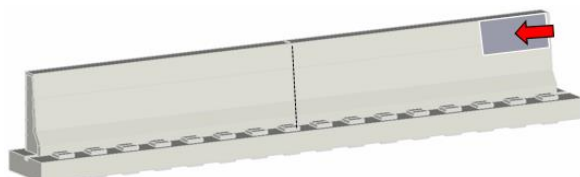
Le comportement de 2 parapets adjacents connectés longitudinalement par la clé rectangulaire présentée à la Figure 3.36 a été étudié pour plusieurs cas de chargement représentés à la Figure 3.37, soient un chargement au centre des deux parapets (Cas A), un chargement au centre d'un des deux parapets (Cas B), un chargement sur l'extrémité non connectée d'un des deux parapets (Cas C) et un chargement sur l'extrémité connectée d'un des deux parapets (Cas D). De plus deux plaque de chargement ont été utilisées dans cette étude soit : la plaque de 700 x 350 x 57 mm (L700) et la plaque de 2400 x 100 x 113 mm (L2400). Ces modèles ont été réalisés pour plusieurs configurations d'essais, soient : 2 parapets de 2 m avec la plaque de chargement L700 (configuration 1), 2 parapets de 4 m avec la plaque de chargement L700 (configuration 2) et 2 parapets de 4 m avec la plaque de chargement L2400 (configuration 3). La configuration 1 représente les conditions expérimentales de la Phase 1 du projet, la configuration 2 représente une condition d'essai possible pour les essais expérimentaux de ce projet et la configuration 3 représente les conditions de chargement prescrites par la norme CSAS6.



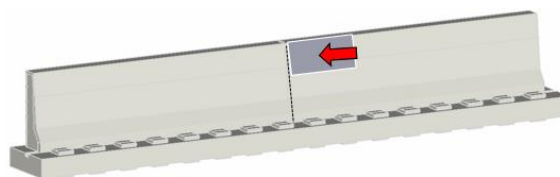
Cas A : Chargement centre des 2 parapets



Cas B : Chargement centre de 1 des 2 parapets



Cas C : Chargement extrémité non connectée



Cas D : Chargement extrémité connectée

Figure 3.37 - Cas de chargement étudiés pour les parapets connectés longitudinalement

3.6.4.1 Parapet hybride

Les courbes force-déplacement, pour l'ensemble des cas de chargement testés (cas A à D) sont regroupées aux Figure 3.38, Figure 3.39 et Figure 3.40, respectivement pour les configurations d'essais 1, 2 et 3. Ces courbes sont comparées au comportement du même parapet non connecté longitudinalement. Ensuite, les charges maximales obtenues pour chacun des cas de chargement et chacune des configurations d'essai mentionnées ci-dessus (longueur de parapet et dimensions de la plaque de chargement) sont résumées au Tableau 3.17,

La Figure 3.38, la Figure 3.39 et la Figure 3.40 illustrent le fait que les variations de capacités maximales atteintes entre les cas A, B, C et D de chargement varient en fonction de la configuration d'essai considérée, excepté que la capacité maximale la plus faible est toujours atteinte pour le chargement excentré sur le côté non connecté du parapet (Cas C). Les courbes pointillées sur ces figures permettent en plus d'illustrer le comportement des parapets sous les mêmes cas de chargement (A, B, C et D), mais en l'absence de la clé de connexion longitudinale. Ceci permet de visualiser le moment où la clé de cisaillement intervient mécaniquement (séparation des courbes pleines et pointillées, respectivement avec et sans clé de connexion longitudinale). Excepté pour les cas B, C et D de la configuration 1 (parapets de 2m avec plaque L700, Figure 3.38) ainsi que

pour le cas D de la configuration 2 (parapets de 4m avec plaque L700, Figure 3.39) pour laquelle la clé entre en action avant la charge transversale pondérée de conception de 476 kN, la clé n'intervient mécaniquement que tard dans le chargement, soit pour une charge largement supérieure à la charge pondérée de conception.

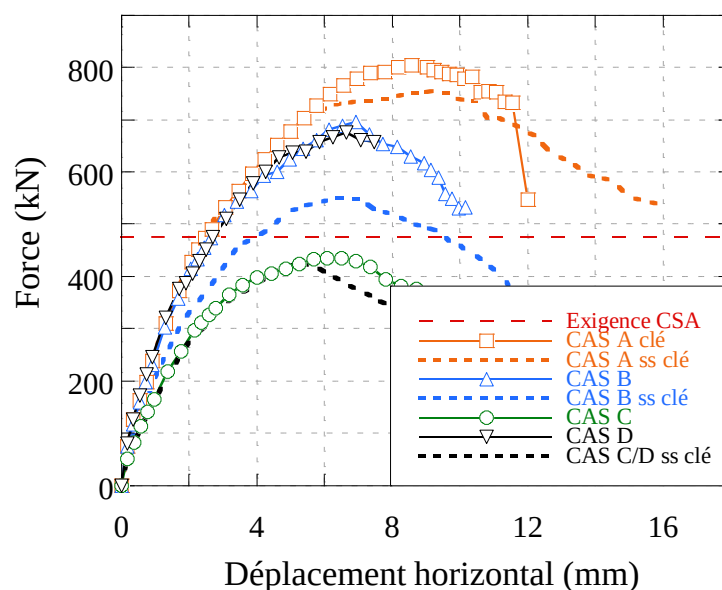


Figure 3.38 - Comportement de 2 parapets de 2 m et plaque L700 en présence de la clé de connexion longitudinale (configuration 1)

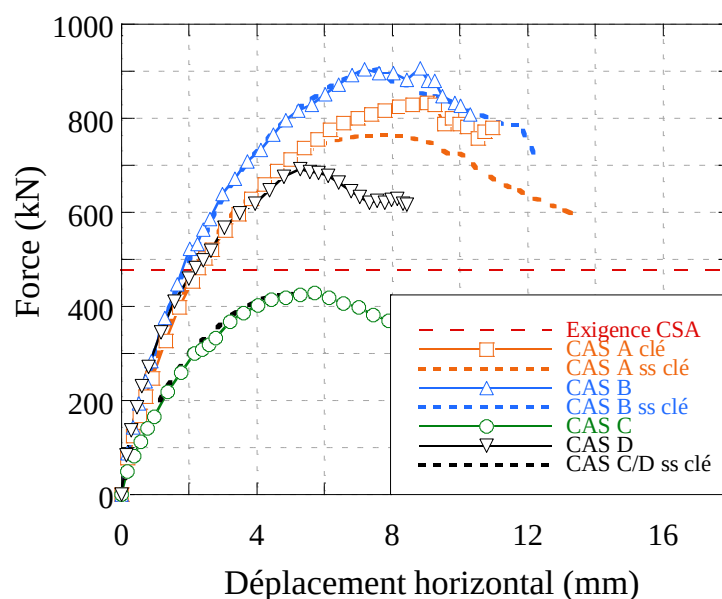


Figure 3.39 - Comportement de 2 parapets de 4 m et plaque L700 en présence de la clé de connexion longitudinale (configuration 2)

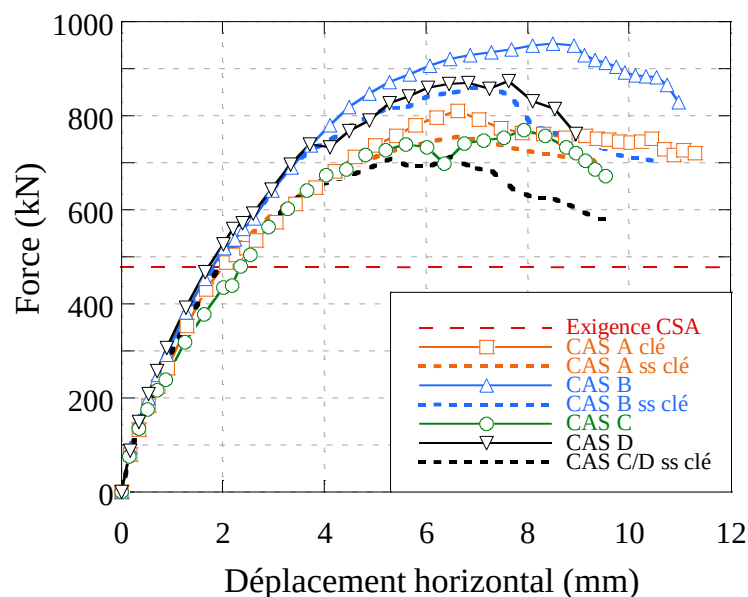


Figure 3.40 - Comportement de 2 parapets de 4 m et plaque L2400 en présence de la clé de connexion longitudinale (configuration 3)

Ainsi, pour l'ensemble des cas de chargement (A, B, C et D) de la configuration 3 (Figure 3.40), qui représente les conditions normatives, l'impact de la clé de connexion longitudinale reste négligeable pour une force inférieure à la charge transversale pondérée de conception de 476 kN et la capacité du parapet hybride est adéquate sans avoir besoin de la clé de connexion. En ce sens, la clé de connexion longitudinale ne serait pas requise pour assurer un comportement mécanique adéquat du parapet hybride sous tous types (centré ou excentré) de chargement.

Des considérations au niveau de la continuité du profil du parapet ou encore au niveau du comportement du parapet sous sollicitation exceptionnelle venant de l'arrière du parapet pourraient cependant amener à opter pour une telle connexion, étant donné qu'il n'y a pas d'armatures connectant le parapet préfabriqué à la dalle en arrière du parapet.

En ce qui concerne la continuité du profil du parapet, il faut noter que le déplacement horizontal du parapets pour l'application de la charge en condition de service (surcharge transversale de service de 357 kN) est au maximum de 3.1 mm (pour les configurations 1 et 2, Figure 3.38 et Figure 3.39), soit dans le même ordre de grandeur que la tolérance d'installation des parapets préfabriqués. De plus, à l'exception du cas de chargement D (à l'extrémité connectée du parapet),

le déplacement horizontal est similaire que le parapet soit connecté longitudinalement ou non étant donné que la clé de connexion n'est pas encore active à ce stade du chargement pour les autres cas de chargement (Figure 3.38, Figure 3.39 et Figure 3.40). En considérant les informations ci-dessus, la clé de connexion longitudinale n'aurait donc pas un très grand intérêt pour la continuité du profil des parapets et serait donc utile seulement pour le cas où il y aurait un chargement appliqué à l'arrière du parapet. En plus de l'analyse des courbes de comportement mécanique, le Tableau 3.17 regroupe les capacités maximales pour chacun des cas de chargement à l'étude.

Tableau 3.17 - Effet de la connexion longitudinale sur la capacité maximale des parapets hybrides

	Plaque chargement expérimentale L700						Plaque chargement expérimentale L2400		
	Configuration 1			Configuration 2			Configuration 3		
	2x2m non connecté	2x2m connecté	$\Delta F_{\max}$ avec connexion	2x4m non connecté	2x4m connecté	$\Delta F_{\max}$ avec connexion	2x4m non connecté	2x4m connecté	$\Delta F_{\max}$ avec connexion
Cas A	742 kN	805 kN	+ 8.5 %	763 kN	832 kN	+ 9.0 %	754 kN	809 kN	+ 7.3 %
Cas B	561 kN	687 kN	+ 22.4 %	904 kN	906 kN	+ 0.2 %	862 kN	953 kN	+ 10.6 %
Cas C	418 kN	435 kN	+ 4.0 %	426 kN	428 kN	+ 0.5 %	711 kN	769 kN	+ 8.2 %
Cas D	418 kN	676 kN	+ 61.7 %	426 kN	692 kN	+ 62.4 %	711 kN	874 kN	+ 22.9 %
$\Delta F_{\max}$ cas D vs cas C		+ 55.4 %			+ 61.7 %			+ 13.7 %	

L'analyse du Tableau 3.17 mènent aux conclusions suivantes.

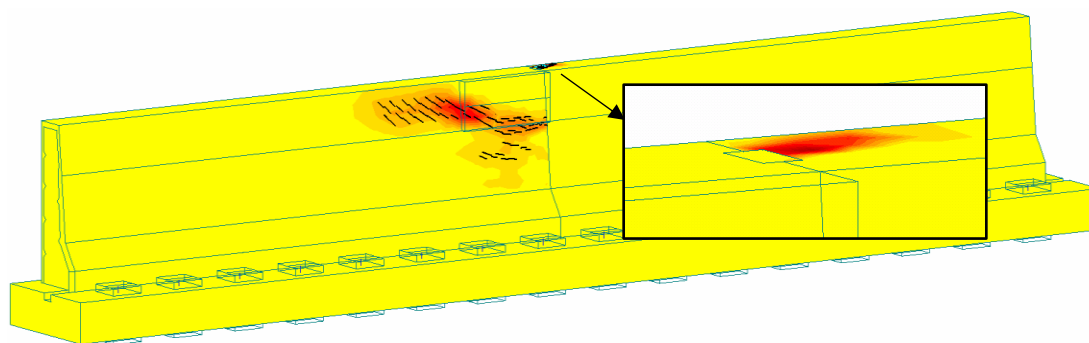
- Pour le cas A de chargement (au centre des 2 parapets), la présence de la clé de connexion longitudinale induit une faible augmentation (entre 7 et 9 %) de la capacité maximale.
- Pour le cas B de chargement (au centre de l'un des 2 parapets), plus le point d'application de la charge (au centre de la plaque de chargement) est proche de la clé de connexion et plus la capacité maximale du parapet augmente. Le plus gros impact de la clé de cisaillement ($\Delta F_{\max}$ de + 22.4 %) est en effet obtenu pour la configuration d'essai 1 pour laquelle le point d'application de la charge se situe à 1 m de la clé de cisaillement. Lorsque le parapet a une longueur de 4 m et donc que le chargement est appliqué à 2 m de la clé de cisaillement, l'impact de la longueur diminue pour devenir nul ($\Delta F_{\max}$ de + 0.2 %) pour la plaque de 700 mm

de longueur et est légèrement plus important ($\Delta F_{\max}$ de + 10.6 %) pour la plaque de 2400 mm. Ce plus gros impact de la clé de cisaillement en présence de la plaque de 2400 mm versus celle de 700 mm s'explique par le fait que la sollicitation du parapet s'étend sur une zone plus près de la connexion avec la plaque de 2400 mm qu'avec celle de 700 mm.

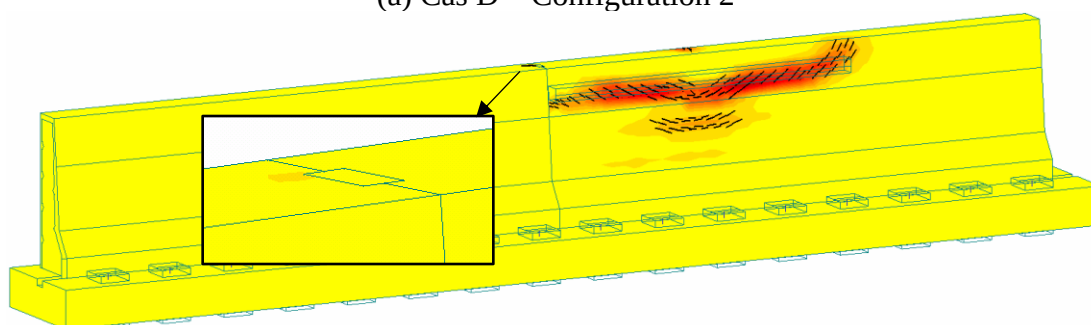
- Pour le cas C de chargement (à l'extrémité non connectée du parapet), la présence de la clé de connexion longitudinale induit une faible augmentation (entre 0 et 8 %) de la capacité maximale. L'application de la charge étant plus éloignée que dans le cas B de chargement (au centre d'un des 2 parapets), il est logique d'observer une influence plus faible de la clé de cisaillement que dans le cas B de chargement. De la même manière qu'expliqué pour le cas B de chargement, l'influence de la clé de connexion longitudinale augmente lorsque l'application de l'effort s'approche de la clé de cisaillement.
- Pour le cas D de chargement (à l'extrémité connectée du parapet), l'influence de la clé de connexion longitudinale est beaucoup plus marquée avec des augmentations de la capacité maximale comprises entre 23 % et 62 % par rapport à la charge maximale obtenue lors d'un chargement excentré d'un parapet non connecté. Ces augmentations sont comprises entre 14 % et 62 % lorsque la capacité maximale est comparée à celle obtenue pour un parapet connecté d'un côté mais chargé à son extrémité non connectée (cas C de chargement). Étant donné que le comportement global sous chargement excentré du parapet hybride via la plaque de chargement de 700 mm est similaire pour les parapets de 2 et 4 m de longueur (cf. Section 3.6.1), il est logique d'observer un effet assez similaire (augmentation de la capacité maximale d'environ 62 %) de la connexion longitudinale pour les configurations d'essai 1 et 2. L'impact de la connexion est la plus faible ($\Delta F_{\max}$ de + 23 %) pour la configuration 3 (plaque de 2400 mm). Ceci s'explique par le fait que le comportement d'un parapet non connecté sous chargement excentré avec une plaque de chargement de 2400 mm est plus proche de la capacité maximale que peut développer le parapet lors d'un chargement centré que lorsque le chargement excentré est appliqué sur 700 mm de longueur (Figure 3.41).

En ce qui concerne la fissuration observée numériquement sur les parapets pour le cas D de chargement, les constatations suivantes peuvent être faites.

- Le plan de fissuration à l'avant du parapet chargé est globalement similaire à celui observé lors du chargement du même parapet non connecté dans les mêmes configurations (longueurs du parapet et de la plaque de chargement) (Figure 3.41).
- La clé de connexion longitudinale permet d'augmenter la capacité maximale du parapet chargé en transmettant une partie des efforts dans le parapet adjacent jusqu'à atteindre une rupture en cisaillement en arrière de la clé (cf. zoom à la Figure 3.41).
- La proportion d'effort à reprendre par la clé et le parapet adjacent étant moindre dans la configuration d'essai 3 (plaque de 2400 mm) tel qu'expliqué dans le paragraphe ci-dessus, l'endommagement en cisaillement en arrière de la clé, dans le parapet adjacent au parapet chargé, est logiquement moindre pour cette configuration (Figure 3.41b, ouverture moindre caractérisée par un rouge moins vif).



(a) Cas D – Configuration 2



(b) Cas D – Configuration 3

Figure 3.41 - Comparaison fissuration Cas D de chargement, pour les configurations d'essai 2 et 3 ($d \approx 8$ mm, $w > 200$ μ m)

3.6.4.2 Parapet MTQ301 préfabriqué

Les Figure 3.42, Figure 3.43 et Figure 3.44 illustrent le comportement du parapet MTQ301 préfabriqué pour un chargement appliqué à l'extrémité connectée d'un des deux parapets (Cas D à la Section 3.6.4) sous les 3 mêmes configurations de plaque de chargement que pour le parapet hybride. Seul le Cas D de chargement a été considéré dans cette étude étant donné qu'il a été montré qu'il s'agit du cas pour lequel la connexion longitudinale a le plus d'impact.

Globalement, la clé de connexion longitudinale a permis d'augmenter la capacité maximale du parapet par rapport au cas où le même parapet, mais cette fois non connecté, est chargé à son extrémité. Tout comme pour les parapets hybrides, la rupture se caractérise par une rupture en cisaillement à l'arrière de la connexion du côté du parapet adjacent non chargé causée par le fait que le parapet chargé vient s'appuyer sur le parapet voisin par l'entremise de la clé de connexion. Dans le cas du parapet MTQ301 préfabriqué, l'augmentation de la capacité maximale pour le Cas D de chargement versus le même parapet chargé à son extrémité est de 25.4 %, 38.6 % et 12.9 %, respectivement pour les configurations 1, 2 et 3 de chargement. Ces augmentations sont moindres que celles observées avec le parapet hybride (augmentations entre 23 et 62 %). Ceci peut s'expliquer par la coque en BFUP du parapet hybride qui, dans ce cas, agit comme un renforcement à l'endroit de la rupture en cisaillement.

Tous les cas de chargements (avec ou sans clé) effectués sur des parapets MTQ301 préfabriqués de 2 ou 4 m avec la plaque de chargement L700 n'atteignent pas la surcharge pondérée de conception de 476 kN exigée par la norme CSA-S6 (2014), bien que la capacité maximale des deux parapets de 4 m en soit très proche (Figure 3.43). Cette charge de 476 kN est cependant largement dépassée en présence de la plaque L2400 exigée dans le Code des ponts qu'il y ait ou non présence de la clé de connexion longitudinale (Figure 3.44). L'impact de la clé est moins prononcé pour le cas de chargement via la plaque de 2400 mm (Figure 3.44). Comme pour le parapet hybride, la clé est dans ce cas moins sollicitée étant donné que le point central d'application de la charge est plus loin de l'extrémité du parapet et donc que la clé et le parapet adjacent à celui chargé reprennent une moins grande portion des efforts que pour les autres configurations d'essai.

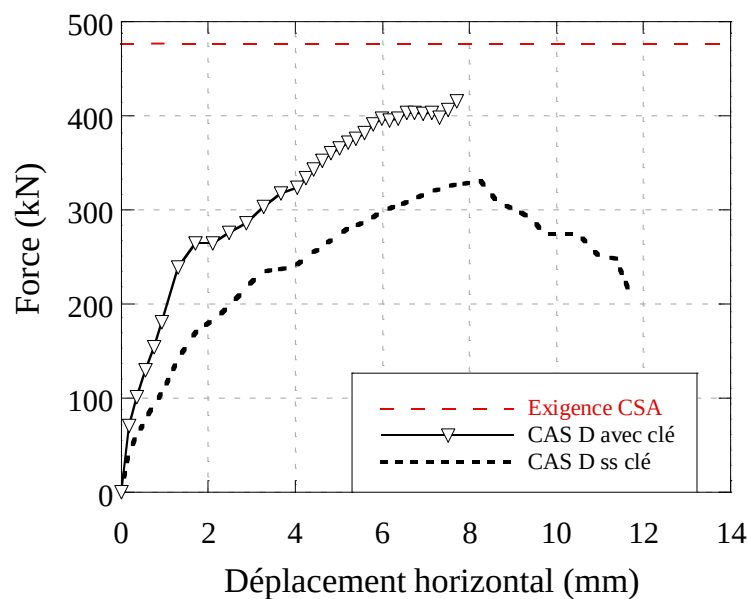


Figure 3.42 - Comportement de 2 parapets de 2 m chargés par plaque L700 en présence de la clé de cisaillement rectangulaire (configuration 1)

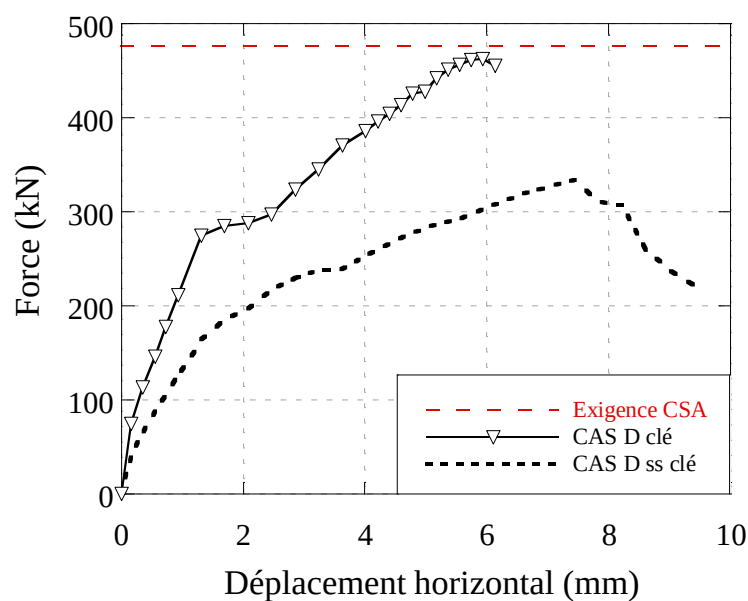


Figure 3.43 - Comportement de 2 parapets de 4 m chargés par la plaque L700 en présence de la clé de cisaillement rectangulaire (configuration 2)

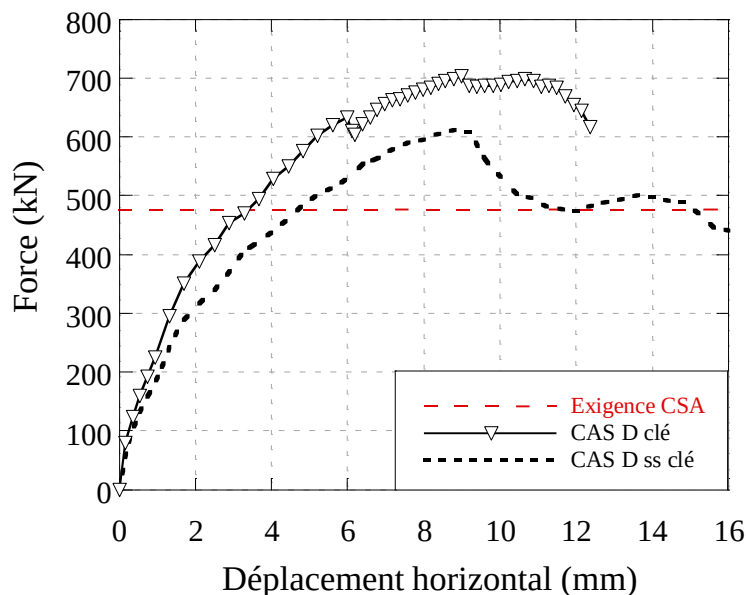


Figure 3.44 - Comportement de 2 parapets de 4 m chargés par la plaque L2400 en présence de la clé de cisaillement rectangulaire (configuration 3)

En résumé, l'effet d'une continuité longitudinale de type coulée en place, a été évalué selon une multitude de points d'application de la charge (cas A à D), pour différentes configurations de plaque de chargement (configurations 1 à 3) pour les parapets hybride et MTQ301 préfabriqué. Il a été montré que l'effet de la clé permet principalement d'augmenter la capacité maximale des parapets pour un chargement excentré (cas D) et lorsque la plaque de chargement L700 est utilisée. Selon les conditions normatives (configuration 3), la capacité maximale de parapets non-connectés surpasse la charge pondérée de conception pour tous les cas de chargement évalués (avec et sans connexion) et les parapets sont assez rigides pour assurer un profil continu de redirection de véhicules. En ce sens, l'utilisation d'une continuité longitudinale ne serait pas requise.

3.6.5 Synthèse

L'étude paramétrique réalisée numériquement sur les parapets hybride et MTQ301 préfabriqué a permis de mettre en évidence l'influence de l'excentricité de la charge, de la longueur du parapet, des dimensions de la plaque de chargement ainsi que de la présence d'une clé de cisaillement longitudinale sur le comportement des parapets (comportement force-déplacement, capacité maximale, plans de fissuration, contraintes dans les barres d'armatures). Le parapet hybride et le

parapet MTQ301 préfabriqué ont montré les mêmes tendances sous l'influence d'un même paramètre. Ces tendances sont résumées ci-dessous.

En présence d'un chargement centré sur un parapet seul, il est observé que :

- la capacité maximale du parapet augmente avec l'augmentation de sa longueur jusqu'à atteindre une longueur seuil à partir de laquelle il n'y a plus d'augmentation significative de la capacité maximale;
- les deux plaques sélectionnées pour une utilisation potentielle au laboratoire (de dimensions $700 \times 350 \times 57 \text{ mm}^3$ et $2400 \times 100 \times 113 \text{ mm}^3$) ont résulté en une capacité maximale du parapet très similaire ;
- pour toutes les configurations testées, la charge pondérée de conception de 476 kN est atteinte.

En présence d'un chargement excentré sur un parapet seul, il est observé que :

- la capacité maximale du parapet n'est pas influencée par une modification de sa longueur (testé pour des parapets de longueur supérieure à 2 m);
- lorsque le parapet est chargé via une plaque de chargement de $700 \times 350 \times 57 \text{ mm}$ telle qu'utilisée expérimentalement, la charge pondérée de conception de 476 kN n'est pas atteinte;
- pour ce qui concerne les deux plaques sélectionnées pour une utilisation potentielle au laboratoire ($700 \times 350 \times 57 \text{ mm}$ et $2400 \times 100 \times 113 \text{ mm}$), l'effet de la longueur prime. Plus la plaque est longue, plus le plan de rupture est long et fait intervenir d'avantage d'armatures et un plus grand volume de béton à la reprise de l'effort. Ce qui résulte que la capacité maximale est significativement plus importante avec l'utilisation de la plaque de 2400 mm de longueur, soit la longueur requise dans le code S6 (CSA, 2014), qu'avec la plaque de 700 mm.
- lorsque le parapet est chargé via une plaque de chargement de $2400 \times 100 \times 113 \text{ mm}$, la charge pondérée de conception de 476 kN est largement atteinte.

En présence d'une clé de connexion longitudinale entre 2 parapets, il est observé que:

- la clé de connexion longitudinale a une faible influence sur la capacité maximale du parapet sous chargement au centre des deux parapets (Cas A), au centre d'un des deux parapets (Cas B) ou encore à l'extrémité non connectée du parapet (Cas C), elle a cependant une influence plus marquée sur la capacité maximale du parapet sous chargement à l'extrémité connectée du parapet (Cas D);
- pour l'ensemble des cas de chargement A, B, C et D appliqués via la plaque de chargement de 2400 mm, l'impact de la clé de connexion longitudinale reste négligeable en dessous de la charge transversale pondérée de conception de 476 kN et la capacité maximale du parapet hybride est largement supérieure à la charge transversale pondérée de conception de 476 kN sans avoir besoin de la clé de connexion;
- le déplacement du parapet en arrière de la charge étant de l'ordre de grandeur de la tolérance d'installation des parapets préfabriqués, la clé n'aurait pas de grand intérêt pour un contrôle du profil des parapets. Néanmoins, la clé pourrait avoir son utilité lors d'un chargement « exceptionnel » appliqué en arrière du parapet préfabriqué qui ne dispose pas d'ancrage à la dalle sur sa face arrière.

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

En plus des études numériques réalisées et présentées aux sections précédentes, ce projet comprend la réalisation d'essais en laboratoire sur des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué à taille réelle. Ce Chapitre 4 présente le programme expérimental retenu.

Comme les objectifs de ce projet sont d'étudier les effets de la longueur du parapet, de l'excentricité de la charge et de la continuité des parapets, une multitude de configurations d'essai pourraient être testées. Cependant, seuls quelques spécimens pouvaient être fabriqués pour être ensuite testés au laboratoire de structures de Polytechnique Montréal. Il fallait donc faire un choix sur les configurations d'essai les plus intéressantes à tester, notamment en se basant sur les résultats de l'étude paramétrique numérique effectuée pour évaluer les effets des paramètres structuraux (longueur, excentricité, plaque de chargement, continuité) sur le comportement des parapets étudiés dans ce projet (Section 3.6).

Dans ce Chapitre, les résultats de l'étude paramétrique préliminaire permettront en premier lieu de définir les configurations d'essais à tester (Section 4.1). Ensuite, la procédure de fabrication des spécimens d'essai sera présentée à la Section 4.2 et le montage expérimental à la Section 4.3. Finalement, l'instrumentation choisie pour les essais ainsi que le protocole de chargement des parapets seront respectivement détaillés aux Sections 4.4 et 4.5.

4.1 Configurations d'essai sélectionnées

4.1.1 Généralités

Les études numériques présentées à la Section 3.6 ont démontré la grande combinaison d'essais possibles en laboratoire :

- pour les essais sur un parapet seul, les paramètres pouvant varier sont : le type de parapet (MTQ301, parapet hybride ou MTQ301 préfabriqué), la position d'application de la charge (au centre ou à l'extrémité), la longueur des parapets (2 m ou 4 m) et la plaque de chargement (700 mm ou 2400 mm);
- pour les essais sur des parapets connectés longitudinalement, les paramètres pouvant varier sont : le type de parapet (MTQ301, parapet hybride ou MTQ301 préfabriqué), la longueur

des parapets (2 x 2 m ou 2 x 4 m), la position d'application de la charge (Cas A à D décrit à la Section 3.6.4) et la plaque de chargement (700 mm ou 2400 mm).

Les parapets étant testés à taille réelle, leur fabrication représente un coût conséquent dû à l'aspect non standard de ces parapets (géométrie non conventionnelle avec le concept hybride et la niche de connexion en BFUP), à la présence des dalles sous les parapets (éléments avec beaucoup d'armatures), au transport des éléments de l'usine vers le laboratoire et au montage complexe pour les tester au laboratoire. Le nombre de parapets doit donc être limité. Les conditions qui seront testées devraient permettre de valider les modèles numériques décrits au Chapitre 3. Ainsi, une fois les modèles numériques validés par les conditions expérimentales testées, les autres conditions qui ne pourront pas être testées au laboratoire pourront être étudiées numériquement avec un bon niveau de confiance.

La Phase 1 du projet de recherche avec le MTQ (Charron et al., 2013) a déjà permis de tester en laboratoire le parapet hybride préfabriqué et le parapet MTQ301 coulé en place sous chargement centré et de valider les modèles numériques correspondants. Les parapets n'ont pas encore été testés avec un chargement excentré, cas de chargement qui s'avère être le plus critique pour les parapets (capacité moindre avec une rupture en cisaillement). En ce qui concerne l'étude de la connexion longitudinale, les résultats numériques présentés aux Sections 3.6.4.1 et 3.6.4.2 ont montré qu'une telle connexion, n'est pas requise pour atteindre la surcharge de la norme lorsque les parapets sont soumis à des chargements centré et excentré, mais apporte tout de même une capacité structurale supplémentaire sous un chargement excentré. Il serait pertinent d'évaluer en laboratoire ce gain de résistance.

Un autre élément à considérer dans le choix des conditions d'essai est la disponibilité au laboratoire de la plaque de chargement de 700 mm utilisée par le passé. Cette plaque pourrait donc facilement être réutilisée pour ce projet. La plaque de chargement normative de 2400 mm devrait être achetée et le montage expérimental modifié pour son utilisation.

4.1.2 Choix des conditions d'essai

Étant donné les considérations énumérées à la Section 4.1.1, il est plus pertinent de tester le comportement des parapets sous chargement excentré, car ceci n'a jamais été fait sur des parapets préfabriqués avec connexion à la dalle de pont de type béton armé. Considérant le fait que la

longueur des parapets n'a pas d'influence significative sur le comportement du parapet sous chargement excentré (cf. Sections 3.6.2.2), des parapets de 2 m sont préférables à ceux de 4 m afin de maximiser le nombre d'essais pouvant être réalisés avec le budget disponible. Dans ce cas, la plaque de chargement doit être celle de 700 mm, puisque la plaque de 2400 mm (longueur prescrite dans la norme CSA S6 (CSA, 2014) est trop longue pour le parapet de 2 m. Ces configurations s'écartent des conditions de chantier (parapets de 4 m) et normatives (plaque de 2400 mm). Les modèles numériques développés au Chapitre 3 seront validés à l'aide des résultats de laboratoire sur parapet de 2 m avec une plaque de chargement de 700 mm. Ensuite, ils seront utilisés pour vérifier numériquement la performance mécanique des parapets de 4 m avec la plaque de chargement de 2400 mm selon la norme CSA S6 (2014) et valider que la capacité du parapet est bien adéquate par rapport à la charge de conception de 476 kN requise par la norme.

Concernant les types de parapets à étudier, le parapet MTQ301 coulé en place à moins d'intérêt que les deux parapets préfabriqués développés (hybride et MTQ301 préfabriqué), puisqu'il est déjà bien connu et utilisé par le MTQ. De plus, il s'agit d'un parapet continu qui présente moins de problématique de comportement sous chargement excentré, excepté en début et fin « lignes » de parapets. En revanche, le parapet hybride et le parapet MTQ301 préfabriqué doivent tous deux être testés pour démontrer leur performance et permettre leur utilisation dans le futur.

En somme, le programme doit permettre de tester les deux parapets préfabriqués avec charge et le renforcement procuré par une connexion longitudinale. En fonction des coûts prévus pour la fabrication des spécimens, trois essais sont proposés:

1. un chargement excentré appliqué via une plaque de chargement de 700 mm sur un parapet hybride de 2 m (Figure 4.1a);
2. un chargement excentré appliqué sur l'extrémité non-connectée d'une série de 2 parapets MTQ301 préfabriqués via une plaque de chargement de 700 mm (Figure 4.1b); cet essai fournira une condition équivalente à l'essai 1 sur parapet hybride de 2 m;
3. un chargement excentré appliqué sur l'extrémité connectée d'une série de 2 parapets MTQ301 préfabriqués via une plaque de chargement de 700 mm (Figure 4.1c); cet essai, en comparaison à l'essai 2 permettra d'évaluer le renforcement procuré par la connexion longitudinale. Les essais 2 et 3 pourront être réalisés sur la même série de deux parapets.

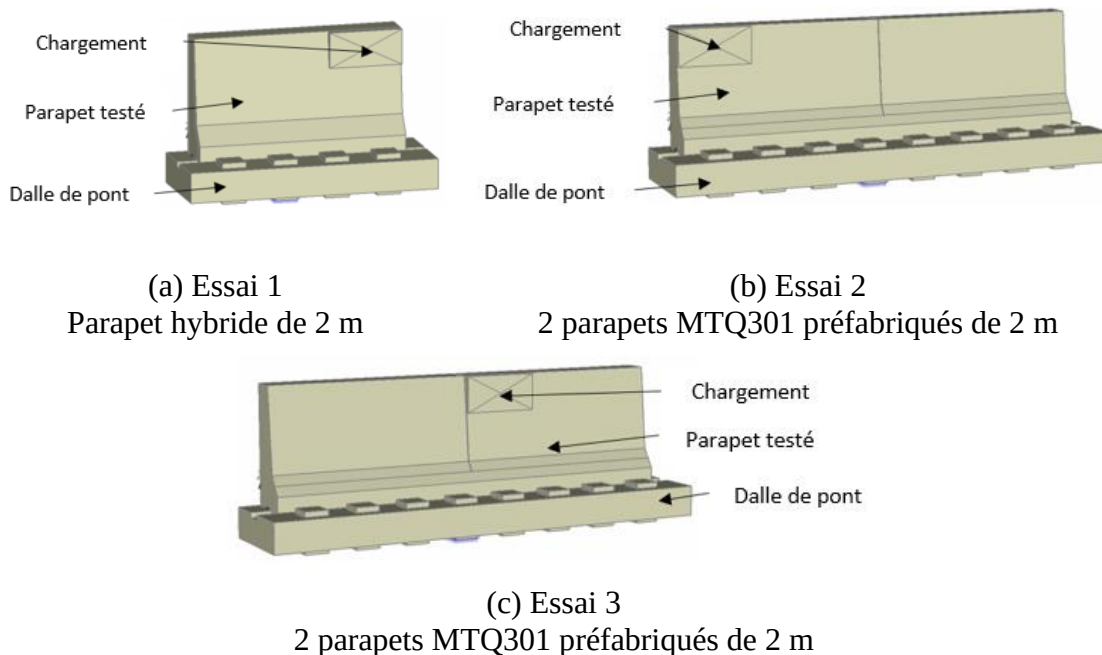


Figure 4.1 - Schémas des essais proposés

Les spécimens seront composés d'une dalle de pont de 2.4 m de longueur pour l'essai sur un parapet seul ou de 4.4 m de longueur pour les essais sur les deux parapets de 2 m connectés longitudinalement. De plus, afin de minimiser les coûts de production, les essais 2 et 3 seront réalisés sur le même spécimen.

4.1.3 Modifications aux concepts

Quelques modifications mineures ont été apportées aux concepts de parapets hybride et MTQ301 préfabriqué présentés aux Sections 3.1.1 et 3.1.2, pour faciliter la fabrication des spécimens d'essai. Tout d'abord, l'espacement des barres de connexion dans la niche du parapet hybride a été légèrement augmenté à 200 mm (au lieu de 175 mm dans le concept initial). Cet espacement a été pour obtenir un espacement constant des barres de connexion à la dalle de pont lorsque plusieurs parapets sont placés côtes-à-côtes. L'impact de cette modification a été évalué numériquement et elle n'apporte pas de changement significatif au comportement du parapet hybride. Lorsque testé selon les critères de la norme CSA S6 (2014), la capacité maximale de celui-ci reste largement supérieure à la résistance requise.

Deuxièmement, un BFUP contenant 4 % vol. de fibres avait été utilisé dans la niche de connexion du parapet hybride testé par le passé. Les résultats de l'étude numérique sur les propriétés matériaux (Section 3.5) ayant démontré qu'il était possible de réduire le dosage de fibres à 3%, il a été décidé d'utiliser du BFUP avec 3 % vol. de fibres dans la niche de connexion des parapets testés dans ce projet

Enfin, la clé de connexion longitudinale choisie correspond à celle qui avait été utilisée par Namy et al. (2015a), soit une clé de forme hexagonale illustrée à la Figure 4.2. Cette clé a les mêmes dimensions globales (longueur et largeur) que la clé carrée modélisée précédemment. Bien que cette clé ait été modélisée avec un mortier fibré de 60 MPa dans les modèles numériques présentés à la Section 3.6.4, il a été décidé de la remplir avec le même BFUP 3 % que la niche de connexion, de façon à ce que ces deux éléments puissent être coulés au même moment avec le même mélange. Le BFUP 3 % ayant un meilleur comportement mécanique que le mortier fibré de 60 MPa, son utilisation n'impactera pas négativement le comportement global des parapets connectés et le même mode de rupture est attendu.

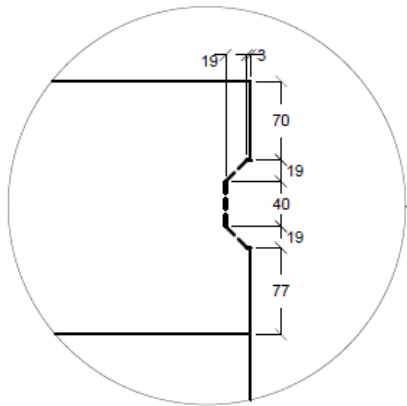


Figure 4.2 - Géométrie de la clé de cisaillement longitudinale (vue de haut)

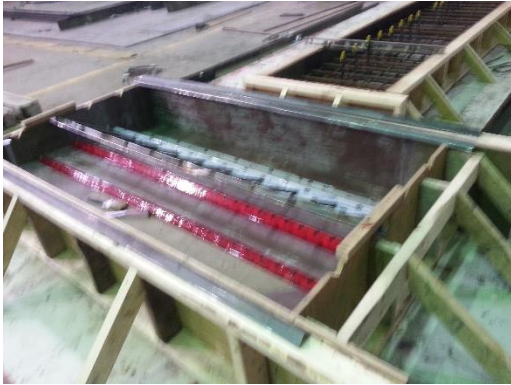
Note : dimensions en mm

4.2 Fabrication des spécimens d'essai

Les spécimens d'essais ont été fabriqués de façon à reproduire le plus fidèlement possible le mode de construction attendu sur un chantier où les parapets seraient préfabriqués en usine, transportés au chantier puis, installés sur la dalle de pont. Ainsi, les dalles d'essai et les parapets ont tout d'abord été fabriqués dans une usine de préfabrication, puis ils ont été transportés jusqu'au laboratoire de structures de Polytechnique Montréal pour être assemblés. Les plans de ferrailage et de production des parapets et dalles sont disponibles à l'Annexe A.

L'étape de préfabrication a été réalisée à l'usine de Béton Brunet à Salaberry-de-Valleyfield. Les parapets et dalles d'essai de la Phase 1 du projet (Charron et al., 2013) avaient eux aussi été produits à cette usine. Pour le parapet hybride illustré à la Figure 4.4, le cœur en béton à hautes performances a été coulé en premier lieu à l'horizontale afin d'assurer un bon remplissage du coffrage (Figure 4.3a). La coque en BFUP a ensuite été coulée avec le parapet en position verticale, depuis le haut du parapet, quelques jours plus tard (Figure 4.4a). Le cœur après démoulage ainsi que le parapet une fois la coque en BFUP fabriquée sont présentés respectivement à la Figure 4.3b et à la Figure 4.4b.

Un retardateur de prise a été appliqué sur toutes les surfaces du cœur qui seront en contact avec la coque ou la niche de connexion. Les surfaces sur lesquelles un retardateur de prise a été appliqué ont été nettoyées avec un jet d'eau à haute pression au démoulage afin d'obtenir une surface à granulats exposés et permettre une meilleure adhérence entre le BO du cœur et BFUP de la coque. Les retardateurs qui ont été utilisés sont le Euclid concrete surface retarder formula F pour les surfaces coffrées et le Top-Cast surface retarder (blue) pour les surfaces horizontales à l'air libre. Pour les surfaces coffrées, le retardateur est appliqué avant la coulée, alors que pour les surfaces horizontales à l'air libre, il est appliqué directement après la mise en place du béton. Un exemple de la production des surfaces à granulats exposés pour le cœur du parapet hybride est présenté à la Figure 4.5.



(a) Coffrage du cœur en BO



(b) Cœur en BO

Figure 4.3 - Fabrication du cœur en BO du parapet hybride



(a) Coulée de la coque en BFUP



(b) Parapet hybride

Figure 4.4 - Fabrication du parapet hybride



(a) Nettoyage de la surface

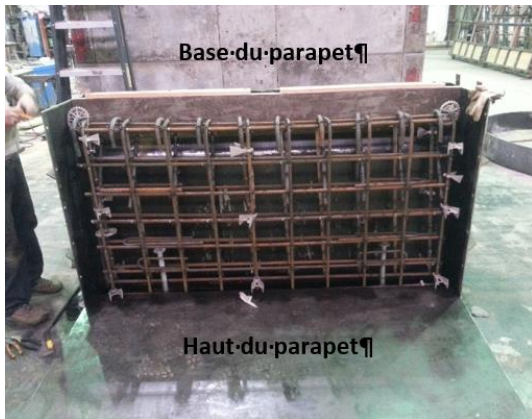


(b) Surface à granulats exposés

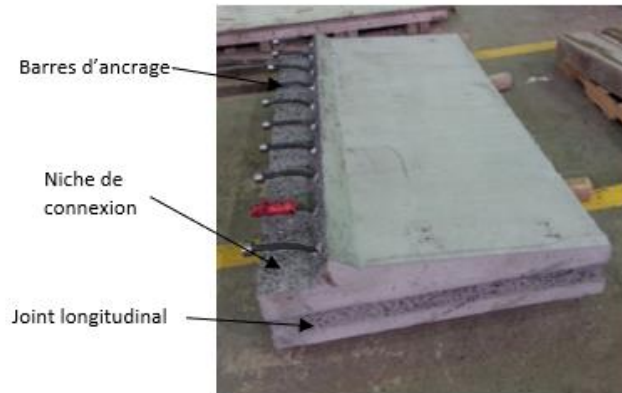
Figure 4.5 - Production des surfaces à granulats exposés

Le parapet MTQ301 préfabriqué (Figure 4.6) a été coulé à la verticale mais l'envers dans un coffrage d'acier afin d'assurer un bon remplissage de toutes les zones et de faciliter la mise en place de l'armature. Des surfaces à granulats exposés ont été produites sur les faces de la niche de connexion et de la clé de connexion longitudinale.

Finalement, les dalles de pont ont naturellement été coulées à la verticale dans un coffrage en bois et l'encoche de la niche de connexion a été réalisée au moyen d'une insertion en bois dans le coffrage. les granulats ont également été exposés sur une portion de la surface supérieure des dalles d'essai, tel que présenté à la Figure 4.7. Cette portion correspond à l'encoche faisant partie de la niche de connexion ainsi qu'à l'endroit où les parapets seront positionnés.



(a) Coffrage



(b) Parapet MTQ301 préfabriqué

Figure 4.6 - Parapet MTQ301 préfabriqué



Figure 4.7 - Dalle de pont de 2,4 m

Une fois les éléments transportés au laboratoire de structures de Polytechnique Montréal, l'assemblage des parapets sur les dalles s'est fait en deux étapes. La première étape consistait à positionner les parapets sur les dalles de pont. Pour ce faire, une mince couche de mortier (Euclid High flow grout), qui est un produit autorisé par le MTQ, a été placée sur les dalles de pont pour assurer un bon contact parapet-dalle. Le parapet est ensuite déposé sur le mortier frais. La Figure 4.8a présente l'ensemble de 2 parapets MTQ301 préfabriqués de 2 m suite à cette étape et les Figure 4.8b et Figure 4.8c présentent plus en détails la forme finale de la clé de connexion

longitudinale créée par le positionnement de deux parapets côte-à-côte et l'alternance des barres en provenance des parapets et de la dalle dans la niche de connexion respectivement.



(a) Vue d'ensemble



(b) Clé de connexion longitudinale



(c) Barres dans la niche de connexion

Figure 4.8 - Installation des parapets MTQ301 préfabriqués sur la dalle de pont

L'étape suivante de l'assemblage entre les parapets et les dalles de ponts consiste à couler les niches de connexion. Pour ce faire, des coffrages traditionnels en bois avec des ouvertures sur la partie supérieure ont été construits (Figure 4.9a). Le BFUP utilisé pour les niches de connexion est

introduit dans les coffrages par ces ouvertures et se repend naturellement dans l'ensemble de la niche car il s'agit d'un matériau autoplaçant (Figure 4.9b). Une fois la niche complètement remplie, les ouvertures sont refermées à l'aide d'une tôle qui suit la forme du parapet. La clé de connexion longitudinale est coulée par la même occasion. La Figure 4.10 présente les parapets hybride et MTQ301 préfabriqués après démoulage de la niche de connexion.



(a) Coffrage de la niche



(b) Coulée de la niche

Figure 4.9 - Coulée de la niche de connexion



(a) Vue de côté du parapet MTQ301 préfabriqué



(b) Parapet hybride installé sur la dalle de pont



(c) Deux Parapet MTQ301 préfabriqués installés sur la dalle de pont

Figure 4.10 - Assemblage final des spécimens d'essai

4.3 Montage expérimental

Le montage expérimental est illustré schématiquement à la Figure 4.11 et via une photo à la Figure 4.12. Le chargement est appliqué par un vérin hydraulique d'une capacité maximale de 1000 kN et d'une course maximale de 508 mm (20 pouces). Les modélisations numériques préliminaires effectuées pour les parapets et les conditions de chargement prévues ont montré que la capacité maximale des parapets serait inférieure à 450 kN. L'utilisation d'un vérin de 1000 kN permet donc une bonne marge de manœuvre dans le cas où la résistance des spécimens testés surpasserait les

prédictions. Le vérin est appuyé à une extrémité sur une colonne d'attache contreventée ancrée à la dalle du laboratoire. Le vérin est aussi soutenu près de son centre par des câbles d'acier reliés par un système de poulies à un contre poids. Ce système a pour fonction de reprendre le poids propre du vérin afin d'éviter que celui-ci ne soit repris par les spécimens pendant les essais. L'ensemble parapet-dalle de pont testé est déposé sur une mince couche de mortier « Ultracal » pour assurer un contact uniforme avec la dalle du laboratoire. La dalle de pont est déposée à plat sur la dalle du laboratoire alors qu'en réalité les parapets sont positionnées sur une portion de la dalle de pont qui est en porte-à-faux. Comme l'a montré les travaux de Namy (2012) la condition d'appui choisie pour ces essais, soit une dalle déposée à plat, correspond à un cas de chargement plus critique qu'un dalle en porte-à-faux (cf. Section 3.2.1.3). La dalle est ensuite ancrée à celle du laboratoire par des barres de post-tension. Une pré-tension de 10 000 PSI a été appliqué à ces barres. Le chargement du vérin est appliqué aux parapets par une plaque d'acier de 79 mm d'épaisseur liée à une plaque de BFUP en biais de dimensions 700 x 350 x 57 mm (Figure 4.11). Afin d'assurer un contact parfait entre la plaque de chargement et le parapet, une mince couche de mortier « drystone » est placée entre les deux. Le montage est conçu de façon à ce que le vérin soit en contact avec le spécimen à mi-course, ce qui laisse 254 mm de course disponible pour l'essai. Les modélisations numériques préliminaires ont démontré que la rupture des parapets survenait pour un déplacement maximal de 30 mm, donc la course disponible est amplement suffisante pour la réalisation de l'essai. Une dalle de butée de 2.4 m de longueur est placée à l'arrière de la dalle de pont et centrée par rapport au chargement (Figure 4.11). Elle sert à éviter tout glissement de la dalle de pont positionnée sous le parapet pendant le chargement. L'espace restant entre la dalle de pont et la dalle de butée est comblé par un mortier « drystone » afin de s'assurer que le spécimen d'essai est bien appuyé sur la butée. L'Annexe B présente la liste des tâches nécessaires à l'installation du montage expérimental.

Il est possible d'observer la similitude entre les conditions des essais en laboratoire aux conditions limites des modèles numériques présentées à la Section 3.2.1.3. La dalle de pont est appuyée dans le montage expérimental sur la dalle du laboratoire et sur la dalle de butée à l'arrière. Numériquement, la dalle de pont est retenue de façon similaire en bloquant son déplacement vertical sur la face de dessous et son déplacement horizontal sur la face arrière. Les dimensions de la plaque de chargement expérimentale sont les mêmes que celles utilisées numériquement (plaque de 700 mm) et la post-tension appliquée au spécimen d'essai est reproduite numériquement.

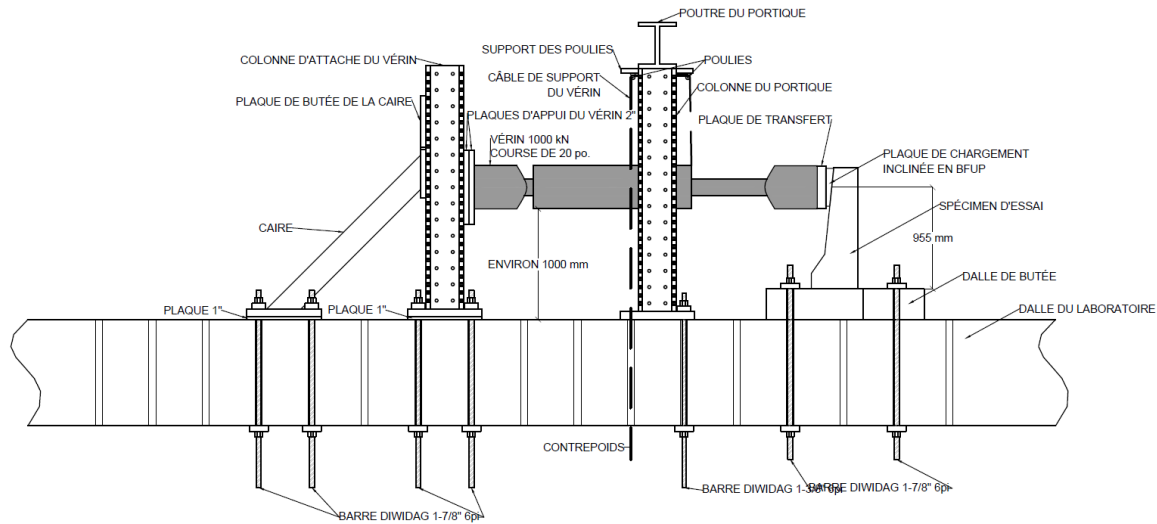


Figure 4.11 - Schéma du montage expérimental

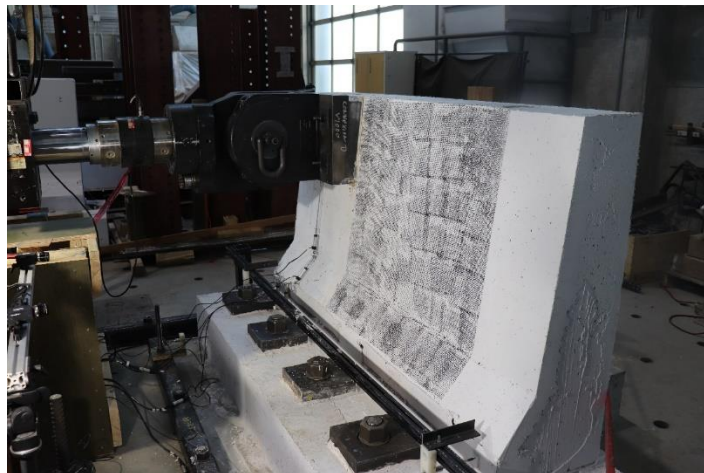


Figure 4.12 - Application du chargement excentré sur le parapet hybride

4.4 Instrumentation

Plusieurs instruments de mesures sont positionnés sur les spécimens d'essai afin d'enregistrer les déplacements et les déformations à des endroits stratégiques. Des schémas de l'instrumentation utilisée pour les trois configurations d'essais testées sont présentés de la Figure 4.13 à la Figure 4.15. La charge appliquée sur la plaque de chargement est mesurée par la cellule de charge du vérin. Le déplacement transversal du parapet est mesuré par un potentiomètre linéaire placé à

l'arrière du spécimen au niveau du point d'application de la charge (vis-à-vis du centre de la plaque de chargement). Un deuxième potentiomètre linéaire, placé à 45 degrés par rapport à la mesure du déplacement transversal, sert à capturer tout déplacement hors plan du spécimen pendant l'essai. Ce capteur peut par la suite être utilisé pour corriger, par triangulation, la mesure du déplacement transversal. Les capteurs servant à la mesure du déplacement à l'arrière du spécimen sont illustrés à la Figure 4.16. Les données de la force appliquée ainsi que du déplacement transversal résultant permettent d'obtenir la courbe de comportement global force-déplacement du parapet testé.

En plus de ces capteurs, des LVDT (linear variable displacement transducer) ont été positionnés horizontalement à la base de la dalle de pont positionnée en dessous du parapet pour mesurer l'éventuel glissement de celle-ci par rapport à la dalle du laboratoire. De la même façon, des LVDT ont été positionnés à la base des parapets pour mesurer l'éventuel glissement entre la dalle de pont et les parapets. Les capteurs de glissement sont positionnés environ à 400 mm de chaque extrémité longitudinale pour le spécimen de 2.4 m de longueur et pour le spécimen de 4.4 m des capteurs ont aussi été placés au centre du spécimen. De plus, un potentiomètre linéaire positionné cette fois verticalement mesure l'éventuel soulèvement du parapet testé par rapport à la dalle de pont sous le point d'application de la charge.

Ensuite, trois autres potentiomètres linéaires ont été positionnés sur la face avant du parapet hybride, dans l'axe vertical du point d'application de la charge, pour mesurer les ouvertures de fissures au niveau de la niche de connexion et des pentes inférieures et supérieures du parapet. Pour les essais sur le parapet MTQ301 préfabriqué, seul le capteur sur la niche a été conservé puisque la zone couverte par les deux autres capteurs installés sur le parapet hybride était couverte par l'analyse par corrélation d'image (Figure 4.13 à Figure 4.15).

La procédure d'analyse par corrélation d'images, réalisée avec le logiciel VIC-3D (Correlated Solutions, 2019), consiste à peindre un mouchetis (pointillé noir sur un fond blanc) sur une zone préfinie du parapet (zone où la fissuration principale est attendue). Pendant l'essai, une paire de caméras à haute résolution positionnées précisément et préalablement calibrées prend des photos à intervalles réguliers de la zone mouchetée. Il est important que la zone étudiée soit exempte de capteurs et qu'il n'y ait pas d'effet d'ombres sur la zone en question. Après l'essai, le logiciel de traitement permet d'obtenir les déformations principales et déplacements dans toutes les directions en évaluant les déplacements relatifs entre chacun des points noirs. L'avantage de cette méthode

est qu'elle permet de couvrir une large zone et donc d'obtenir beaucoup plus d'informations qu'avec un simple capteur localisé à un endroit précis. Pour l'essai sur le parapet hybride de 2 m, l'analyse par corrélation d'images a seulement été réalisée à côté de la plaque de chargement, dû à des contraintes de positionnement des caméras. Ces contraintes ont pu être évitées pour les essais sur les parapets MTQ301 préfabriqués. Le positionnement des caméras a donc été revu et la corrélation d'images a permis de visualiser tout le pourtour de la plaque de chargement. Une seconde zone d'analyse d'images cette fois à l'arrière du parapet chargé a également été ajoutée lors des essais sur les parapets MTQ301 préfabriqués.

Finalement, pour les trois essais réalisés, des jauges de déformation ont été collées sur sept barres d'armatures présentes dans la niche de connexion (Figure 4.17 et Figure 4.18). Les barres sélectionnées correspondent aux barres avec les contraintes maximales dans la niche de connexion selon les modélisations préliminaires. Ces jauges ont été collées à 10 cm de l'extrémité de l'ancrage mécanique Terminator. Elles sont placées par paire, soit une jauge à l'avant de la barre instrumentées et une autre à l'arrière afin d'obtenir une valeur de déformation moyenne et d'observer si la barre est sollicitée en flexion.

L'acquisition des différents capteurs et des jauges a été réalisée à une fréquence de 5 Hz, tandis que le système d'analyse par corrélation d'images prend une capture d'image par seconde (1 Hz). Les spécimens ont été peints en blanc aux endroits où il n'y avait pas d'analyse d'images afin de pouvoir marquer les fissures manuellement pendant l'essai. Il est à noter qu'il n'est pas possible de marquer les fissures sur la zone d'analyse d'images.

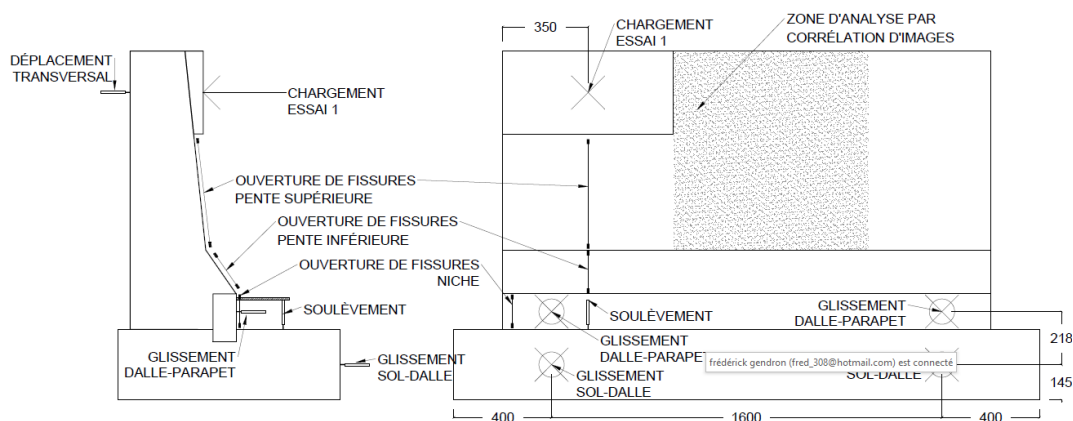


Figure 4.13 - Instrumentation pour l'essai sur le parapet hybride de 2 m.

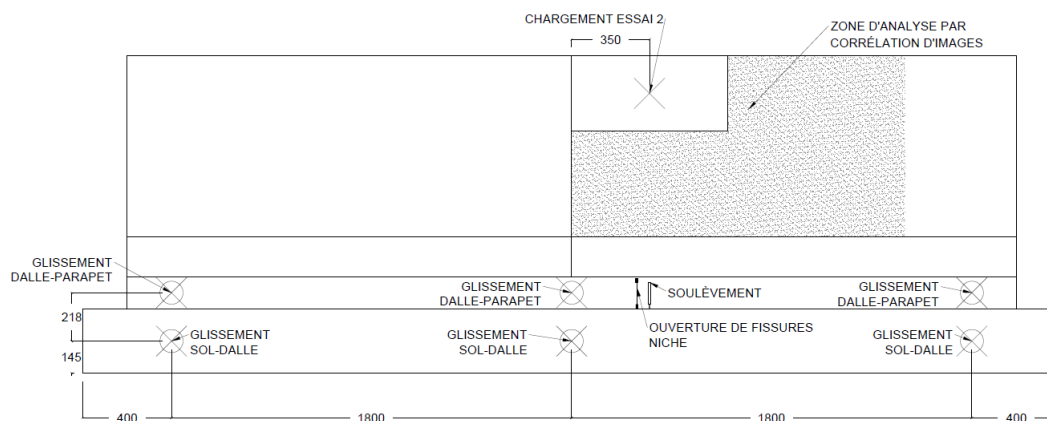


Figure 4.14 - Instrumentation pour l'essai sur les deux parapets MTQ301 préfabriqués avec chargement près de la clé de connexion longitudinale

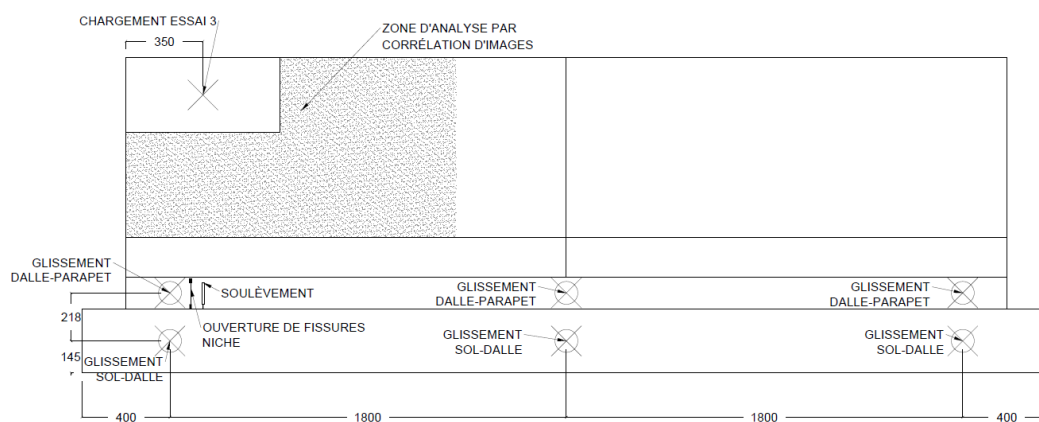


Figure 4.15 - Instrumentation pour l'essai sur les deux parapets MTQ301 préfabriqués avec chargement à l'extrémité libre



Figure 4.16 - Mesure du déplacement à l'arrière du spécimen

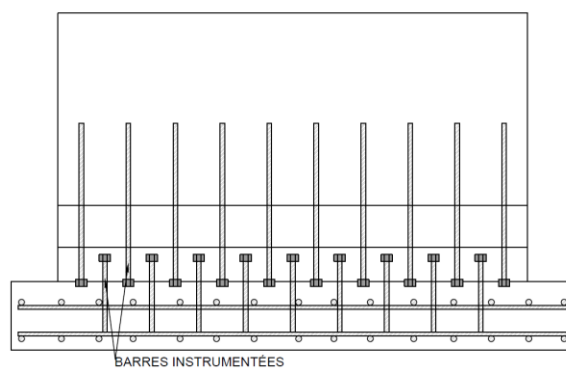


Figure 4.17 - Positionnement des barres instrumentées sur le spécimen composé d'un parapet hybride de 2 m

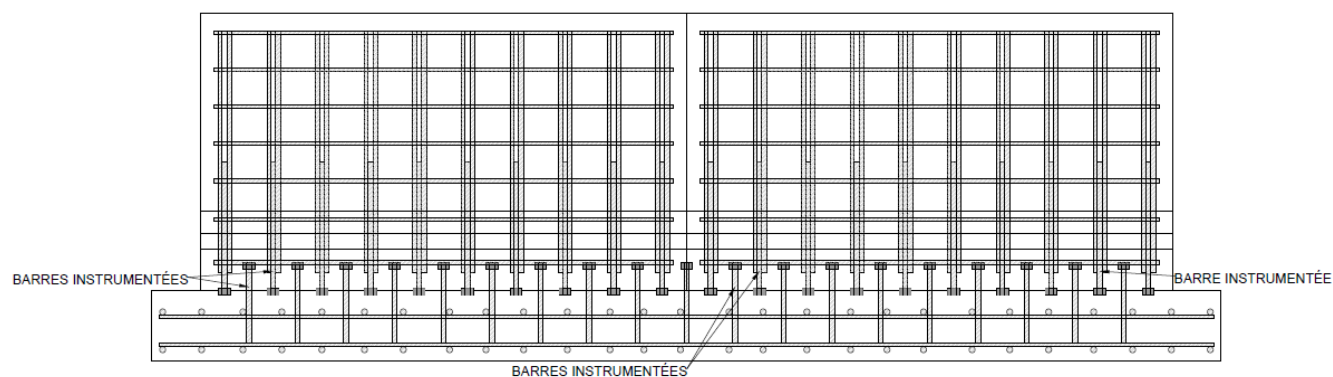


Figure 4.18 - Positionnement des barres instrumentées sur le spécimen composé de deux parapets MTQ301 préfabriqués de 2 m

4.5 Protocole de chargement

Pour ces essais, le protocole de chargement consiste à appliquer un chargement horizontal quasi-statique jusqu'à la rupture du spécimen. Comme l'ont montré les travaux de Niamba (2009) et de Duchesneau (2011) l'application d'un chargement statique constitue un cas de chargement plus critique qu'un chargement dynamique (cf. Section 2.1).

Une pré-charge de 25 kN est d'abord appliquée au spécimen afin d'assurer que le vérin est pleinement en contact avec le spécimen et que la force de friction entre la plaque de chargement et le spécimen est suffisante pour maintenir le vérin en place. Une fois cette charge atteinte, les éléments de sécurité qui retiennent le vérin à la bonne hauteur sont relâchés et l'essai peut débuter. À partir de ce moment, le vérin est contrôlé en déplacement et le chargement est appliqué à une vitesse de 0.12 mm par minutes. Le chargement peut être accéléré au besoin jusqu'à une vitesse maximale de 0.6 mm/min. Des pauses sont prévues à différents paliers de chargement (100 kN, 200 kN puis et à tous les 50 kN par la suite) afin de permettre le marquage des fissures et de prendre des photos. Le moment à partir duquel le spécimen sera déchargé est décidé pendant l'essai. Celui-ci est choisi de telle sorte à obtenir une bonne vue d'ensemble du comportement post-pic du spécimen, mais sans se rendre jusqu'à un niveau d'endommagement qui deviendrait non sécuritaire. L'annexe C présente la liste de contrôle (procédure détaillée) pour la réalisation des essais.

CHAPITRE 5 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Ayant établi la procédure expérimentale et documenté le mode de fabrication des spécimens d'essai au Chapitre 4, le Chapitre 5 présente les résultats des essais en laboratoire sur les parapets préfabriqués. Parallèlement aux essais principaux, un programme complet de caractérisation des matériaux a été complété.

Ce chapitre débutera par la présentation des résultats des essais de caractérisation des matériaux à la Section 5.1. Ensuite, les résultats complets des trois essais sur parapets seront présentés à la Section 5.2, le comportement mécanique des spécimens d'essai, le patron de fissuration obtenu et les déformations enregistrées dans les barres d'armatures.

5.1 Programme de caractérisation des matériaux

L'objectif de ce programme est de connaître le plus précisément possible les propriétés des matériaux incorporés aux parapets au moment des essais structuraux afin de les utiliser ultérieurement pour la validation des modèles numériques. Les résultats des essais de caractérisation des bétons sont présentés à la Section 5.1.1 et ceux des aciers d'armature à la Section 5.1.2.

5.1.1 Propriétés des bétons

Les dalles de pont, les parapets MTQ301 préfabriqués et le cœur du parapet hybride sont constitués de bétons ordinaires (BO). Pour ces éléments, une résistance à la compression entre 40 et 50 MPa était souhaitée afin de représenter un béton typiquement utilisé pour les parapets ponts. Les niches de connexion et la clé de connexion longitudinale sont, elles, fabriqués avec un BFUP à 3 % vol. de fibres, tandis que la coque du parapet hybride a été produite avec un BFUP à 4 % vol. de fibres. Les mélanges de BFUP utilisés correspondent respectivement aux mélanges commerciaux UP-F3 et UP-F4 développés à Polytechnique Montréal (Charron et al., 2011) et commercialisé par l'entreprise Matériaux King. La résistance à la compression visée à 28 jours est de 120 MPa.

Le programme de caractérisation des bétons comprend la mesure des propriétés suivantes : la résistance à la compression (ASTM-C39), le module élastique (ASTM-C469), le coefficient de poisson (ASTM-C469) et la résistance à la traction. La résistance à la traction a été mesurée par un essai de traction indirecte (essai de fendage ASTM-C496) pour les BO et par un essai de traction

directe sur os (Beaurivage, 2009) pour les BFUP (essai basé sur la norme RILEM TC 162-TDF, mais avec des spécimens de forme et taille différentes). Les essais de caractérisation ont été effectués à l'âge des essais structuraux sur les parapets de manière à caractériser le comportement mécanique des bétons aux moments des essais. Aucun essai de traction n'a été effectué sur le BFUP 3 % de la clé de connexion longitudinale, cette valeur sera considérée équivalente à celle du BFUP 3% de la niche de connexion.

Les résultats moyens des essais de caractérisation sont résumés au Tableau 5.1 et les courbes de comportement en traction des BFUP sont présentées à la Figure 5.1. Tel qu'attendu, les BFUP utilisés ont montré d'excellentes propriétés mécaniques avec des résistances à la compression de 148 MPa pour la coque du parapet hybride et les niches de connexion. Le comportement en traction est tout aussi excellent avec des résistances maximales de 10.5 MPa à 2400 $\mu\epsilon$ et de 13.5 MPa à 2200 $\mu\epsilon$ respectivement pour le BFUP 3 % des niches de connexion et le BFUP 4 % de la coque du parapet hybride, le module des BFUP environ à 36 GPa. Les propriétés des BO correspondent aux valeurs attendues, les résistances à la compression varient entre 34.3 et 46.3 MPa. Les modules élastiques varient entre 24 GPa et 30 GPa.

Tableau 5.1 - Propriétés des bétons

Élément	Résistance la compression (échéance)	Module élastique (échéance)	Coefficient de poisson (échéance)	Résistance à la traction (échéance)
Cœur du parapet hybride	46.3 MPa (197 j)	29.1 GPa (197 j)	0.223 (197 j)	4,42 MPa (225 j) ²
Dalle de 2 m et parapet MTQ préfabriqué 1	34.3 MPa (213 j)	24.4 GPa (213 j)	0.204 (213 j)	3,23 MPa (220 j) ²
Dalle de 4 m et parapet MTQ préfabriqué 2	40.1 MPa (217 j)	24.9 GPa (217 j)	0.192 (217 j)	3,89 MPa (219 j) ²
Coque du parapet hybride	148.3 MPa (183 j)	36.4 GPa (183 j)	0.225 (183 j)	13.5 MPa (166 j) ¹
Niches de connexion	148.4 MPa (120 j)	36.8 GPa (120 j)	0,233 (120 j)	10.5 MPa (85 j) ¹
Clé de connexion longitudinale	129.3 MPa (120 j)	36.4 GPa (120 j)	0,209 (120 j)	-

¹ Essai de traction directe sur os

² Essai de traction Brésilien

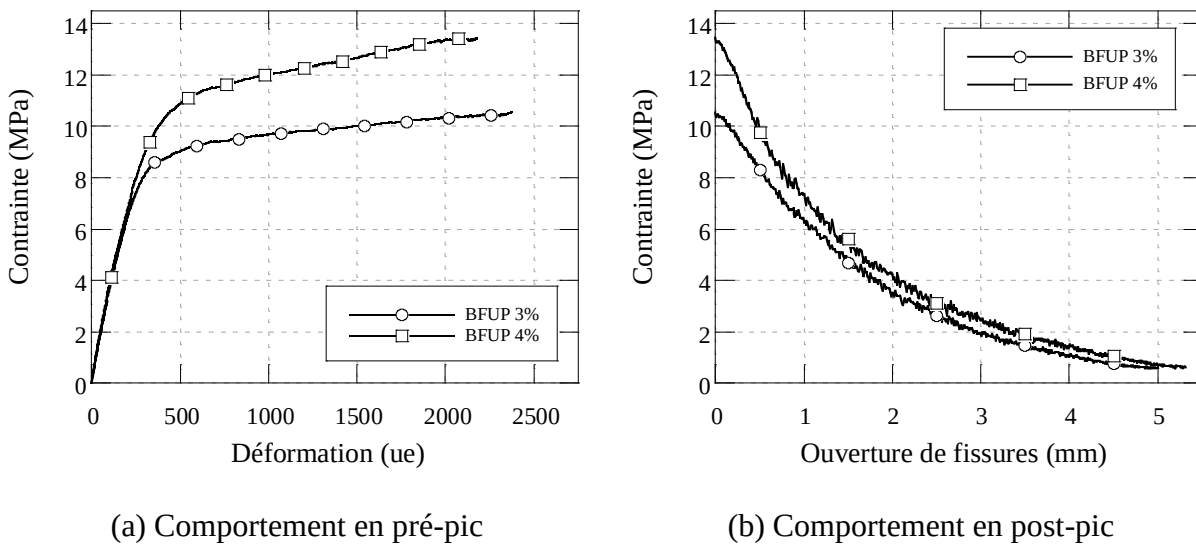


Figure 5.1 - Comportement en traction des BFUP utilisés

5.1.2 Propriétés des armatures

Quatre types de barres d'armatures se retrouvent dans les spécimens d'essai, soit des barres 15M, 20M, 20M filetées pour installer les ancrages mécaniques Terminator dans les niches de connexion et des barres 25M. Les barres 20M et 20M filetées ne proviennent pas du même lot d'acier. Toutes ces barres sont fabriquées en acier conventionnel de nuance 400W. Un essai de traction directe a été réalisé sur un échantillon de chacun de ces types de barres. Les résultats de ces essais sont présentés au Tableau 5.2 et à la Figure 5.2. Sans surprise, toutes les barres ont une résistance élastique (F_y) supérieure à 400 MPa, une résistance ultime (F_u) supérieure à 520 MPa, et un comportement déformationnel typique de l'acier.

Tableau 5.2 - Propriétés des barres d'armatures

Barres	F_y	F_u	Module élastique
15M	452 MPa	597 MPa	210 GPa
20M	429 MPa	589 MPa	202 GPa
20M filetées	424 MPa	583 MPa	208 GPa
25M	441 MPa	633 MPa	203 GPa

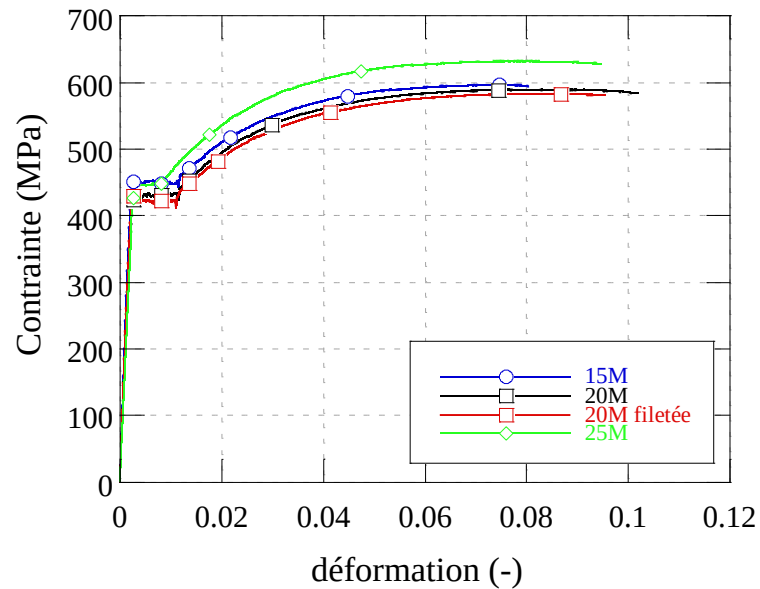


Figure 5.2 - Courbes contrainte-déformation des aciers d'armature

5.2 Essais sur parapets

Tel que présenté au Chapitre 4, le programme expérimental comprend trois essais sur parapets. Plus précisément ces trois essais sont : un parapet hybride de 2 m soumis à un chargement à l'extrémité, une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués de 2 m avec le chargement sur l'extrémité près de la connexion longitudinale d'un des deux parapets et la même série de deux parapets MTQ301 préfabriqués de 2 m mais cette fois chargés à l'extrémité non connectée du deuxième parapet. Les résultats pour chacun de ces essais sont respectivement présentés aux Sections 5.2.1 à 5.2.3. Enfin, la Section 5.2.4 fournit quelques analyses complémentaires en comparant les résultats des trois essais entre eux.

5.2.1 Essai sur parapet hybride de 2 m soumis à un chargement à l'extrémité

Les principaux résultats obtenus lors de l'essai de chargement excentré sur un parapet hybride de 2 m sont présentés à la Figure 5.3, à la Figure 5.4 et à la Figure 5.5. La Figure 5.3a présente l'évolution de la charge appliquée en fonction du déplacement horizontal du parapet, la Figure 5.3b présente l'évolution de la charge appliquée en fonction du soulèvement du parapet par rapport à la dalle de pont, la Figure 5.3c présente l'évolution de la charge appliquée en fonction de la contrainte

dans les barres d'armatures instrumentées situées dans la niche de connexion. La Figure 5.4 présente plus en détail la progression de la fissuration durant l'essai pour différents niveaux de chargement (350, 400 et 428 kN) et la Figure 5.5 présente le plan de rupture final.

Pour débiter, l'analyse du comportement mécanique force-déplacement transversal du parapet (Figure 5.3a) révèle que le parapet hybride a montré un comportement linéaire élastique jusqu'à une charge d'environ 175 kN, ensuite un comportement non-linéaire avec apparition de fissures est observé jusqu'au maximum de résistance. La résistance maximale du spécimen testé a été de 428 kN pour un déplacement transversal de 6.3 mm en arrière du point d'application de la charge. À la suite du pic de résistance, celle-ci a diminué assez rapidement. Le déchargement a été effectué lorsque la charge appliquée est redescendue à 150 kN. À ce moment, le déplacement transversal était de 11.3 mm. Tel qu'attendu par les modélisations numériques préliminaires, la résistance minimale de conception de 476 kN de conception n'a pas été atteinte. Ceci s'explique par le fait qu'un parapet de 2 m et une plaque de 700 mm de longueur ont été utilisés (cf. Section 3.6.1).

Le soulèvement entre le parapet et la dalle de pont (Figure 5.3b) est demeuré quasi-nul jusqu'à une charge de 100 kN. Par la suite, le soulèvement augmente de façon non-linéaire jusqu'à la capacité maximale du parapet hybride, soit de 428 kN. À ce moment, le soulèvement maximal est de 0.9 mm.

Les barres d'armatures instrumentées dans la niche de connexion (cf. Section 4.4) sont demeurées élastiques en tout temps durant le chargement, tel qu'illustré à la Figure 5.3c. La contrainte dans la barre provenant du parapet et la barre provenant de la dalle de pont évoluent sensiblement au même rythme au cours de l'essai et ont atteint une contrainte maximale d'environ 350 MPa. La contrainte maximale est atteinte lorsque la charge appliquée est maximale.

Ensuite, les premières fissures visibles à l'œil nu (Figure 5.4) sont apparues au point de changement de pente du parapet vers 350 kN, sur la niche de connexion, vis-à-vis de l'axe de chargement et légèrement sur le côté du parapet. Par la suite, les fissures se sont développées de plus en plus haut sur le parapet à mesure que le chargement augmentait. À 400 kN, une importante fissure s'est produite juste au-dessus du changement de pente du parapet et s'est développée de manière oblique en contournant la plaque de chargement. En même temps, des fissures obliques se sont développées sur la face de côté, dans la région inférieure du parapet. Vers 428 kN, soit au pic de résistance, le plan de rupture final, soit une rupture en cisaillement autour de la plaque de chargement, s'est

développé dans le haut du parapet contournant la plaque de chargement et s'est poursuivi sur le côté du parapet en descendant jusqu'à sa base. Aussi une courte fissure s'est développée dans la niche avec une ouverture de 0.6 mm mesuré par le potentiomètre linéaire prévu à cet effet. La fissure principale sous la plaque de chargement avait une ouverture de 1.1 mm au même moment selon la lecture du capteur servant à mesurer l'ouverture de fissure à cet endroit (Figure 5.4). Le plan de rupture final, après déchargement du parapet, est illustré à la Figure 5.5. Enfin, il est important de noter que la dalle de pont d'essai n'a subi absolument aucun endommagement durant l'essai. Ceci s'explique par le fait que la dalle de pont est déposée à plat sur la dalle de laboratoire, elle n'est pas en porte-à-faux comme tel que sur un pont. Des informations sur l'endommagement de la dalle de pont avait été recueillis dans le cadre du projet de Namy (2012) réalisé à Polytechnique Montréal.

Durant l'essai, un glissement inférieur à 0.01 mm a été observé entre le spécimen d'essai et la dalle du laboratoire. Cette valeur négligeable confirme que le spécimen d'essai ne s'est pas déplacé par rapport au montage pendant l'essai.

En combinant les différentes mesures et observations durant l'essai, un point important qui ressort est que la rupture finale en cisaillement du parapet hybride préfabriqué est survenue dans le haut du parapet et non par la plastification des barres dans la niche de connexion. Ce type de rupture est exactement le même que celui du parapet MTQ301 coulé en place. L'utilisation du parapet préfabriqué ne change donc pas le comportement global habituel du parapet sur dalle de pont.

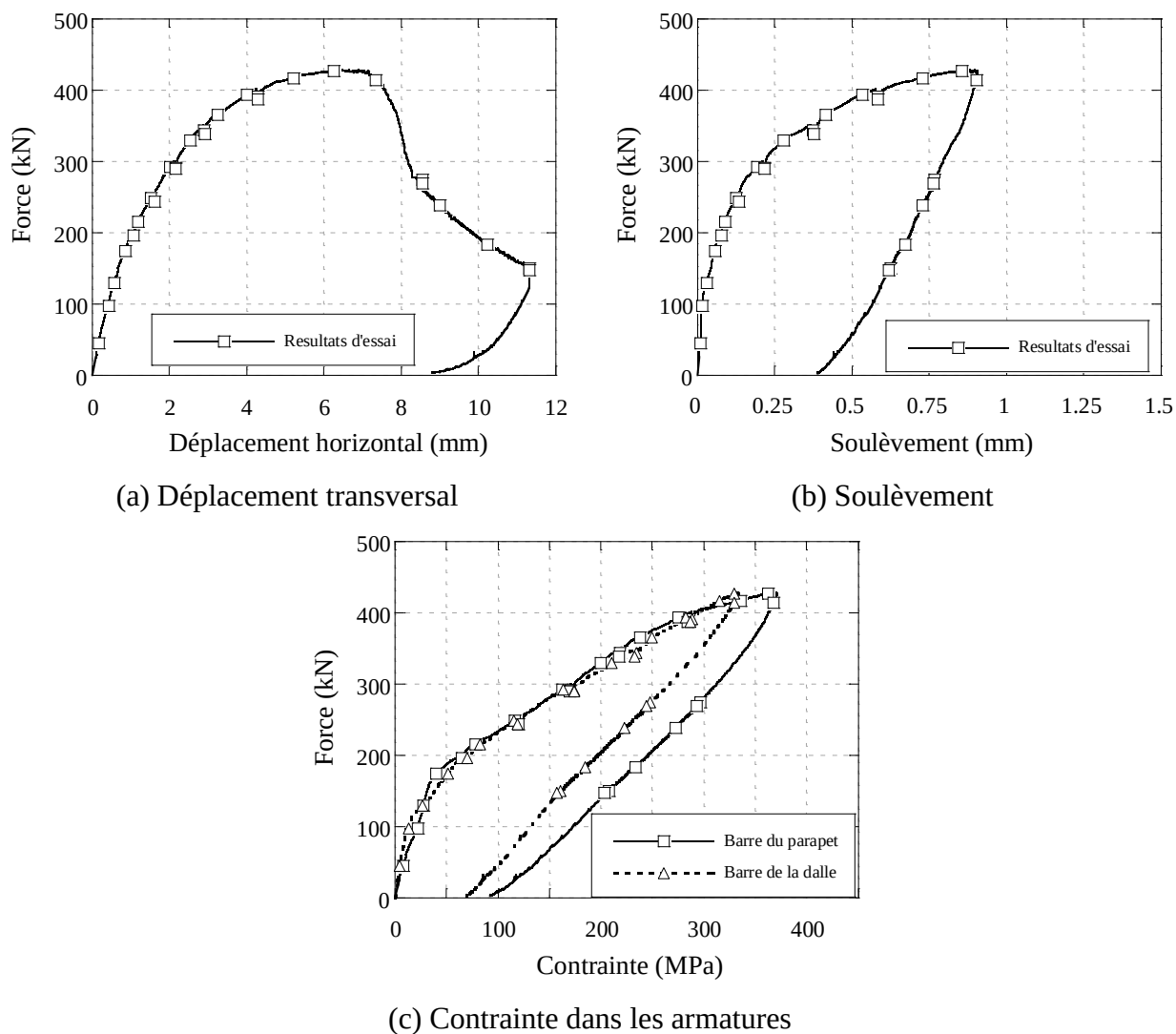


Figure 5.3 - Résultats d'essai sur parapet hybride de 2 m soumis à un chargement excentré



Figure 5.4 - Progression de la fissuration durant l'essai de chargement excentré sur parapet hybride de 2 m



(a) Côté du parapet



(b) Face avant du parapet

Figure 5.5 - Plan de rupture final d'un parapet hybride de 2 m soumis à un chargement excentré

5.2.2 Essai sur deux parapets MTQ301 préfabriqués de 2 m connectés soumis à un chargement près de la clé de connexion

Pour ce deuxième essai, le chargement a été appliqué à l'extrémité connectée d'un des deux parapets MTQ301 préfabriqués. Les Figure 5.6a, Figure 5.6b et Figure 5.6c présentent l'évolution de la charge appliquée en fonction respectivement du déplacement horizontal, des glissements et de la contrainte dans les barres d'armatures instrumentées dans la niche de connexion (cf. Section 4.4). La Figure 5.7 présente l'évolution de la fissuration durant l'essai. La Figure 5.8 et la Figure 5.9 présentent le plan de rupture final du spécimen d'essai.

Au départ de l'essai, la rigidité initiale (pente force-déplacement) du spécimen d'essai (Figure 5.6a) semblait beaucoup plus faible qu'anticipée. La charge augmente de façon linéaire, avec la faible rigidité observée, jusqu'à une charge appliquée de 300 kN. A partir de ce moment un comportement non-linéaire avec apparition de fissures est observé. La charge augmente jusqu'à un maximum de 359 kN. Par la suite, la résistance diminue rapidement pour atteindre 300 kN

(Figure 5.6a) Tel qu'attendu par les modélisations numériques préliminaires la résistance minimale de conception de 476 kN de conception n'est pas atteinte, cela est explicable par un chargement appliqué avec une plaque de 700 mm de longueur et l'utilisation de parapets de 2 m (cf. Section 3.6.1). Le déchargement a été effectué à une charge de 300 kN.

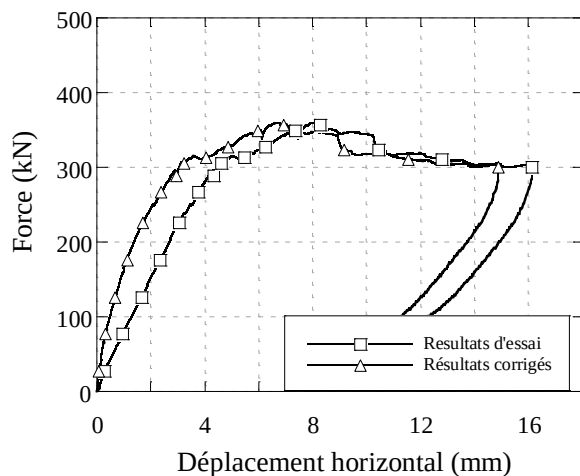
La contrainte dans la barre instrumentée provenant du parapet et dans la barre provenant de la dalle dans la niche de connexion (Figure 5.6c) varient de façon similaire au cours du chargement. La contrainte dans celle-ci demeure élastique tout au long du chargement et une contrainte maximale d'environ 250 MPa est observée lorsque la charge appliquée est maximale.

Les premières fissures sont apparues entre 250 kN et 300 kN de charge appliquée (Figure 5.7). Celles-ci contournent la plaque de chargement et se développent autant sur le parapet chargé que sur le parapet adjacent. A 300 kN une fissure à 45 degrés commence à se développer sur le haut du parapet non chargé à partir de l'avant du joint longitudinal jusqu'à l'arrière du parapet. Ensuite, cette fissure progresse jusqu'à la charge maximale de 359 kN où la rupture initiale présentée à la Figure 5.8 se produit sur le parapet non chargé à l'arrière du joint de connexion longitudinal. Après cette cassure et puisque la clé de connexion du joint longitudinal ne permet réalistement plus de transférer les efforts la fissuration s'accroît seulement sur le parapet chargé autour de la plaque de chargement (Figure 5.9). Il s'agit là de la rupture finale, celle d'un parapet seul soumis à un chargement excentré (le joint de connexion longitudinal étant hors service). Cela permet de conclure que le joint longitudinal a permis d'obtenir 59 kN de résistance supplémentaire (différence entre la force maximale et la force post-pic pour un parapet seul). Tel qu'attendu par les modélisations numériques préliminaires la résistance minimale de conception de 476 kN de conception n'est pas atteinte, cela est explicable par un chargement appliqué avec une plaque de 700 mm de longueur et l'utilisation de parapets de 2 m (cf. Section 3.6.1). Le déchargement a été effectué à une charge de 300 kN.

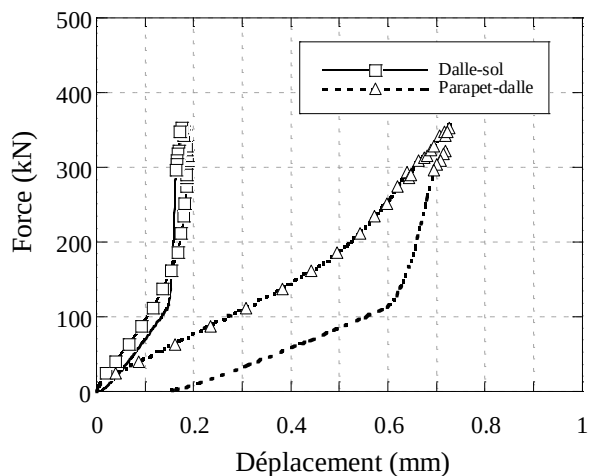
Pour cet essai, il n'était pas désiré aller très loin dans le comportement post-pic, puisqu'un autre essai devait être réalisé sur ce spécimen (en zone non connectée longitudinalement). Il était préférable d'éviter tout endommagement non essentiel du spécimen d'essai. C'est pour cette raison que le plan de rupture final n'est pas aussi évident sur la Figure 5.9 que pour les autres essais. Comme pour l'essai sur parapet hybride, la dalle de pont n'a subi absolument aucun endommagement. Par ailleurs, aucune fissuration n'a été relevée sur la niche connexion.

Malheureusement, pour cet essai le soulèvement n'a pas pu être analysé, car le capteur a été mal installé.

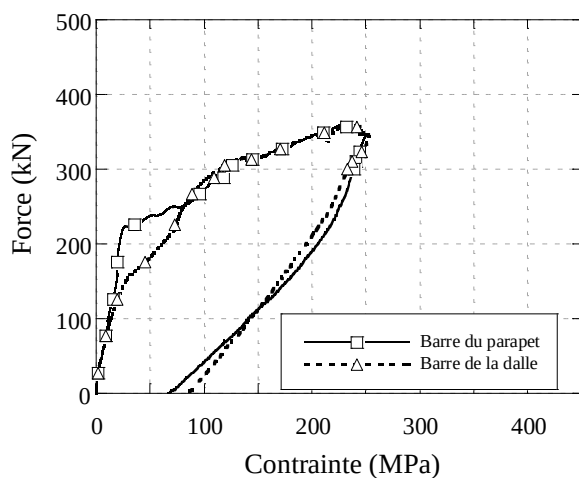
Dès le début de l'essai, des glissements importants ont été observés entre le spécimen d'essai et la dalle du laboratoire. Ce glissement a augmenté sensiblement linéairement jusqu'à une valeur de 0.16 mm pour une charge appliquée de 175 kN. Par la suite, le glissement n'a pas évolué significativement (Figure 5.6b). Il apparaît évident qu'un mouvement non souhaité s'est produit pendant l'essai. Normalement, il est attendu que le glissement entre la dalle de pont et la dalle du laboratoire doit être négligeable pendant l'essai. L'analyse des résultats obtenus par corrélation d'images permet d'observer que les glissements relevés ne sont pas le résultat d'un déplacement transversal, mais bien d'une rotation du spécimen d'essai. Cette rotation est probablement due à un mauvais remplissage du mortier faisant la jonction entre la dalle de pont et la dalle du laboratoire. Considérant que l'axe de rotation est logiquement à l'arrière de la dalle de pont, il est possible de calculer l'angle de rotation moyen du spécimen d'essai par rapport au sol en fonction du glissement moyen. Par la suite, il a été possible d'obtenir un déplacement transversal corrigé (Figure 5.6a). Ceci a permis de retrouver une rigidité initiale du spécimen en condition non fissuré conforme à la théorie.



(a) Déplacement transversal



(b) Glissement moyen



(c) Contrainte dans les armatures

Figure 5.6 - Résultats d'essai sur une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité connectée

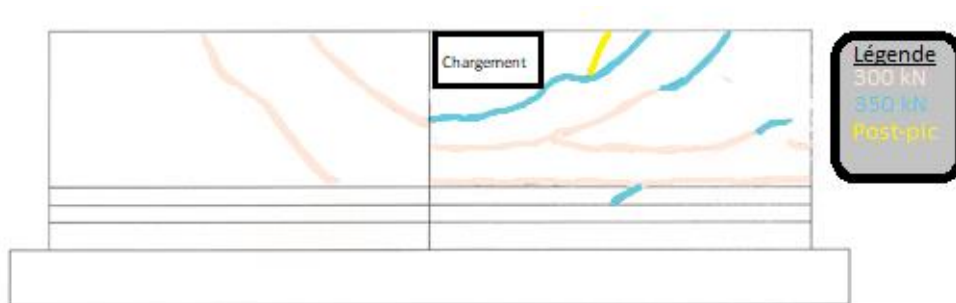


Figure 5.7 - Progression de la fissuration durant l'essai sur une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité connectée



(a) Vue de haut



(b) vue à l'arrière du parapet non chargé

Figure 5.8 - Rupture de la clé de connexion longitudinale sur le parapet non-chargé



Figure 5.9 - Plan de rupture final d'une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité connectée

5.2.3 Essai sur deux parapets MTQ301 préfabriqués de 2 m connectés soumis à un chargement à l'extrémité libre

Pour ce dernier essai, le spécimen composé de deux parapets MTQ301 préfabriqués (déjà testé à l'extrémité connectée) est déplacé pour y appliquer le chargement à l'extrémité libre du parapet n'ayant pas été chargé à l'essai précédent. Comme la clé de connexion longitudinale liant les deux parapets a subi un endommagement important durant l'essai précédent, il apparaît très peu probable que celle-ci contribue dans cet essai à la reprise des efforts. Alors, ce qui est observé pendant cet essai c'est le comportement d'un parapet MTQ301 préfabriqué de 2 m de longueur soumis à un chargement excentré, soit la même condition selon laquelle le parapet hybride a été testé.

La Figure 5.10a présente l'évolution de la charge appliquée en fonction du déplacement horizontal, la Figure 5.10b montre l'évolution de la charge appliquée en fonction du soulèvement entre le parapet chargé et la dalle de pont, la Figure 5.10c présente l'évolution de la charge appliquée en fonction de la contrainte dans les barres d'armatures instrumentées dans la niche de connexion (cf. Section 4.4), la Figure 5.11 décrit l'évolution de la fissuration selon différents niveaux de chargement et la Figure 5.12 présente le plan de rupture final.

Tout d'abord, le spécimen a montré un comportement linéaire et élastique jusqu'à une charge de 100 kN (Figure 5.10a). Par la suite, un comportement non-linéaire est observé alors que la fissuration se développe à l'avant et sur le côté du parapet. La résistance maximale observée est de 293 kN pour un déplacement de 10.5 mm. Ensuite, la charge appliquée diminue lentement jusqu'à la fin de l'essai. Le déchargement est effectué lorsque le déplacement transversal atteint 20 mm. Tel qu'observé dans les modélisations numériques préliminaires, la résistance minimale de conception de 476 kN de conception n'est pas atteinte, cela est explicable par un chargement appliqué avec une plaque de 700 mm de longueur et l'utilisation de parapets de 2 m (cf. Section 3.6.1).

Le soulèvement du parapet par rapport à la dalle de pont augmente de façon graduelle tout au long du chargement jusqu'à l'atteinte de la valeur maximale de 0.52 mm lorsque la charge appliquée est maximale (Figure 5.10b).

La Figure 5.10c révèle que la contrainte dans la barre instrumentée provenant du parapet dans la niche de connexion a été pratiquement nulle pour une charge appliquée inférieure à 200 kN. À

partir de cette charge, elle a augmenté pour atteindre sa valeur maximale de 175 MPa. La contrainte dans la barre instrumentée provenant de la dalle a quant à elle augmenté de façon plus uniforme au cours du chargement et sa contrainte maximale a été de 275 MPa. Les contraintes maximales sont observées lorsque la charge appliquée est maximale.

Les premières fissures visibles à l'œil nu (Figure 5.11) sont apparues en premier lieu sur la face de côté du parapet vers 200 kN. À 250 kN, une nouvelle fissure oblique sur le côté apparaît et deux importantes fissures contournant la plaque de chargement apparaissent. Au pic de résistance la fissuration s'accroît grandement sur le côté du parapet et quelques fissures apparaissent à l'avant du parapet. Le plan de rupture final (Figure 5.12) correspond à une rupture en cisaillement autour de la plaque de chargement qui se poursuit obliquement sur le côté du parapet tel qu'observé pour les deux autres essais. Enfin, la fissuration produite pendant l'essai est perpendiculaire à celle résultante du premier essai sur ce spécimen, ce qui indique que la fissuration développée précédemment n'a pas influencé l'essai. Comme pour les deux autres essais, la dalle de pont n'a subi aucun endommagement. Lors de cet essai, un glissement inférieur à 0.01 mm a été mesuré entre le sol et le spécimen d'essai, ce qui correspond au glissement nul attendu.

Comme pour le parapet hybride, le plan de rupture se produit dans la partie supérieure du parapet et non par la plastification des barres d'armatures. Cela coïncide avec le mode de rupture observé pour un parapet coulé en place. L'utilisation de parapet préfabriqués n'influence donc pas le comportement parapet sur dalle de pont.

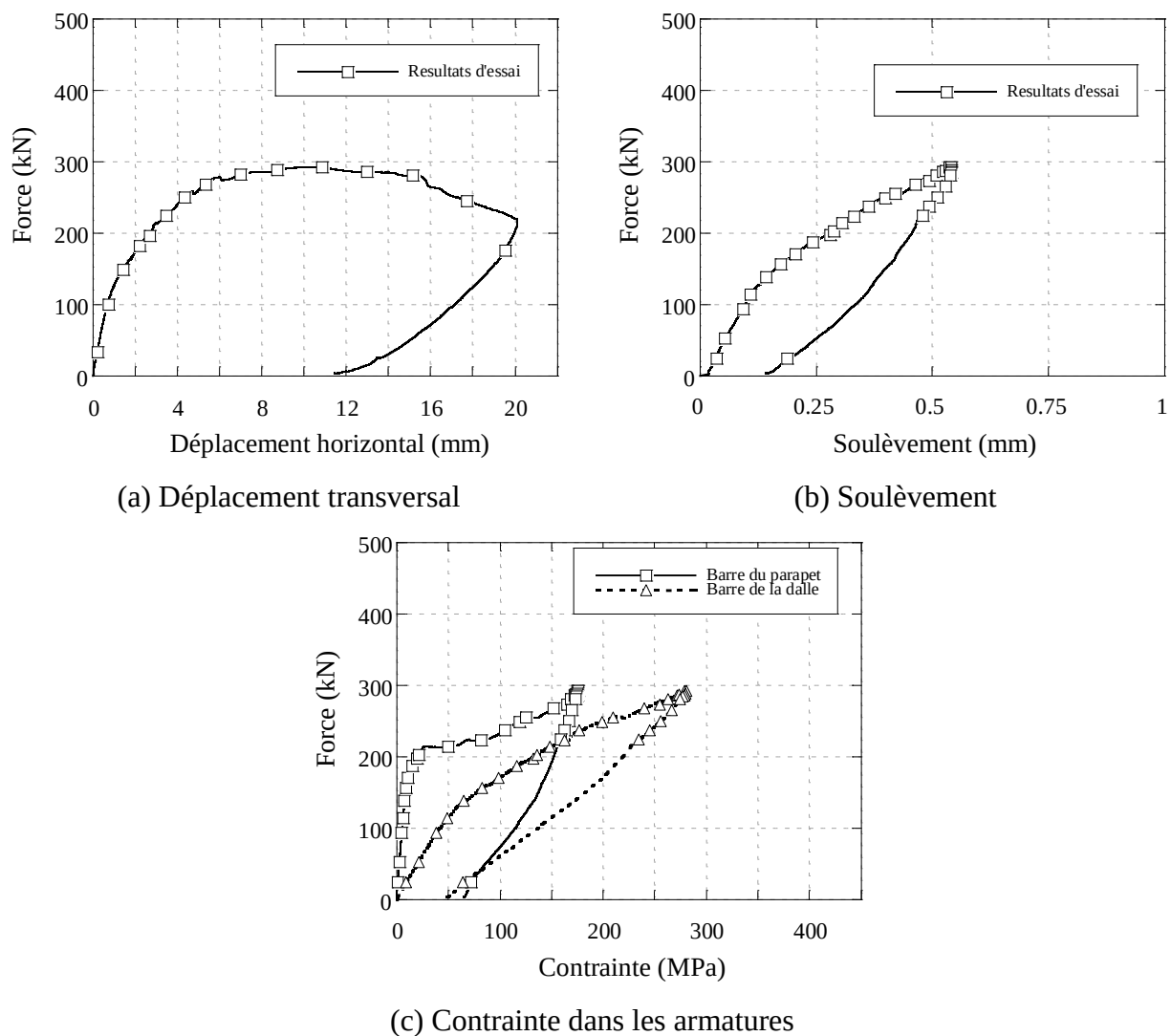


Figure 5.10 - Résultats d'essai sur une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité libre

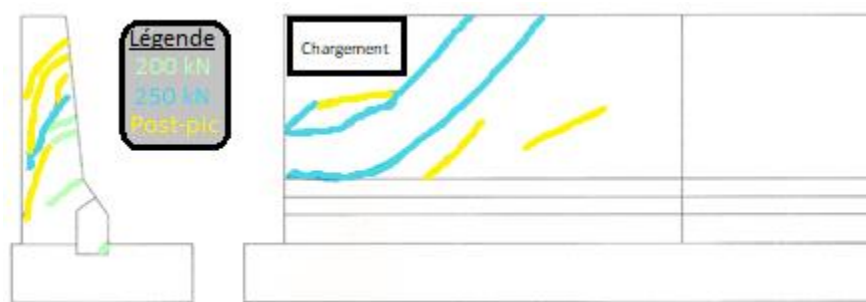


Figure 5.11 - Progression de la fissuration durant l'essai sur une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité libre

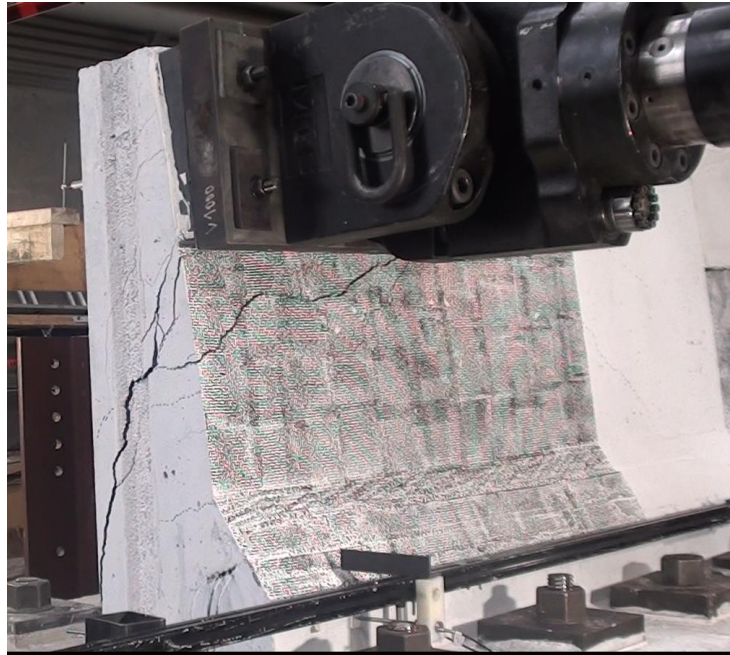


Figure 5.12 - Plan de rupture final d'une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité libre

5.2.4 Comparaison du comportement des parapets

Les courbes de comportement mécanique (force-déplacement horizontal) provenant des trois essais structuraux réalisés dans ce projet sont comparés à la Figure 5.13. Tout d'abord, les trois courbes montrent la même rigidité initiale, ce qui vient appuyer la correction faite à la courbe de résultat de l'essai sur une série de deux parapets MTQ301 chargée à l'extrémité connectée suite à un mouvement non désiré du spécimen pendant l'essai.

Ensuite, il est intéressant de faire des liens entre les deux essais réalisés sur le parapet MTQ301 préfabriqué. Lors de l'essai sur l'extrémité connectée et après la rupture du joint de connexion longitudinale, la résistance du parapet chargé avait chuté pour atteindre 300 kN. Ça a été interprété comme la résistance maximale d'un parapet MTQ301 préfabriqué de 2 m seul soumis à un chargement excentré. La résistance maximale de 293 kN mesurée lors de l'essai avec chargement excentré dans la zone non connectée, vient appuyer cette analyse. En réalité, les deux essais sur parapet MTQ301 préfabriqués ont permis d'obtenir deux mesures de la résistance pour un parapet seul soumis à un chargement excentré, soit 300 kN et 293 kN, et une mesure de la résistance avec

une continuité longitudinale mesurée à 359 kN. Il est alors possible de reconfirmer que le joint de connexion longitudinale permet d'obtenir de 59 kN à 66 kN de capacité supplémentaire.

En comparant les résultats du parapet hybride et du parapet MTQ301 préfabriqué soumis à la même condition de chargement excentré, il est possible d'observer que le parapet hybride a une résistance maximale nettement plus importante que le parapet MTQ301 préfabriqué. En effet, le parapet hybride a montré une capacité mécanique maximale supérieure de 135 kN (ou 46 %) par rapport au parapet MTQ301 préfabriqué lorsque soumis au même chargement excentré. En contrepartie, le parapet MTQ301 préfabriqué présente un comportement plus ductile que le parapet hybride.

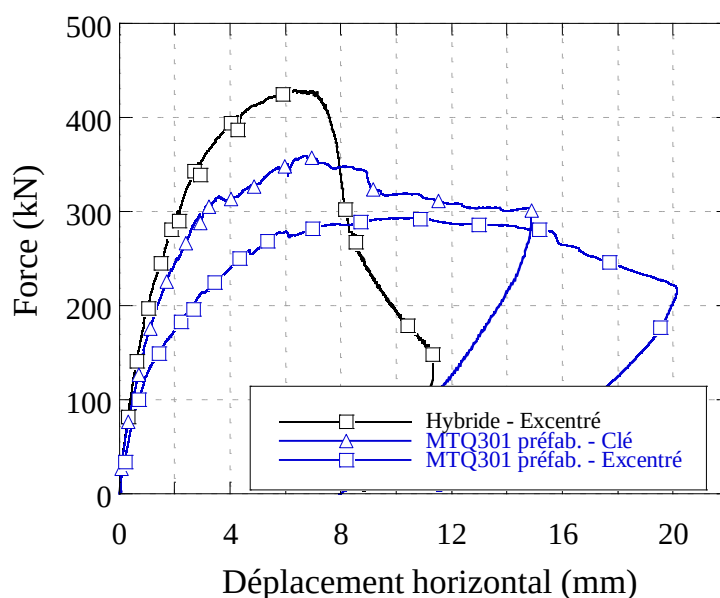


Figure 5.13 - Comparaison entre les résultats des trois essais sur parapet préfabriqués réalisés

CHAPITRE 6 RÉSULTATS DES MODÈLES NUMÉRIQUES

Ce chapitre présente les résultats des modélisations numériques réalisées pour reproduire le comportement mécanique des parapets testés et comparer les résultats numériques aux résultats expérimentaux. Cette comparaison permettra de confirmer la validité des modèles numériques utilisés dans l'étude paramétrique réalisée pour étudier les effets du pourcentage de fibres dans les BFUP, du retrait dans les niches de connexion, de l'excentricité de la charge, de la longueur des parapets et de la continuité longitudinale sur le comportement mécanique des parapets préfabriqués à (cf. Sections 3.5 et 3.6). Les modèles numériques finaux, validés sur les parapets préfabriqués de 2 m et une plaque de chargement de 700 mm (configuration des essais expérimentaux), seront également utilisés pour modéliser ces mêmes parapets avec cette fois une longueur de 4 m et une plaque de chargement de 2400 mm, tel que prescrit dans la norme CSA-S6 (2014). Ceci permettra de confirmer, avec un bon degré de confiance, que les parapets développés respectent les exigences de capacité de la norme CSA-S6 (2014).

La Section 6.1 indique les principales modifications effectuées entre les modèles numériques préliminaires (cf. Section 3.2) et les modèles finaux présentés dans cette section. Les résultats numériques obtenues avec ces modèles finaux sont ensuite comparés aux résultats expérimentaux aux Sections 6.2 et 6.3, respectivement pour le parapet hybride et pour le parapet MTQ301 préfabriqué. Enfin, la Section 6.4 présente la signification des analyses présentées dans cette section.

6.1 Principales modifications entre les modèles préliminaires et finaux

La majorité des paramètres des modélisations demeurent inchangés entre les modélisations préliminaires et les modélisations finales. Cependant, quelques paramètres ont été modifiés afin de bien représenter le comportement des spécimens d'essai. Les principales modifications apportées concernent les propriétés des matériaux, l'effet de l'orientation des fibres et l'effet du retrait.

6.1.1 Propriétés des matériaux

Les propriétés des matériaux constituant les parapets testés ayant été déterminées avec des essais de caractérisation lors de la phase expérimentale (cf. Section 5.1), elles ont été introduites dans les

modèles numériques finaux. Il est à noter que les valeurs de résistance à la traction pour les BO, tirés d'essais de traction indirecte par fendage, ont été diminués de 15% pour obtenir une valeur de résistance en traction directe requise dans les modèles.

6.1.2 Effet de l'orientation des fibres

Lors des essais de la Phase 1 (Charron et al., 2013) avec chargement central sur le parapet hybride préfabriqué, il avait été constaté que l'orientation des fibres dans la coque en BFUP était moins favorable que dans les spécimens de caractérisation, du fait des techniques de coulée différentes. Ceci avait amené à réduire la loi de traction du BFUP obtenue des essais de caractérisation, afin de modéliser adéquatement le comportement du BFUP dans la coque.

De la même manière, la loi de traction du BFUP obtenue des essais de caractérisation effectués dans ce projet a été réduite. Tel que montré à la Section 2.5.2, les travaux de Delsol (2012) ont en effet montré qu'une orientation intermédiaire (2D) des fibres, proche de ce qui est attendu dans la coque en BFUP, engendre une diminution d'environ 27 % de la contrainte maximale et d'environ 43 % de la déformation au pic. Les propriétés de traction des BFUP de la coque et de la niche de connexion ont été réduites selon les observations de Delsol (2012), les courbes de comportement en traction utilisée pour de la niche de connexion et de la coque sont présentées à la Section 6.1.3.

6.1.3 Effet du retrait

Afin de reproduire toutes les sollicitations qu'ont subi les spécimens d'essai, l'effet du retrait doit être considéré dans les modèles numériques. L'application du retrait dans les modèles s'avère être un processus complexe, puisqu'il est difficile de représenter correctement les conditions réelles de retenue des différents éléments selon la séquence de construction réelle. Afin de s'affranchir de ce problème, l'approche adoptée pour représenter l'effet du retrait consiste à appliquer une diminution des propriétés de traction des bétons.

En ce qui concerne les bétons ordinaires, leur retrait est restreint par la présence des barres d'armatures longitudinales. Cette restriction induit des contraintes de traction dans le BO. L'équation 6.1, proposée par l'ACI pour déterminer le retrait restreint par la présence d'armatures à partir du retrait libre et du taux de renforcement, a été utilisée pour estimer la valeur du retrait restreint dans le parapet MTQ301 préfabriqué.

$$\varepsilon_{cm} = \frac{\varepsilon_{sh}}{1 + n\rho}$$
Équation 6.1

Où :

ε_{cm} = le retrait restreint ($\mu\varepsilon$)

ε_{sh} = le retrait libre ($\mu\varepsilon$)

n = le ratio des modules E_s/E_c (-)

ρ = le ratio d'armatures A_s/A_c (-)

Dans le cas du parapet MTQ301 préfabriqué, le ratio d'armatures longitudinales est de 0.9 % et le retrait libre a été pris égal à 660 $\mu\varepsilon$ basé sur les valeurs de retrait obtenues sur un BO de 40 MPa à 180 jours (âge de l'essai sur le parapet MTQ301 préfabriqué) lors de travaux antérieurs (Bastien Masse, 2010). L'implémentation de ces valeurs dans l'équation 6.1 donne un retrait restreint de 615 $\mu\varepsilon$. La multiplication de ce retrait restreint par le module d'élasticité du BO à l'étude (24 900 MPa) résulte en contrainte de traction de 1.1 MPa induite par le retrait. La résistance en traction des parapets MTQ301 a donc été réduite de 1.1 MPa dans les modèles afin de représenter l'effet du retrait sur les spécimens d'essai.

La restriction du retrait du BFUP par le cœur en BO engendre, elle, un effort de traction dans le BFUP. La méthode de calcul adoptée pour le BO ne peut être appliquée, car il n'y a pas d'armatures dans la coque en BFUP. Un degré de restriction du retrait libre de 22.5 % a été considéré pour le BFUP, car cette valeur a été obtenue lors de mesure de retrait dans une réparation en BFUP sur une poutre de BO rigide (Charron et al., 2019). Il s'agit d'une condition similaire à celle de la coque de BFUP de 30 mm sur un parapet rigide. Considérant un retrait libre de 300 $\mu\varepsilon$ du BFUP à 180 jours et un degré de restriction de 22.5 %, le retrait restreint du BFUP induit une contrainte de traction de 2.5 MPa, ce qui implique une réduction de sa résistance de 18 % et de sa déformation au pic de 2 %. La réduction des propriétés en traction associée à la restriction du retrait affecte principalement la contrainte maximale et très peu la déformation au pic, puisqu'il s'agit d'une diminution de la partie élastique de la courbe, zone de comportement durant laquelle les déformations restent faibles. Le cumul des diminutions de propriétés en traction dues à l'effet d'orientation des fibres et du retrait restreint du BFUP induit une réduction de 45 % de la résistance maximale ainsi que de la déformation au pic. Il est difficile de connaître exactement le pourcentage de restriction du retrait du BFUP, car il est très dépendant de la qualité de la préparation de surface

de l'interface BO-BFUP. Il est également difficile de déterminer le pourcentage exact de réduction des propriétés associées à une orientation des fibres moins favorable. Néanmoins, la réduction totale de 45 % sur la résistance maximale et la déformation au pic sont cohérentes avec les données de Delsol (2012).

Les lois de traction directe obtenues des essais de caractérisation pour les BFUP utilisés dans la coque (BFUP 4%) et la niche (BFUP 3%), ainsi que les lois réduites associées, utilisées pour modéliser le comportement réel en traction du BFUP dans la coque et la niche, sont présentées à la Figure 6.1. Même si les résultats présentés à la Section 3.5.1.2 montrent qu'une diminution des propriétés de traction de la niche de connexion n'affecte pas le comportement global du parapet, les mêmes réductions ont été appliquées au BFUP de la niche de connexion par souci de cohérence.

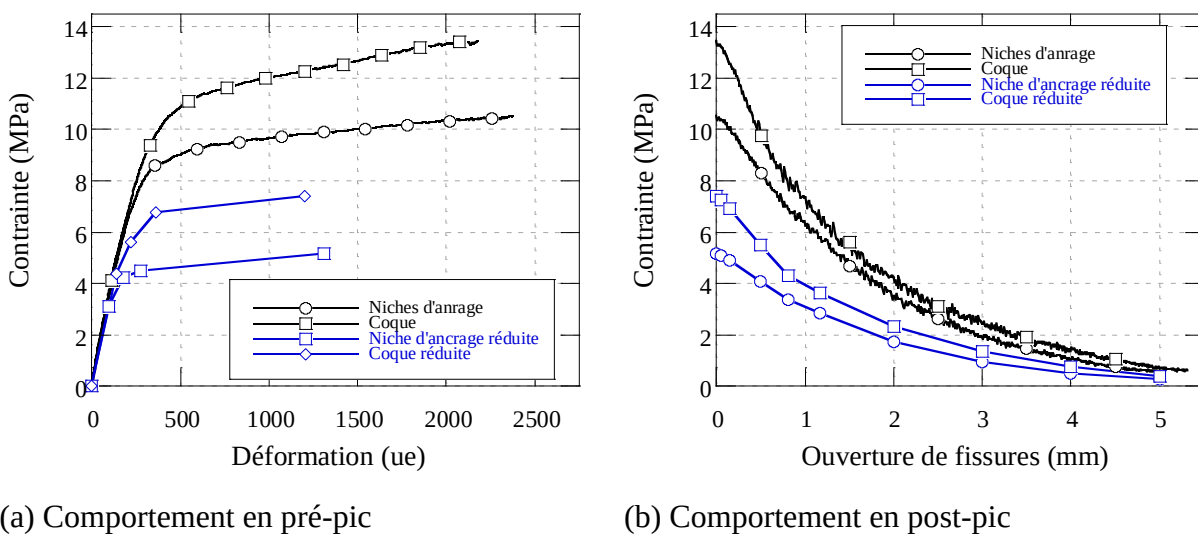


Figure 6.1 - Lois de comportement en traction considérés dans les modèles

6.1.4 Autres paramètres modifiés

Les modélisations préliminaires aux essais ont été réalisées avec un modèle de fissuration fixe (« fixed crack model »), c'est-à-dire que la direction de la fissure demeure fixe dans l'élément et identique à la direction de la contrainte principale lors de l'initiation de la fissure. Avec ce type de modèle, lorsque les axes des déformations principales tournent, des contraintes de cisaillement sont

générées sur les faces de la fissure et le comportement global est donc dépendant de la loi de comportement en cisaillement introduit dans le modèle. La rupture finale des parapets est en cisaillement. Or, il n'y a pas eu d'essai de caractérisation effectué en cisaillement sur les bétons afin d'avoir une loi de comportement fiable en cisaillement. Idéalement, un modèle de fissuration tournante aurait été utilisé. Un problème technique du logiciel ne le permettait pas. Un modèle de fissuration tournante partielle a donc été sélectionné, il considère un modèle à fissuration fixe jusqu'à atteindre 25 % de la résistance en traction du béton, puis considère ensuite un modèle à fissuration tournante. Ce choix du modèle était préférable à celui de fissuration fixe pour mieux reproduire le développement de la fissuration en cisaillement se développant dans les parapets.

6.2 Modèle du parapet hybride

6.2.1 Comparaison des résultats numérique et expérimentaux

Le comportement numérique global force-déplacement du parapet hybride de 2 m soumis à un chargement excentré appliqué avec une plaque de chargement de 700 mm de longueur est comparé aux résultats expérimentaux obtenus pour les mêmes conditions d'essai à la Figure 6.2. L'exigence de capacité définie par la norme CSA est également indiquée en pointillé rouge. Le modèle numérique montre un comportement linéaire élastique jusqu'à une charge de 180 kN avec une rigidité initiale très similaire à celle obtenue expérimentalement (Figure 6.2a). Par la suite, le comportement devient non-linéaire et la rigidité à l'état fissuré reste très similaire à l'expérimental jusqu'à atteindre une charge maximale de 442 kN à 5.7 mm de déplacement horizontal, soit une charge très proche (+ 3.3 %) de la charge maximale expérimentale de 428 kN obtenue pour un déplacement transversal de 6.3 mm. Le modèle montre une perte de capacité moins brusque que ce qui a été observé lors de l'essai, le comportement post-pic n'est donc pas parfaitement représenté numériquement.

La Figure 6.3 et la Figure 6.4 comparent la fissuration du modèle numérique à la fissuration observée pendant l'essai. Tout comme lors des essais expérimentaux (Figure 6.3b), les premières fissures dans le modèle apparaissent au point de changement de pente du parapet avant d'atteindre la charge de 400 kN (Figure 6.3a). La fissuration se développe ensuite autour de la plaque de chargement vers le haut du parapet et cette fissuration se poursuit sur le côté du parapet. Ces fissures correspondent au plan de rupture final, associé à une fissure de cisaillement qui contourne

la plaque de chargement et qui se poursuit sur l'extrémité du parapet, tel qu'illustré à la Figure 6.4. Le processus de fissuration dans le parapet hybride ainsi que le mode de rupture final est très similaire à ce qui a été observé lors des essais expérimentaux (cf. Section 5.2.1). Par ailleurs, le modèle numérique ne présente aucun endommagement de la dalle de pont, tel qu'observé lors de l'essai.

Finalement, des jauges de déformation étaient positionnées sur certaines barres d'armatures dans la niche de connexion des parapets (cf. Section 4.4). Les contraintes dans les barres d'armatures ont été relevées aux mêmes endroits dans le modèle numérique à titre de comparaison. Les données numériques et expérimentales de la force en fonction des contraintes dans les barres d'armatures instrumentées sont comparées à la Figure 6.5. Cette figure illustre que le modèle numérique reproduit très bien les données expérimentales avec sous-estimation de 11 % sur la mesure de la contrainte maximale de la barre du parapet et une sous-estimation de 3 % pour la barre de la dalle.

En résumé, le modèle du parapet hybride reproduit de manière très satisfaisante son comportement expérimental, soient la rigidité initiale, la rigidité à l'état fissuré, le patron de fissuration, la charge maximale et la contrainte dans les barres armatures.

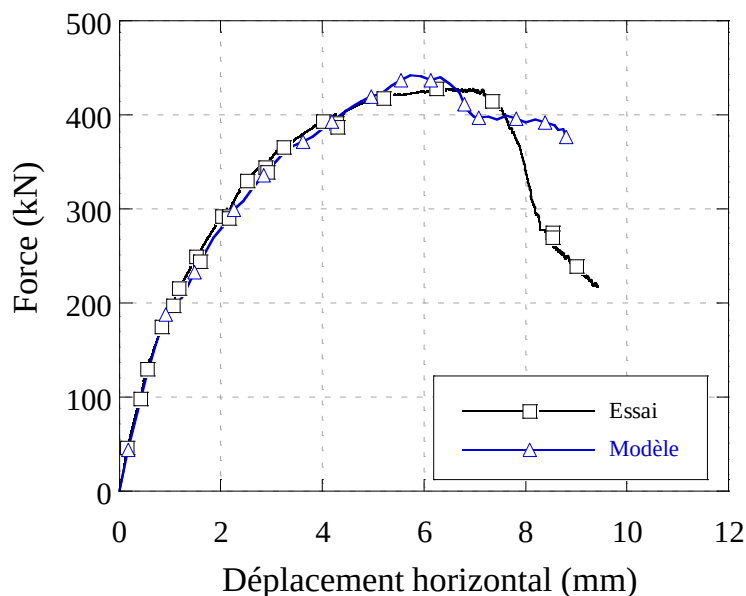
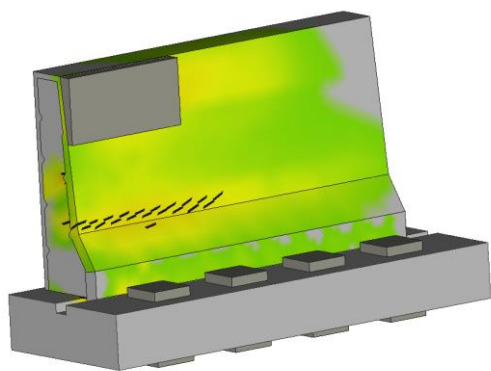


Figure 6.2 - Comparaison entre la courbe force-déplacement transversal expérimentale et numérique pour l'essai de chargement excentré sur parapet hybride

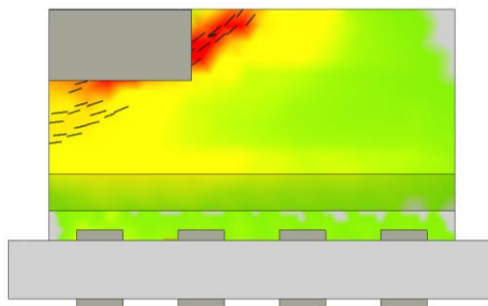
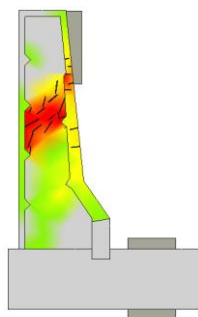


(a) Modèle numérique (à 384 kN, $w > 0,1$ mm)



(b) Résultats expérimentaux (à 400 kN)

Figure 6.3 - Comparaison de fissuration pour une charge appliquée d'environ 400 kN pour l'essai de chargement excentré sur parapet hybride



Résultats numériques ($w > 0,3$ mm)



Résultats expérimentaux

Figure 6.4 - Comparaison des plans de rupture finaux pour l'essai de chargement excentré sur parapet hybride

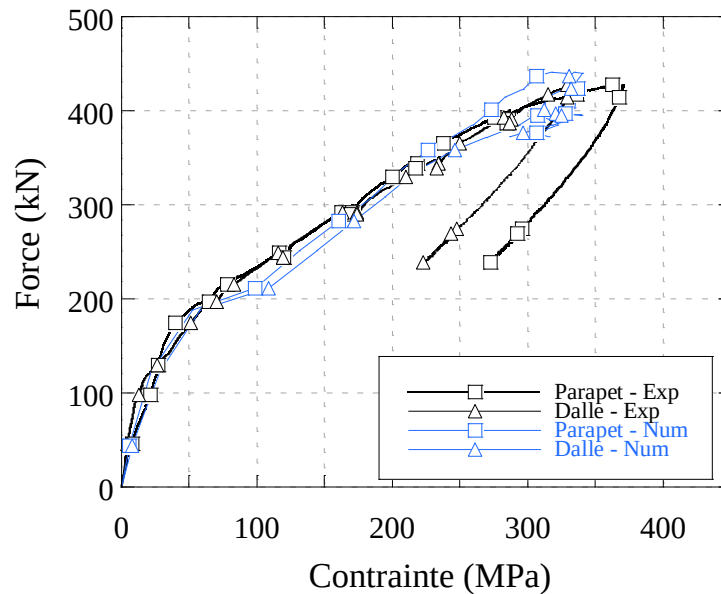


Figure 6.5 - Comparaison de l'évolution de la contrainte dans les barres d'armatures instrumentées expérimentale et numérique pour l'essai de chargement excentré sur parapet hybride

6.2.2 Validation de la performance du parapet hybride selon la norme CSA-S6

Tel que déjà mentionné à la Section 5.2.1, la capacité maximale du parapet hybride est inférieure à la charge pondérée de conception, de 476 kN. Ceci s'explique par le fait que pour des questions pratiques (cf. Section 4.1.2), les essais ont été réalisés dans des conditions expérimentales plus pénalisantes que les conditions prescrites par la norme CSA-S6. Il s'agit de l'étude de parapets de 2 m plutôt que 4 m et de l'utilisation d'une plaque de chargement de 700 mm de longueur par rapport à un chargement sur une longueur de 2400 mm (cf. Section 3.6.3), tel que prescrit par la norme pour cette catégorie de parapet (TL-5). Le modèle numérique du parapet hybride permettant de bien reproduire les résultats expérimentaux, celui-ci peut être utilisé pour confirmer la performance du parapet hybride selon les critères de la norme CSA-S6, soit en utilisant des parapets de 4 m de longueur chargés sur une longueur de 2400 mm. Une plaque de chargement de 2400 x 100 x 113 mm³ a été utilisée pour effectuer cette nouvelle modélisation Celle-ci a été réalisée pour deux conditions de chargement, soit un chargement centré et un chargement appliqué à l'extrémité. Les résultats de ces modélisations sont résumés à la Figure 6.6 et au Tableau 6.1. Le concept de

parapet hybride sollicité tel que requis dans la norme CSA-S6 surpasse largement la charge pondérée de conception. Pour un chargement centré, la capacité maximale du parapet hybride surpasse de 69 % la charge pondérée de conception et pour le cas de chargement excentré, qui est le cas de chargement critique, cette charge de conception est surpassée de 43 %. Le patron de fissuration obtenu pour les deux cas de chargement est illustré à la Figure 6.7. Tel que décrit à la Section 3.6.3, le plan de rupture est beaucoup plus long avec cette plaque de chargement et correspond à un mode de rupture mixte en flexion-cisaillement contrairement à une rupture seulement en cisaillement qui a été observée lors de l'essai de chargement excentré via la plaque de chargement de 700 mm sur un parapet hybride. Ceci fait participer davantage de matériau (béton et armature) au mécanisme de rupture et hausse significativement la résistance. La Figure 6.8 permet d'observer qu'il n'y a aucune plastification dans les barres d'armatures de la niche de connexion.

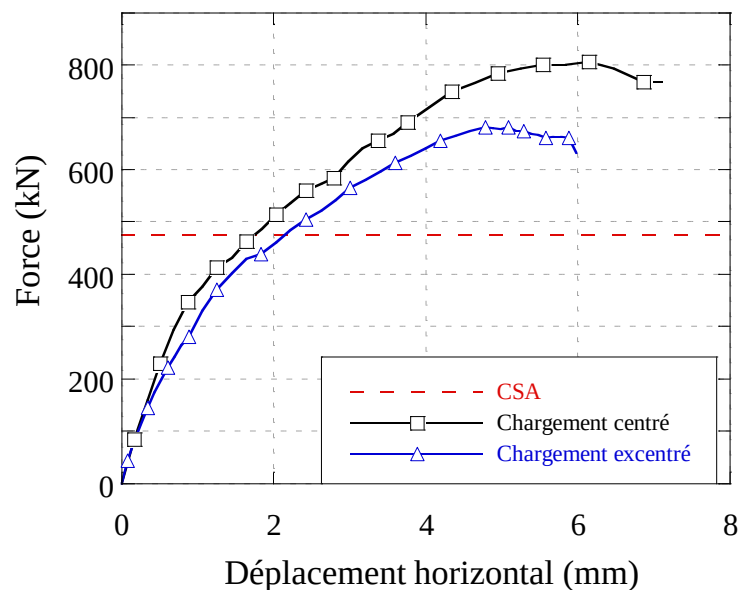
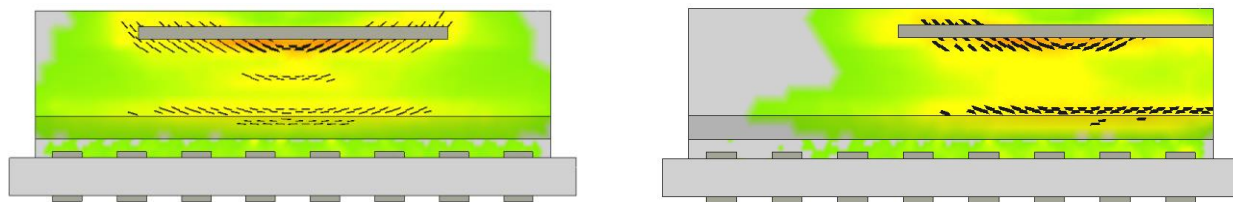


Figure 6.6 - Parapet hybride de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm³

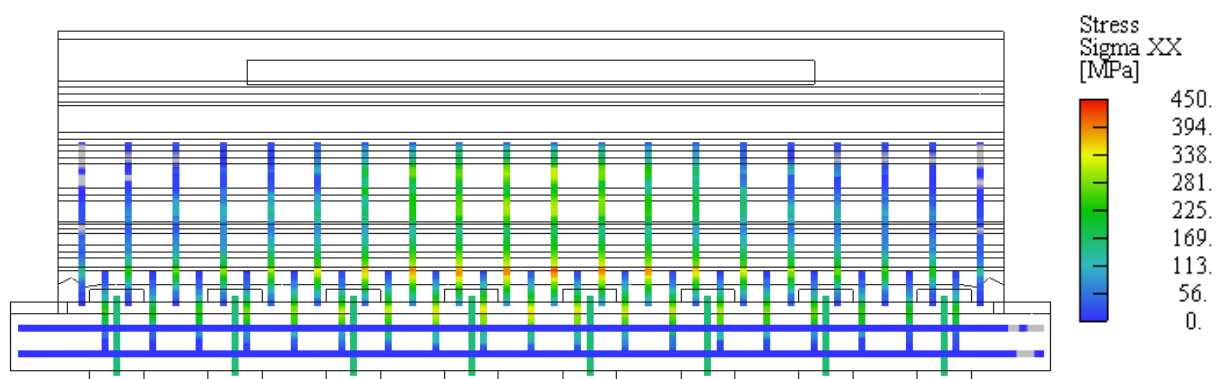
Tableau 6.1 - Capacité maximale d'un parapet hybride de 4 m chargé par une plaque de chargement de 2400 mm

Chargement	F _{max} (kN)	Variation F _{max} vs exigence CSA
Centré	806	+ 69.3 %
Excentré	682	+ 43.3 %

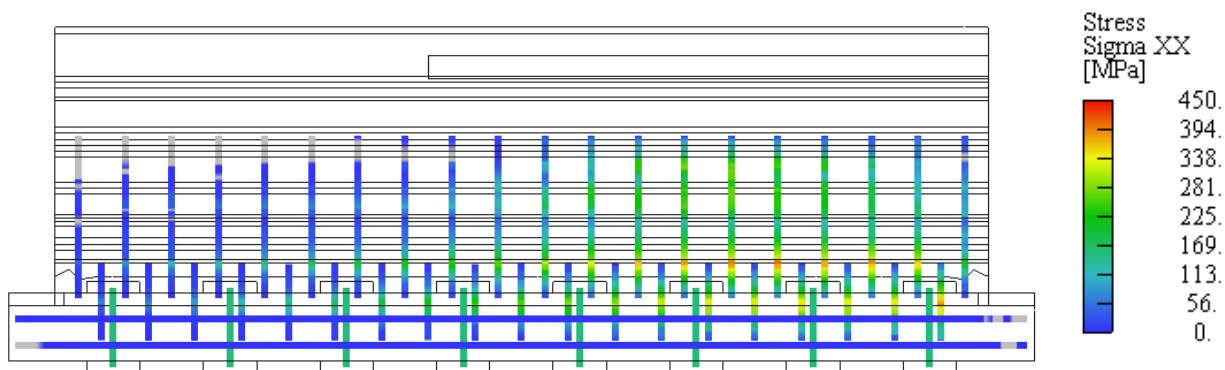


(a) Chargement centré (à 806 kN, $w > 0,1$ mm) (b) Chargement excentré (à 682 kN, $w > 0,1$ mm)

Figure 6.7 - Patron de fissuration à la rupture de parapet hybride soumis à des chargement centré et excentré par une plaque de chargement de 2400 mm



a) Chargement au centre (à 806 kN)



b) Chargement à l'extrémité (à 682 kN)

Figure 6.8 - Contraintes maximales dans les barres d'armature d'un parapet hybride de 4 m chargé par une plaque de chargement de 2400 mm

6.3 Modèle du parapet MTQ301 préfabriqué

Deux essais ont été réalisés sur le parapet MTQ301 préfabriqué, soit l'essai sur l'extrémité connectée (cf. Section 5.2.2) et l'essai sur l'extrémité libre (cf. Section 5.2.3). Des modélisations numériques reproduisant les conditions de ces essais ont été effectuées afin d'être comparés aux résultats d'essai.

Les résultats de la modélisation sont comparés aux résultats expérimentaux à la Section 6.3.1 et à la Section 6.3.2 respectivement pour l'essai sur l'extrémité connectée et l'essai sur l'extrémité libre. Enfin, le modèle final validé permettra de procéder à des modélisations du parapet MTQ301 préfabriqué selon les critères de la norme canadienne CSA-S6 à la Section 6.3.3

6.3.1 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour le chargement sur l'extrémité connectée

Les résultats des modélisations sont comparés aux résultats expérimentaux de la Figure 6.9 à la Figure 6.12. La Figure 6.9 compare la courbe de comportement mécanique force-déplacement numérique à la même courbe mesurée expérimentalement. Celle-ci permet d'observer que le modèle montre la bonne rigidité initiale en condition non fissurée, mais diffère légèrement par la suite de la courbe expérimentale. Le modèle est légèrement plus rigide en condition non fissurée et légèrement moins rigide en condition fissurée. Somme toute, l'allure de la courbe force-déplacement est dans l'ensemble bien reproduite numériquement. La capacité maximale a été de 359 kN pendant, l'essai alors que le modèle montre une capacité maximale de 381 kN soit 6 % d'écart entre les deux valeurs. Cependant, à partir du maximum de résistance, le modèle n'arrive plus à converger. Le calcul se termine donc au pic et il n'est pas possible d'obtenir le comportement post-pic.

La Figure 6.10 et la Figure 6.11 comparent la fissuration du modèle numérique à la fissuration observée pendant l'essai. Tout comme lors de l'essai, les premières fissures apparaissent au point de changement de pente du parapet (Figure 6.10) à une charge d'environ 250 kN. Par la suite, d'autres fissures se développent dans la partie supérieure du parapet autour de la plaque de chargement et la fissure principale se développe sur le dessus du parapet non chargé. Lors de l'essai, une rupture en deux temps a été observée. Premièrement, une fissure à 45 degrés se développe sur la face supérieure et à l'arrière du parapet adjacent. Puis, à partir du moment où une

rupture se produit à l'arrière du parapet adjacent, le joint de connexion longitudinal ne reprend plus vraiment d'efforts et le parapet chargé supporte seul les efforts. La rupture finale est similaire à une rupture retrouvée sur un parapet seul chargé à son extrémité. Numériquement, la première phase de la rupture est bien reproduite autant au niveau du patron de fissuration (Figure 6.11) qu'au niveau de la charge maximale (Figure 6.9). Cependant, à partir du moment où une rupture se produit à l'arrière du parapet adjacent, le modèle n'arrive plus à converger, probablement dû à la difficulté à réaliser les calculs numériques dans cette zone de rupture. Le calcul se termine donc au pic et il n'est pas possible d'obtenir la deuxième phase de la rupture.

Ensuite, la Figure 6.12 compare l'évolution de la contrainte dans les barres d'armatures instrumentées de la niche de connexion (cf. Section 4.4). Les résultats numériques représentent globalement bien l'allure de la courbe expérimentale. Le comportement dans la phase de comportement linéaire est bien reproduit. Par la suite, les contraintes obtenues numériquement sont généralement un peu plus faibles que les données expérimentales. À la fin du chargement cet écart est d'environ 30 % pour la barre instrumentée du parapet et de 23 % pour la barre de la dalle. La Figure 6.13 permet d'observer la contrainte dans les barres d'armature au moment où la force appliquée est maximale. Cela permet d'observer qu'aucune des barres d'armatures du parapet ou de la niche de connexion ne plastifie, ce qui confirme que la rupture observée correspond à une rupture en cisaillement dans la partie supérieure du parapet.

En résumé pour cet essai, le modèle a permis de représenter de façon adéquate le comportement force-déplacement (Figure 6.9) jusqu'à l'atteinte de la rupture à l'arrière du joint. A partir de ce point le modèle ne peut représenter le comportement post-pic observé. Le patron de fissuration (Figure 6.10 et Figure 6.11) est bien reproduit, tandis que les contraintes dans les barres d'armatures (Figure 6.12) sont, dans l'ensemble, légèrement moindres que celles obtenues expérimentalement. Ces constats permettent de conclure que le modèle numérique reproduit de façon satisfaisante les résultats expérimentaux.

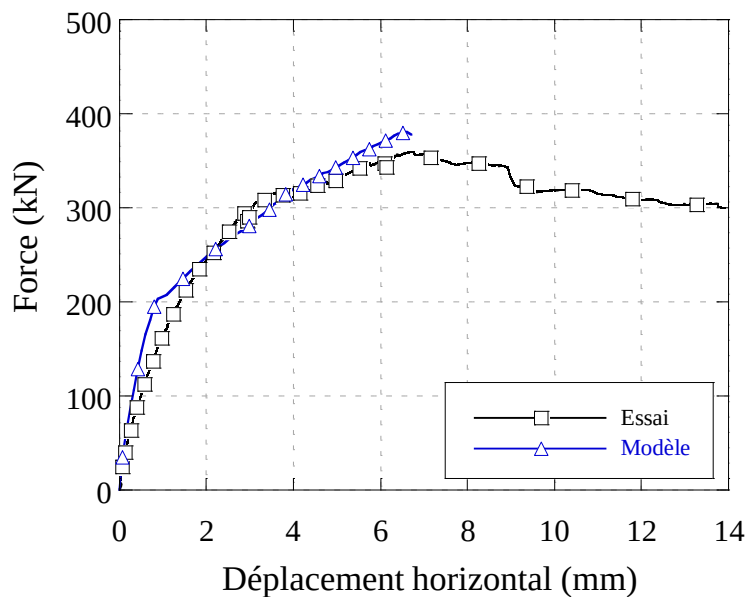
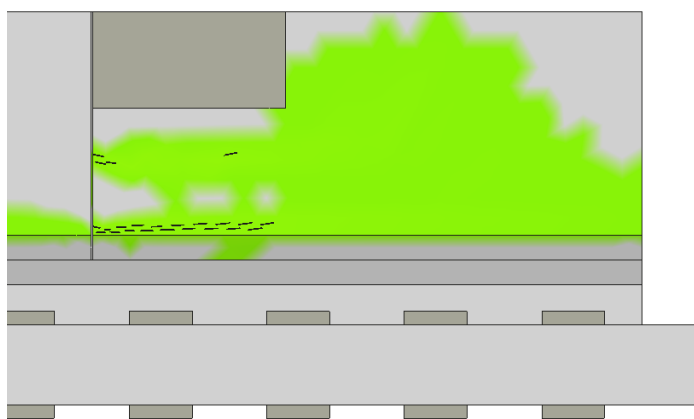
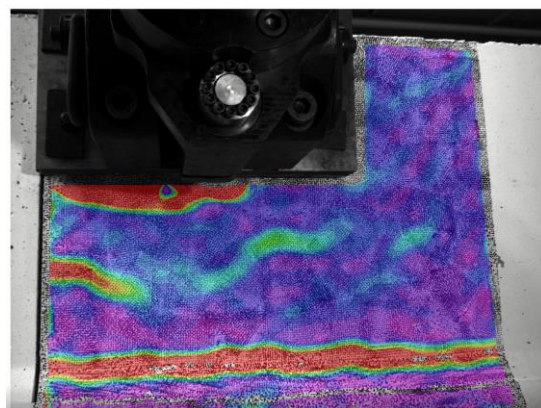


Figure 6.9 - Comparaison entre la courbe force-déplacement transversal expérimentale et numérique pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué



(a) Modèle numérique (à 215 kN, $w > 0,1$ mm)



(b) Résultats expérimentaux (environ à 250 kN)

Figure 6.10 - Comparaison de fissuration pour une charge appliquée d'environ 250 kN pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué

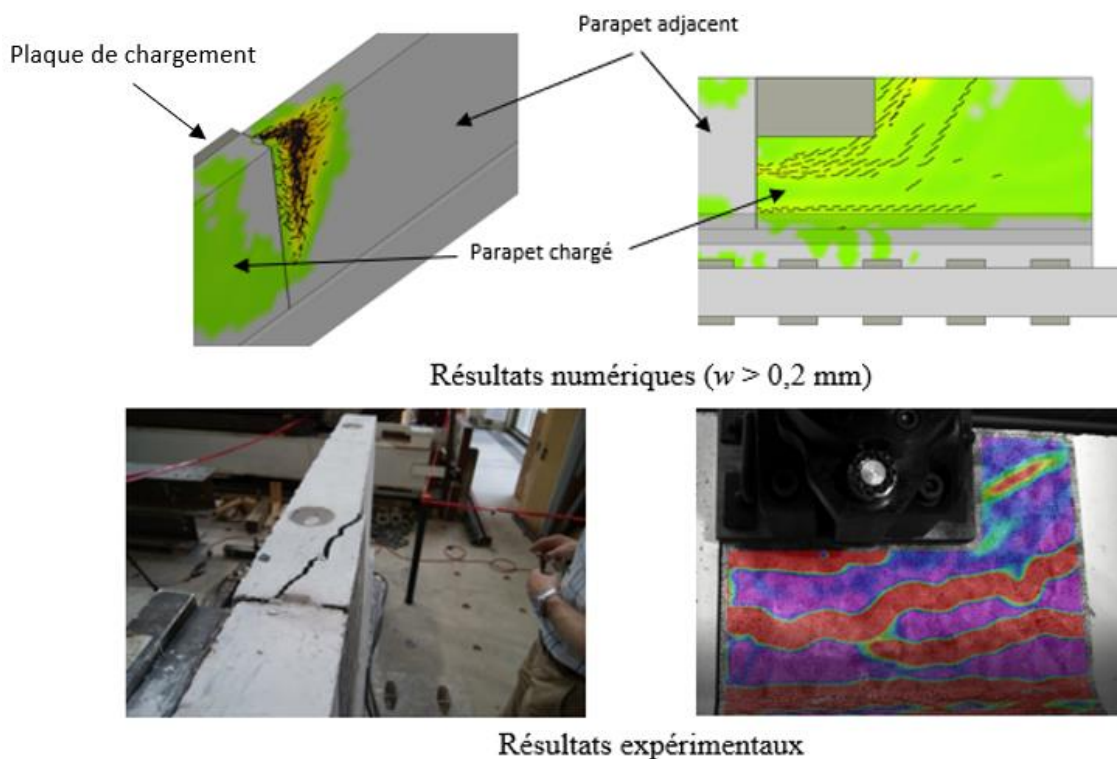


Figure 6.11 - Comparaison des plans de rupture fins pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué

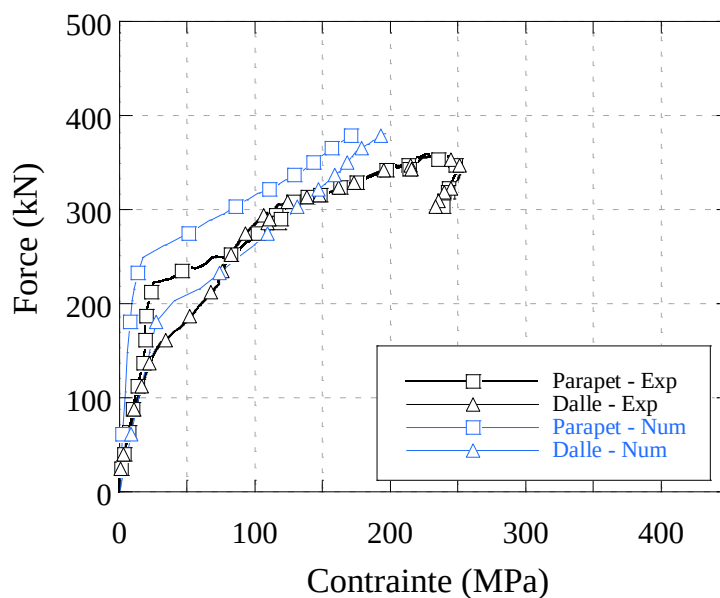


Figure 6.12 - Comparaison entre le modèle numérique et les résultats expérimentaux de l'évolution de la contrainte dans les barres d'armatures instrumentées pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué

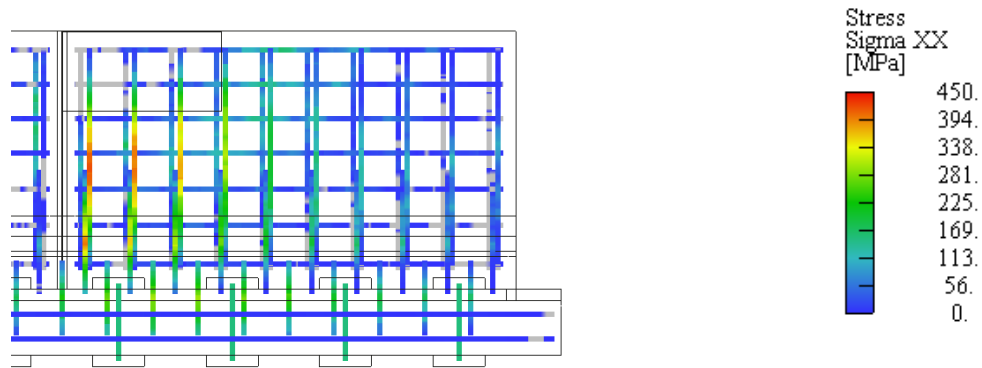


Figure 6.13 - Contrainte maximale dans les barres d'armature au pic de la courbe force-déplacement pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité non connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué

6.3.2 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour le chargement à l'extrémité non-connectée

Pour ce deuxième essai, le chargement est appliqué à l'extrémité libre (non-connectée) de la série de deux parapets MTQ301 préfabriqués par une plaque de chargement de 700 mm de longueur. Cet essai a été réalisé sur la même série de parapets que l'essai précédent, tel qu'expliqué à la Section 4.1.2. Cette séquence de chargement de la série de deux parapets (tout d'abord sur l'extrémité connectée puis sur l'extrémité non connecté du parapet adjacent) n'a pas été reproduite numériquement. Ceci a permis de simplifier les modèles et était justifiable car le joint longitudinal a un faible impact sur le comportement d'un parapet chargé sur son extrémité non connecté (Section 5.2.3).

La Figure 6.14 compare la courbe de comportement force-déplacement obtenue numériquement à la courbe mesurée expérimentalement. Sur cette figure, le modèle reproduit bien la partie linéaire élastique de la courbe jusqu'à une charge appliquée de 100 kN. Les rigidités initiales en condition non fissurée et fissurée numériques sont les mêmes que celles observées expérimentalement. Les courbes sont superposées avant que le modèle n'atteigne son pic de résistance. La charge maximale est évaluée à 292 kN par le modèle numérique, alors que la capacité maximale lors de l'essai a été de 293 kN, soit moins de 1 % d'erreur sur cette mesure. Après que le modèle ait atteint son pic, la

courbe numérique et la courbe expérimentale se séparent et le modèle montre un comportement un peu moins ductile que ce que l'essai. Une partie de cette différence pourrait être expliquée par le fait que, lors de l'essai, la plaque de chargement suit la déformation du parapet et effectue une légère rotation autour de l'axe transversal du parapet, alors que la direction du chargement reste fixe dans le modèle numérique. Cette rotation de la plaque dans l'essai modifie possiblement un peu le faciès de fissuration et fait contribuer davantage les armatures longitudinales du parapet, ce qui peut augmenter la ductilité à la rupture.

La Figure 6.15 et la Figure 6.16 comparent la fissuration du modèle numérique à la fissuration observée expérimentalement. Le modèle reproduit les fissures dans le même ordre que lors de l'essai c'est-à-dire qu'elles apparaissent tout d'abord au point de changement de pente du parapet et sur le côté du parapet vers la charge de 180 kN (Figure 6.15). Lors de l'essai, les premières fissures sur le côté du parapet ont été observées autour de 200 kN et celles sur la face avant du parapet vers 250 kN. Il faut garder en mémoire que le modèle permet d'observer les fissures mêmes lorsqu'elles sont très fines, alors que lors de l'essai celles-ci doivent être assez ouvertes pour être visibles à l'œil nu. Le patron de fissuration à la rupture relevé par le modèle numérique est comparé au patron observé lors de l'essai par le système de corrélation d'image à la Figure 6.16. La similitude entre la fissuration numérique et expérimentale, est évidente avec une rupture en cisaillement autour de la plaque de chargement. La dalle de pont ne subit aucun endommagement lors de la modélisation numérique comme lors de l'essai.

La Figure 6.17 compare l'évolution de la charge appliquée en fonction de la contrainte dans les barres d'armature pour les barres instrumentées du parapet et de la dalle. La mesure de la contrainte se fait dans la niche de connexion (cf. Section 4.4). À première vue, les résultats numériques présentent des tendances similaires aux courbes expérimentales, bien que le premier changement de pente se produit de manière plus prématurée numériquement. La contrainte maximale pour la barre du parapet est évaluée numériquement à 186 MPa alors que les résultats d'essai ont mesuré cette contrainte à 176 MPa. Pour la barre de la dalle la contrainte maximale numérique a été de 320 MPa contre 281 MPa selon les résultats expérimentaux. Les écarts sur les contraintes maximales sont donc relativement faibles (6 % et de 14 % respectivement pour la barre du parapet et la barre de la dalle). La Figure 6.18 présente la contrainte maximale dans toutes les barres d'armatures du parapet au pic de la courbe force-déplacement, soit au moment où les contraintes sont maximales dans les barres d'armatures. Même si aucune comparaison ne peut être faite avec

les résultats d'essai puisque des jauges de déformation ont seulement été placées sur certaines barres dans la niche, il est intéressant d'observer qu'aucune des barres d'armatures ne plastifie dans le parapet ou dans la niche. Cela confirme que c'est bel et bien une rupture en cisaillement dans le haut du parapet qui est observée.

En résumé pour cet essai, bien que le comportement numérique soit un peu moins ductile que ce qui a été observé expérimentalement, le modèle a permis de bien représenter le comportement force - déplacement (Figure 6.14). Les rigidités en condition non-fissurée et fissurée et charge maximale ont bien été reproduites. Comme pour les autres essais, le patron de fissuration du modèle numérique reproduit très bien la fissuration de l'essai (Figure 6.15 et Figure 6.16). Le modèle numérique permet de bien reproduire la contrainte maximale dans les barres d'armatures instrumentées (Figure 6.17). Tous ces éléments permettent d'affirmer que le modèle numérique du parapet MTQ301 préfabriqué permet de reproduire de manière satisfaisante le comportement expérimental de cet essai.

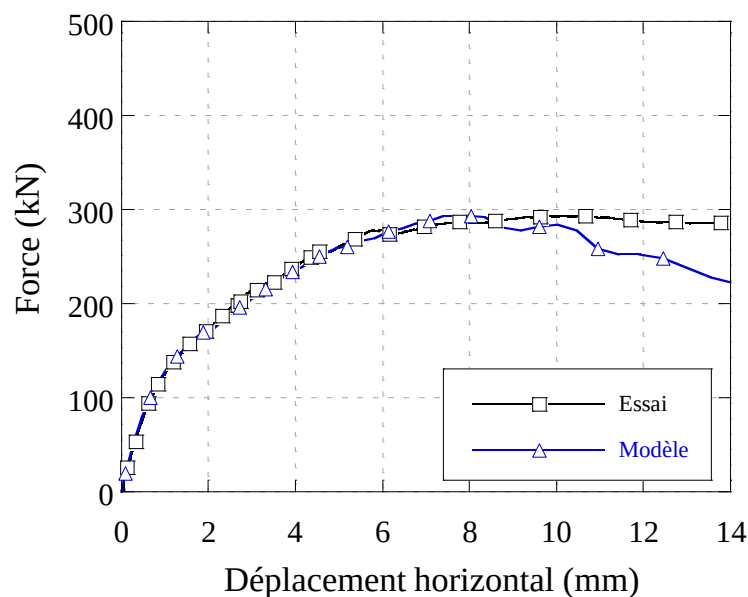
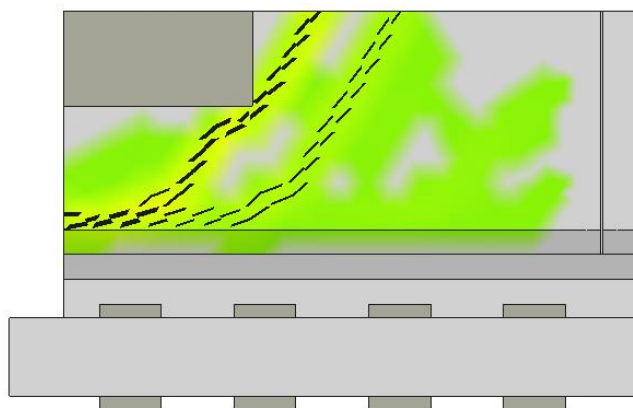
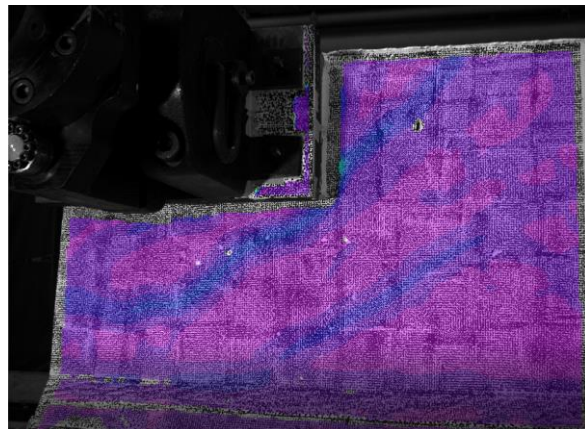


Figure 6.14 - Comparaison entre la courbe force-déplacement transversal expérimentale et numérique pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité non-connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué

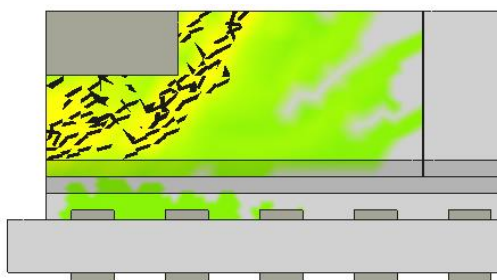
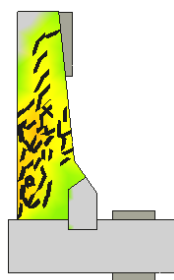


(a) Modèle numérique (à 180 kN, $w > 0,1$ mm)

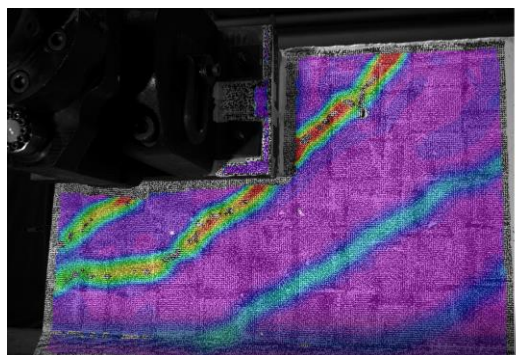


(b) Résultats expérimentaux (environ à 250 kN)

Figure 6.15 - Comparaison de fissuration pour une charge appliquée d'environ 200 kN pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité non-connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué



Résultats numériques ($w > 0,5$ mm)



Résultats expérimentaux

Figure 6.16 - Comparaison des plans de rupture finaux pour l'essai de chargement excentré sur parapet MTQ301 préfabriqué

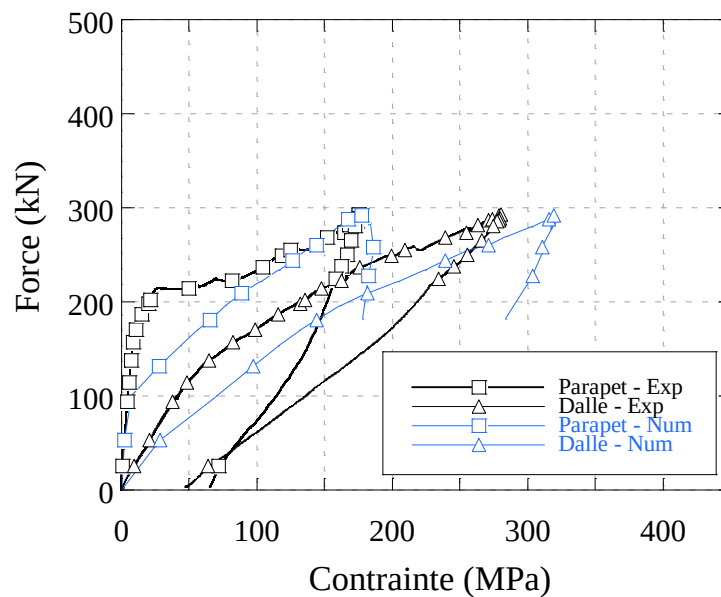


Figure 6.17 - Comparaison entre le modèle numérique et les résultats expérimentaux de l'évolution de la contrainte dans les barres d'armatures instrumentées pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité non connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué

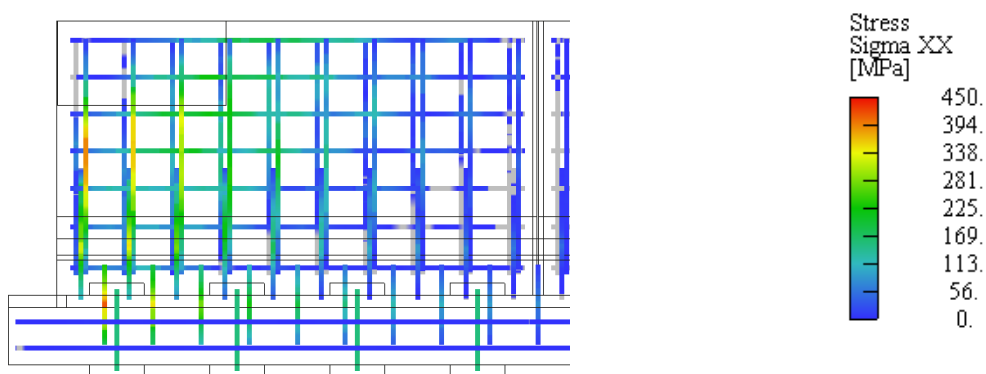


Figure 6.18 - Contrainte maximale dans les barres d'armature au pic de la courbe force-déplacement pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité non connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué

6.3.3 Validation de la performance du parapet MTQ301 préfabriqué selon les critères de la norme CSA-S6

Le modèle du parapet MTQ301 préfabriqué a permis de représenter adéquatement le comportement des deux essais réalisés sur ce parapet. Pour les deux essais, le comportement force-déplacement ainsi que la fissuration ont été bien reproduits numériquement. Cela permet de considérer le modèle du parapet MTQ301 préfabriqué comme valide.

Les conditions expérimentales étant plus critiques que les conditions prescrites par la norme CSA-S6, les résultats d'essai ne permettent pas de conclure sur la validité du parapet MTQ301 préfabriqué. C'est pourquoi, dans cette section il est question d'utiliser le modèle validé du parapet MTQ301 préfabriqué pour évaluer la performance de ce modèle de parapet selon les critères de la norme CSA-S6. Pour ce faire, des modélisations de parapets de 4 m chargés via une plaque de chargement de 2400 mm ont été réalisées. Tout d'abord, des modélisations pour un chargement centré et un chargement excentré ont été réalisées sur un parapet seul. Puis, puisque l'effet du joint longitudinal a été étudié sur le parapet MTQ301 préfabriqué, des modélisations pour un chargement centré sur un parapet et un chargement appliqué à l'extrémité connectée d'un parapet ont été réalisées sur une série de deux parapets de 4 m avec un joint longitudinal.

Les résultats de ces modélisations sont présentés à la Figure 6.19, à la Figure 6.20 et à la Figure 6.21. Les capacités maximales sont résumées au Tableau 6.2. L'analyse de ces résultats permet tout d'abord de constater que pour les quatre cas de chargement étudiés, la charge pondérée de conception est surpassée d'au moins 37 %. Le cas de chargement critique demeure le cas de chargement excentré, mais la différence est faible par rapport au cas de chargement centré, soit de 2.3 %. L'ajout d'un joint de connexion longitudinal permet d'obtenir des capacités maximales quelque peu supérieures au cas sans connexion longitudinale. Plus précisément, le joint longitudinal permet d'obtenir une capacité maximale 5.7 % supérieure dans le cas d'un chargement centré et de 3.2 % lors d'un chargement excentré. Les résultats obtenus correspondent à ce qui avait été observé dans l'étude paramétrique (cf. Section 3.6.3 et 3.6.4). L'analyse des plans de rupture (Figure 6.20) permet d'observer la similitude entre les plans de fissuration pour les quatre configurations de chargement présentées. Cette similitude explique la faible différence de capacité maximale entre les configurations étudiées (chargement centré, chargement excentré, présence de joint longitudinal) puisque sensiblement le même volume de béton et la même quantité d'armatures

contribuent à la reprise de l'effort. Le mode de rupture observé correspond à un mode de rupture mixte en flexion-cisaillement, qui peut être observée par l'analyse du patron de fissuration (Figure 6.20) et par l'analyse de la contrainte maximale dans les barres d'armatures (Figure 6.21). En effet, la fissure principale qui contrôle la rupture contourne la plaque de chargement et donne l'impression d'une rupture en cisaillement, alors que certaines barres d'armatures plastifient dans le haut du parapet indiquant une rupture en flexion (couleur noire sur la Figure 6.21). Les barres d'armatures de la niche de connexion restent élastiques. L'utilisation d'une plaque de 2400 mm permet d'obtenir le mode de rupture mixte qui est observé comparativement à une rupture seulement en cisaillement qui a été observée lors des essais en laboratoire avec une plaque de 700 mm de longueur.

Tableau 6.2 - Capacité maximale de parapets MTQ301 préfabriqués de 4 m chargés par une plaque de chargement de 2400 mm

Chargement	$F_{\max}$ (kN)	Variation $F_{\max}$ vs exigence CSA
Centré	667	+ 40.1 %
Centré avec joint longitudinal	705	+ 48.1 %
Excentré	652	+ 37.0 %
Excentré avec joint longitudinal	673	+ 41.4 %

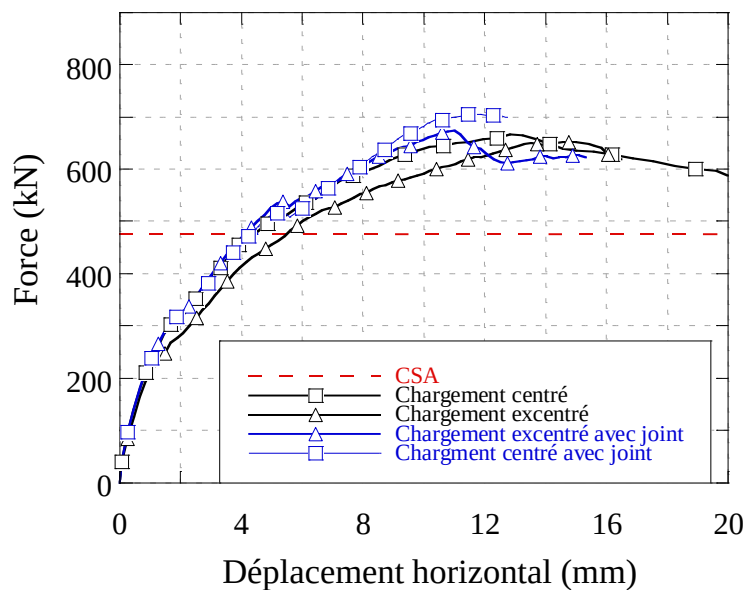


Figure 6.19 - Parapets MTQ301 préfabriqués de 4 m chargés par une plaque de chargement de 2400 mm

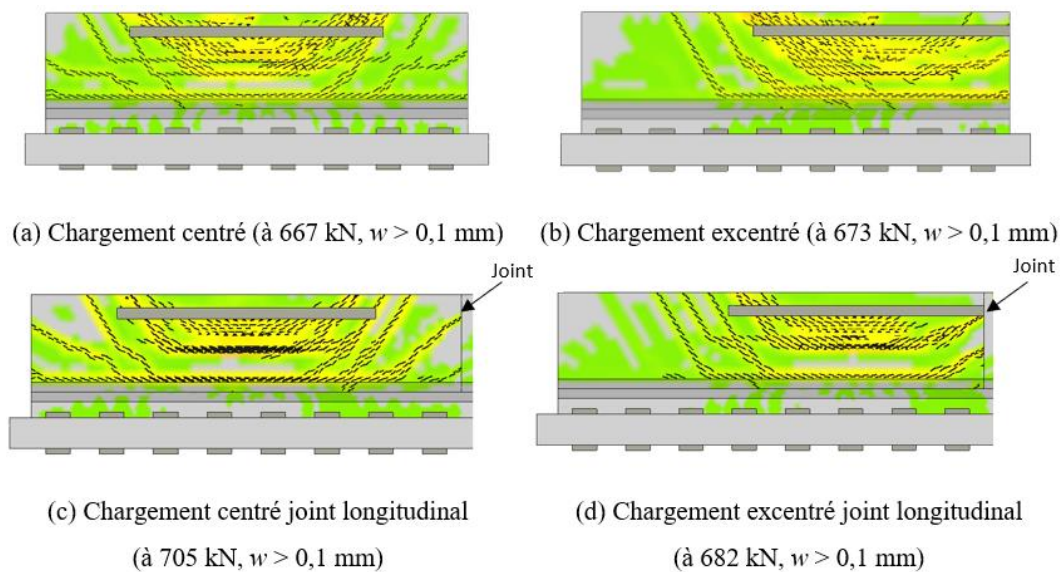


Figure 6.20 - Patron de fissuration à la rupture de parapet MTQ301 préfabriqué soumis à des chargement centré et excentré par une plaque de chargement de 2400 mm

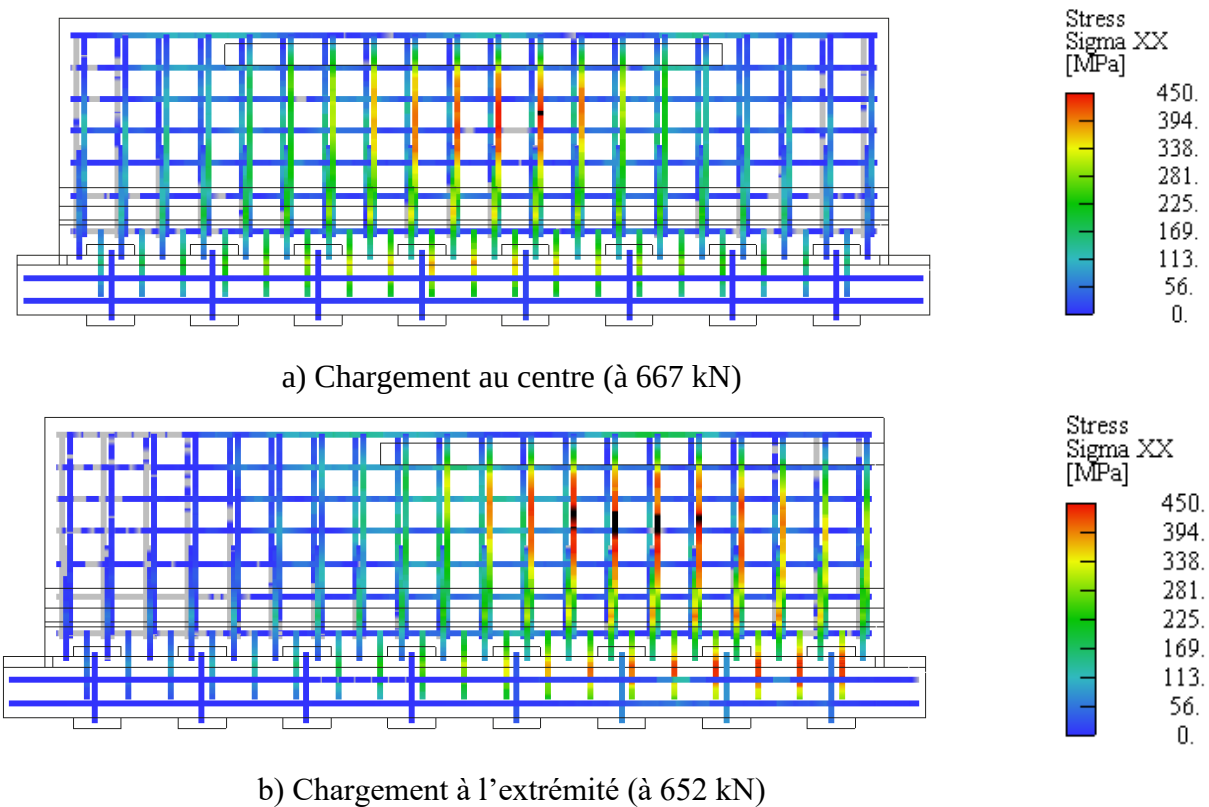


Figure 6.21 - Contraintes dans les barres d'armature de parapet MTQ301 préfabriqué soumis à des chargement centré et excentré par une plaque de chargement de 2400 mm

6.4 Signification des analyses

En résumé, les parapets hybride et MTQ301 préfabriqués respectent toutes les exigences de performance de la norme CSA-S6. Leur capacité sur parapets de 4 m dépasse largement l'exigence (476 kN) pour les cas de chargements centré et excentré. Un mode de rupture mixte flexion-cisaillement est observé lorsque la plaque de chargement de 2.4 m est utilisée autant pour le parapet hybride que pour le parapet MTQ301 préfabriqué. Les barres d'armatures demeurent élastiques en tout temps dans la niche de connexion et quelques barres dans la partie supérieure du parapet MTQ301 préfabriqué plastifient à la rupture. Le déplacement transversal des parapets pour la charge de service (357 kN) est inférieur à 4 mm pour les deux parapets, ce qui assure que le profil de redirection des véhicules restera continu même sans joint longitudinal. La contribution du joint longitudinal est faible sur des parapets de 4 m et ne semble pas requis. A moins qu'un chargement transversal en sens inverse puisse survenir sur les parapets préfabriqués, le joint pourrait être éliminé pour simplifier leur installation.

CHAPITRE 7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le Chapitre 7 vise à faire ressortir les principales conclusions et recommandations tirées des travaux de recherche réalisées dans ce projet. Il est question de faire un retour aux objectifs de ce projet, synthétiser les résultats les plus importants à retenir et formuler des recommandations quant à l'utilisation des parapets développés.

7.1 Rappel des objectifs

Le premier objectif principal de ce projet était de poursuivre le développement du parapet hybride préfabriqué avec une connexion en BFUP en étudiant le comportement mécanique de ce parapet pour différentes configurations de matériaux et conditions de chargement.

Le deuxième objectif principal était de développer une version préfabriquée du parapet MTQ301 (habituellement coulée en place) en modifiant seulement sa connexion à la dalle et en conservant sensiblement le même renforcement et les mêmes matériaux. Le développement devait viser un parapet plus simple à produire géométriquement et moins coûteux que le parapet hybride, mais avec tous les avantages d'un parapet préfabriqué (durabilité améliorée et diminution du temps de chantier).

Cinq objectifs spécifiques avaient été fixés afin d'atteindre les objectifs principaux :

- Réaliser la conception ou la mise à jour des parapets préfabriqués hybrides et MTQ301.
- Étudier numériquement l'effet des propriétés matériaux sur le comportement des parapets développés, soit le pourcentage de fibres et le retrait.
- Étudier numériquement l'effet de paramètres structuraux comme l'excentricité du chargement, la longueur des éléments de parapet et la continuité longitudinale sur le comportement des parapets développés.
- Étudier expérimentalement le comportement des parapets étudiés sous un chargement statique.
- De statuer sur la conformité des parapets vis-à-vis de des exigences de la norme CSA-S6 (2014).

7.2 Conclusions

Le premier objectif spécifique était de réaliser où mettre à jour la conception des parapets préfabriqués. Les informations relevées dans la littérature sur la continuité longitudinale entre les parapets préfabriqués et les résultats de la Phase 1 du projet recherche avec le MTQ ont permis de réaliser la conception des parapets hybrides et MTQ301 préfabriqués (Sections 3.1). Les conclusions à tirer de la conception des parapets préfabriqués sont les suivantes :

- Pour le parapet hybride, le mode de connexion à niche ouverte entre le parapet et la dalle de pont a été conservé puisqu'il a permis d'obtenir des résultats satisfaisant lors de la Phase 1 du projet.
- Pour le parapet hybride, l'espacement des barres d'ancrage du parapet et de la dalle de pont a été augmenté à 100 mm (au lieu de 88 mm lors de la Phase 1) afin de faciliter l'installation d'une série de parapets côtes-à-côtes.
- Pour le parapet MTQ301 préfabriqué, le mode de connexion à niche ouverte entre le parapet préfabriqué et la dalle de pont est retenu puisqu'il a montré des résultats satisfaisant pour le parapet hybride.
- Pour les deux parapets préfabriqués, une continuité longitudinale de type coulée en place en béton armé est choisie puisqu'elle offre suffisamment de souplesse pour l'installation des parapets sur la dalle de pont. Ce type de continuité est le plus approprié pour les parapets préfabriqués.

Les deuxième et troisième objectifs spécifiques consistaient à étudier numériquement l'effet des propriétés matériaux et l'effet de paramètres structuraux sur les parapets développés. Pour ce faire, des études paramétriques numériques ont été réalisées. Ces études paramétriques, présentées à la Section 3.5 et à la Section 3.6, ont étudiées l'effet du pourcentage de fibres des BFUP, du retrait des BFUP, de l'excentricité du chargement, de la longueur des parapets, de la plaque de chargement et de la continuité longitudinale. Ces études ont permis d'émettre les conclusions suivantes :

- Le pourcentage de fibres dans le BFUP de la coque du parapet hybride a une influence sur sa capacité maximale. La capacité maximale du parapet hybride incorporant un BFUP à 2 % et 3 % de fibres est moindre respectivement de 14 % et de 9 % par rapport à un parapet hybride avec une coque à 4 % de fibres. L'utilisation d'un BFUP à 4 % a été choisie pour

la fabrication du parapet puisqu'il permet d'obtenir une capacité maximale supérieure et une durabilité accrue.

- Le pourcentage de fibre dans le BFUP de la niche de connexion (en considérant le retrait) n'a pas d'influence sur la capacité maximale du parapet. En ce sens, il n'est pas requis d'utiliser un BFUP à 4% de fibres. Un BFUP à 3% de fibres a été utilisé pour la fabrication des parapets puisqu'il permet de limiter la fissuration de la niche et ainsi obtenir une durabilité accrue.
- Pour un parapet seul soumis à un chargement central, la résistance maximale augmente avec la longueur du parapet jusqu'à une longueur seuil entre 3 m et 4 m à partir de laquelle l'élément est assez long pour permettre d'atteindre la capacité maximale. Par exemple, la capacité maximale d'un parapet de 4 m est supérieure d'environ 60 % à la résistance maximale d'un parapet de 2 m et 2 % moindre qu'un parapet de 6 m
- Pour un parapet seul soumis à un chargement excentré avec une plaque de 700 mm, la longueur de l'élément n'influence pas la résistance du parapet puisque le plan de rupture se développe sur une longueur courte inférieure à 2 m. Le cas de chargement excentré, constitue le cas de chargement critique. La capacité maximale pour un chargement excentré est diminuée de 25 % et 53 % respectivement pour des parapets de 2 m et de 4 m par rapport à la résistance maximale de ce même parapet soumis à un chargement centré.
- L'utilisation d'une plaque de 700 mm entraine une capacité maximale inférieure aux exigences de la norme CSA-S6 pour un chargement excentré. Pour cette condition de chargement, l'utilisation d'une plaque de chargement expérimentale de 700 mm diminue la résistance maximale de l'ordre de 65 % à 85 % par rapport à une plaque de 2400 mm tel que prescrit par la norme CSA-S6.
- L'utilisation d'une plaque de 700 mm entraine cependant une capacité maximale supérieure aux exigences de la norme CSA-S6 pour un chargement centré. Pour cette condition de chargement centré, le choix de la plaque de chargement (700 mm où 2400 mm) n'a pas de réelle influence sur la résistance maximale pour un chargement centré.
- La connexion longitudinale permet généralement d'augmenter la résistance maximale du parapet connecté. Plus la charge est appliquée près de la connexion longitudinale et la

connexion permet d'augmenter la résistance maximale. Par exemple, pour un chargement appliqué à l'extrémité d'un parapet (hybride ou MTQ301 préfabriqués), la continuité longitudinale apportée par le joint permet d'augmenter la résistance maximale d'environ 60 % lorsque la plaque de 700 mm est utilisée et d'environ 20 % lorsque la plaque de 2400 mm est utilisée.

Ensuite, le quatrième objectif spécifique du projet était d'étudier expérimentalement le comportement des parapets préfabriqués hybride et MTQ301. Deux spécimens d'essai ont été fabriqués, soit un parapet hybride de 2 m de longueur déposé sur une dalle de pont de 2.4 m de longueur et une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués de 2 m connectés longitudinalement et déposés sur une dalle de pont de 4.4 m. Trois essais de chargement quasi statique ont été réalisés. Le premier essai consistait à appliquer un chargement excentré au parapet hybride. Le deuxième essai avait pour but de mesurer l'effet d'un joint longitudinal en appliquant un chargement à l'extrémité connectée de la série de deux parapets MTQ301 préfabriqué. Le dernier essai consistait à appliquer un chargement à l'extrémité libre de la série de deux parapets MTQ301 préfabriqués. Parallèlement aux essais principaux sur parapets, un programme complet de caractérisation des matériaux a été réalisé. Les résultats d'essai ont permis de formuler les conclusions suivantes :

- Les essais sur parapets préfabriqués hybride et MTQ301 de 2 m ont conduit à une capacité maximale moindre que ce qui est requis dans la norme CSA-S6. Ce résultat était attendu. Il est dû à l'utilisation d'une plaque de chargement de 700 mm de longueur, alors que la norme CSA-S6 prescrit l'utilisation d'un chargement sur une longueur de 2400 mm ce qui est seulement applicable sur des parapets de 4 m.
- L'ajout d'un joint de connexion longitudinale au parapet MTQ301 préfabriqué a permis d'obtenir une capacité additionnelle d'environ 60 kN lors d'un chargement excentré. Il s'agit d'un apport relativement faible.
- Les essais ont tous permis d'observer le même mode de rupture, soit une rupture en cisaillement dans le haut du parapet sans que les barres d'armatures dans la niche de connexion ne plastifient. Il s'agit là du même mode de rupture qu'un parapet coulé en place. L'utilisation de parapets préfabriqués ne change donc pas le comportement typique du parapet coulé en place sur une dalle de pont.

À la suite des essais, des modélisations représentant fidèlement les conditions expérimentales et incorporant les propriétés des matériaux mesurées en laboratoire, les effets de retrait et les effets d'orientation des fibres ont été réalisées. L'objectif de ces modélisations était de valider l'exactitude des modèles numériques utilisés par rapport aux résultats expérimentaux. Les conclusions associées aux modèles numériques finaux sont les suivantes :

- Les modèles reproduisent très bien le comportement mécanique force-déplacement transversal des parapets. En effet, la rigidité initiale, la rigidité en condition fissurée, la capacité maximale ainsi que le déplacement au pic sont bien reproduits par les modèles numériques pour les trois essais réalisés.
- Les modèles numériques ont très bien reproduit la fissuration observée dans les trois essais en laboratoire. Les fissures des modèles numériques sont positionnées au bon endroit sur le parapet et elles apparaissent dans le même ordre que ce qui a été observé expérimentalement.
- L'évolution de la contrainte dans les barres d'armatures instrumentées dans la niche de connexion est très bien reproduite pour le parapet hybride et correctement reproduite pour les parapets MTQ301 préfabriqué.
- Le modèle du parapet hybride a été validé, puisqu'il permet de bien reproduire les résultats l'essai de chargement excentré sur ce parapet.
- Le modèle du parapet MTQ301 préfabriqué a été validé, puisqu'il permet de bien reproduire les résultats des deux essais réalisés sur ce parapet soit avec des chargements à l'extrémité connectée et à l'extrémité non-connectée.

Finalement, puisque les essais en laboratoire ne permettaient pas de reproduire les conditions de longueur de parapets de 4 m et de plaque de chargement de 2400 mm exigés par la norme CSA-S6, les modèles numériques préalablement validés ont été utilisés pour vérifier le respect des critères de performance de la norme (cinquième objectif spécifique du projet). Dans ce cas, ce sont des parapets de 4 m qui ont été soumis à des chargements centrés et excentrés par une plaque de chargement de 2400 mm. Ces modélisations ont permis de constater les faits suivants :

- La capacité maximale de parapets hybrides et MTQ301 préfabriqué de 4 m surpasse largement l'exigence de la norme CSA-S6 (476 kN) lorsque soumis à des chargements centrés et excentrés.
- Le déplacement des parapets hybrides et MTQ301 préfabriqué de 4 m est inférieur à 4 mm pour des charges de services (476 kN). Cela assure que le profil de redirection des véhicules demeurera continu en cas d'impact, sans nécessiter de joint longitudinal.
- La contribution d'un joint longitudinal sur la capacité maximale des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué de 4 m est faible. Elle permet seulement d'augmenter la capacité maximale de 5 % dans ces conditions. Puisque la capacité maximale des parapets non-connectés est largement suffisante, un joint longitudinal ne semble pas requis.

7.3 Recommandations

Les travaux, résultats et analyses présentées dans ce mémoire permettent d'arriver à la conclusion principale que les parapets hybrides et MTQ301 préfabriqués répondent aux exigences de performance de la norme CSA-S6.

Dans l'éventualité où des propriétaires d'ouvrages souhaiteraient utiliser ces parapets, certaines recommandations peuvent être formulées :

- Il a été montré numériquement que les parapets hybrides et MTQ301 préfabriqués de 4 m de longueur ont une résistance nettement supérieure (par plus de 37 %) aux exigences de la norme CSA-S6 (2014), lorsque chargés avec une plaque de 2400 mm et ce peu importe la configuration du chargement (centré, excentré, avec continuité ou sans continuité). En ce sens, leur utilisation dans un contexte réel peut être recommandé. L'utilisation de ces parapets dans un projet de construction neuve ou de réhabilitation d'un pont au Québec permettrait d'accélérer la séquence de construction et d'augmenter la durabilité des parapets sur les ponts.
- L'utilisation du parapet hybride est recommandée dans le contexte où l'on cherche à obtenir une durabilité maximale et donc un gain économique sur la durée de vie d'un ouvrage par rapport à un parapet coulé en place. Les travaux de la Phase 1 du projet de recherche avec le MTQ (Charron et al., 2013) avaient effectivement montré que l'utilisation d'un parapet

hybride était une solution économique pour une durée de vie de 75 ans en comparaison de parapets coulés en place qui demandent de nombreux travaux de réparation et d'entretien. L'utilisation du parapet MTQ301 préfabriqué est recommandée pour une durabilité accrue par rapport à un parapet coulé en place avec un coût initial de construction plus faible que le parapet hybride. Aucune étude comparative détaillée n'a été réalisée dans ce projet sur la durabilité des parapets hybrides et MTQ301 préfabriqués. Cependant, en considérant les indices de durabilité nettement meilleurs du BFUP par rapport au BO, il apparaît que le parapet hybride avec sa coque en BFUP aura une durabilité considérablement supérieure. Ce projet ne contient pas non plus d'étude économique du MTQ301 préfabriqué.

- Il serait intéressant de réaliser une étude comparative (durabilité et coût) entre le parapet hybride et le parapet MTQ301 préfabriqué afin qu'un propriétaire d'ouvrages puisse faire un choix éclairé du parapet le plus économique.
- Les modélisations numériques présentées dans ce mémoire permettent de reproduire les résultats expérimentaux de façon adéquate. Pour une bonne reproduction des résultats expérimentaux, l'effet du retrait doit être pris en compte dans les modélisations. L'approche utilisée consistait à représenter l'effet du retrait comme une diminution de la résistance en traction des bétons dû aux difficultés à représenter numériquement les conditions d'appui lors du retrait en fonction de la séquence de construction des spécimens d'essai. Une attention particulière pourrait être portée lors de futures modélisations, pour trouver une manière optimale de modéliser ces effets de retrait avec la séquence de construction. En ce sens, des essais de retrait sur les bétons utilisés permettraient aussi de mieux caractériser ce phénomène.
- Les parapets montrent une rupture en cisaillement lors d'un chargement excentré. Dans ce projet aucune caractérisation du comportement en cisaillement des bétons n'a été réalisée. Dans un projet futur, une caractérisation du comportement en cisaillement des bétons utilisés permettrait l'utilisation de loi de comportement plus exacte et d'améliorer la précision des modèles numériques pour les parapets préfabriqués.
- Les essais de chargement quasi-statiques réalisés ont permis sans problèmes d'atteindre les objectifs de ce projet et d'observer les phénomènes souhaités. En réalité, les parapets de ponts sont soumis à un chargement dynamique lorsqu'un véhicule entre en contact avec le

parapet. En ce sens, des essais de chargement dynamiques ou des essais de collision pourraient permettre d'observer des phénomènes qui ne peuvent être observés lors d'essais quasi-statiques.

- Pour le parapet hybride, une coque à 4% de fibres est recommandée pour une performance et une durabilité maximale.
- Pour les niches de connexion des parapets hybrides et MTQ301 préfabriqués, un BFUP à 3% de fibres est recommandé. L'espacement des barres dans la niche de connexion est optimal à 100 mm, comme les spécimens d'essai construits dans le cadre de ce projet. Un tel espacement permet plus facilement de placer une série de parapets côtes-à-côtes. Avec cet espacement les deux modèles de parapets développés ont montré une bonne surcapacité par rapport aux exigences de la norme CSA-S6.
- Aucune continuité longitudinale n'est nécessaire pour respecter les exigences de la norme CSA-S6. Les parapets hybride et MTQ301 préfabriqués sont assez résistants pour atteindre la capacité requise sans nécessiter l'apport d'un joint de connexion longitudinal. De plus, les deux modèles de parapets sont assez rigides pour assurer un profil continu de redirection des véhicules en cas d'impact.

BIBLIOGRAPHIE

- AASHTO. (2017). *LRFD Bridge Design Specifications*. Norme LRFDUS-6.
- Aktan, H., & Attanayaka, U. (2004). *Causes and cures for cracking of concrete barriers* (Rapport n° RC-1448). Lansing, MI: Michigan Department of Transportation.
- Alberson, D. C., Williams, W. F., Menges, W. L., & Haug, R. R. (2004). *Testing and Evaluation of the Florida Jersey Safety Shaped Bridge Rail* (Rapport n° FHWA/TX-04/9-8132-1). College Station, TX: Texas Transportation Institute - The Texas A&M University System.
- Alberti, M. G., Enfedaque, A., & Gálvez, J. C. (2018). A review on the assessment and prediction of the orientation and distribution of fibres for concrete. *Composites Part B: Engineering*, 151, 274-290. doi:10.1016/j.compositesb.2018.05.040
- Atahan, A. O. (2006). Finite-Element Crash Test Simulation of New York Portable Concrete Barrier with I-Shaped Connector. *Journal of Structural Engineering*, 132(3), 430-440. doi:10.1061/(asce)0733-9445(2006)132:3(430)
- Bastien Masse, M. Y. (2010). *Étude du comportement déformationnel des bétons de réparation*. (M.Sc.A., Ecole Polytechnique, Montreal (Canada), Ann Arbor). Accessible par ProQuest Dissertations and Theses. (MR70504). Tiré de <https://search.proquest.com/docview/853730387?accountid=40695>
- 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, Ecole Polytechnique de Montréal, Montréal, QC). Accessible par ProQuest Dissertations and Theses. (MR62384). Tiré de <https://search.proquest.com/docview/756007888?accountid=40695>
- Bligh, R. P., Sheikh, N. M., Menges, W. L., & Haug, R. R. (2003). *Development of Low-Deflection Precast Concrete Barrier* (Rapport n° FHWA/TX-05/0-4162-3). College Station, TX: Texas Transportation Institute - The Texas A&M University System.
- Červenka, V., Jendele, L., & Červenka, J. (2016). *ATENA Program Documentation - Part 1 - Theory*. Prague, République tchèque.
- Charette, N. (2017). *Réparations minces de parapets de ponts avec des bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP)*. (Mémoire de Maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC). Accessible par ProQuest Dissertations and Theses. (10806509). Tiré de <https://search.proquest.com/docview/2024164659?accountid=40695>
- Charron, J.-P., Damry, R., Desmettre, C., & Massicotte, B. (2013). *Utilisation structurale des BFUP pour les parapets préfabriqués* (Rapport n° SR13-05). Montréal, QC: Groupe de recherche en génie des structures - École Polytechnique de Montréal.
- Charron, J. P., Braïke, S., & Androuet, C. (2011). *Béton Fibré à Ultra-hautes Performances de Polytechnique Montréal, Déclaration d'invention DIV-446B*. Polytechnique Montréal.
- Charron, J. P., & Desmettre, C. (2013). *Intérêt de l'utilisation des bétons renforcés de fibres pour la construction d'ouvrage d'art durables*. Montréal, QC: École polytechnique de Montréal.
- Charron, J. P., Desmettre, C., & Sidibé, M. (2019). *Utilisation des BFUP pour la réfection des structures : application à une poutre précontrainte de l'autoroute Bonaventure*.

Communication présentée à Colloque L'innovation au service des infrastructures de transport, Montréal, QC.

- Correlated Solutions. (2019). VIC-3D Software manual. Tiré de <http://www.correlatedsolutions.com/supportcontent/VIC-3D-8-Manual.pdf>
- CSA. (2014). *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*. Norme CSA S6-14. Mississauga, ON: Association canadienne de normalisation.
- Cusson, D., & Repette, W. L. (2000). Early-age cracking in reconstructed concrete bridge barrier walls. *ACI Materials Journal*, 97(4), 438-446. Tiré de <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=a1f4fa25-83a1-44fb-b45f-fb9c538dcc65>
- Delsol, S. (2012). *Évaluation du coefficient d'orientation dans les bétons renforcés de fibres métalliques*. (M.Sc.A., École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC). Accessible par ProQuest Dissertations and Theses. (MR88132). Tiré de <https://search.proquest.com/docview/1080816850?accountid=40695>
- Duchesneau, F. (2011). *Conception de parapets préfabriqués hybrides et monolithiques utilisant des bétons à haute et ultra-haute performance*. (Mémoire de maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal, Montreal, QC). Accessible par ProQuest Dissertations and Theses. (MR80287). Tiré de <https://search.proquest.com/docview/897966578?accountid=40695>
- El-Salakawy, E., Masmoudi, R., Benmokrane, B., Brière, F., & Desgagné, G. (2004). Pendulum impacts into concrete bridge barriers reinforced with glass fibre reinforced polymer composite bars. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(4), 539-552. doi:10.1139/104-006
- Fadaee, M., Sennah, K., & Khederzadeh, H. (2018). *Flexural capacity os Steel-reinforced concrete TL-5 bridge barrier using modified trapezoidal Yield-line failure equations*. Communication présentée à 10th International conference on short and medium span bridges, Ville de Québec, QC (p. 1-10).
- Holmes, K., & Ngan, C. L. Y. (2010). *Guide to Bridge Traffic and Combination Barriers*. Ottawa, ON: Association de transports du Canada.
- 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/Materiaux et Constructions*, 48(9), 2795-2807. doi:10.1617/s11527-014-0354-z
- Jeon, S.-J., Choi, M.-S., & Kim, Y.-J. (2008). Ultimate Strenght of Concrete Barrier by the Yield Line Theory. *International Journal of Concrete and Materials*, 2(1), 57-62.
- Jeon, S.-J., Choi, M.-S., & Kim, Y.-J. (2011). Failure Mode and Ultimate Strength of Precast Concrete Barrier. *ACI Structural Journal*, 108(1), 99-107.
- Khederzadeh, H., & Sennah, K. (2014). Development of cost-effective PL-3 concrete bridge barrier reinforced with sand-coated glass fibre reinforced polymer (GFRP) bars: static load tests. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(4), 368-379. doi:10.1139/cjce-2013-0394
- Lagier, F. E. Y. (2015). *Étude du comportement de chevauchements d'armatures en traction directe dans du béton fibré ultra performant*. (Ph.D., Ecole Polytechnique, Montreal (Canada), Ann Arbor). Accessible par ProQuest Dissertations and Theses. (10305249). Tiré de <https://search.proquest.com/docview/1864693990?accountid=40695>

- MTQ. (2017). *Manuel de conception des structures* Québec, QC.
- Naaman, A. E., & Reinhardt, H. W. (2003). High performance fiber reinforced cement composites HPFRCC-4: International RILEM workshop Ann Arbor, Michigan, June 16-18, 2003. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 36(264), 710-712.
- Namy, M. (2012). *Structural behaviour of cast-in-place and precast concrete barriers anchored to bridge deck overhangs and subjected to transverse static loading*. (Mémoire de maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal, Montreal, QC). Accessible par ProQuest Dissertations and Theses. (MR91346). Tiré de <https://search.proquest.com/docview/1266232193?accountid=40695>
- Namy, M., Charron, J.-P., & Massicotte, B. (2015a). Structural Behavior of Bridge Decks with Cast-in-Place and Precast Concrete Barriers: Numerical Modeling. *Journal of Bridge Engineering*, 20(12). doi:10.1061/(asce)be.1943-5592.0000751
- Namy, M., Charron, J.-P., & Massicotte, B. (2015b). Structural behavior of cast-in-place and precast concrete barriers subjected to transverse static loading and anchored to bridge deck overhangs. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42(2), 120-129. doi:10.1139/cjce-2013-0328
- Ngan, C. L. Y. (2008). *Experimental investigations of anchorage capacity of precast concrete bridge barrier for Performance Level 2*. (Mémoire de maîtrise, University of British Columbia, Vancouver, BC). Tiré de <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0063082>
- Niamba, E. Y. (2009). *Développement de parapets préfabriqués en bétons renforcés de fibres pour les ponts*. (Mémoire de maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal, Montreal, QC). Accessible par ProQuest Dissertations and Theses. (MR53916). Tiré de <https://search.proquest.com/docview/305138106?accountid=40695>
- nVent. (2019). nVent LENTON Terminator For Rebar Anchorage. Tiré de <https://www.erico.com/catalog/literature/CP7E-WWEN.pdf>
- Patel, G. (2008). *Development Of Precast Barrier Wall System For Bridge Decks*. (Mémoire de maîtrise, Ryerson University, Toronto, ON). Tiré de <http://digital.library.ryerson.ca/islandora/object/RULA:1612>
- Plagué, T., Desmettre, C., & Charron, J. P. (2017). Influence of fiber type and fiber orientation on cracking and permeability of reinforced concrete under tensile loading. *Cement and Concrete Research*, 94, 59-70. doi:10.1016/j.cemconres.2017.01.004
- Ross JR, H. E., Sicking, D. L., Zimmer, R. A., & Michie, J. D. (1993). *National Cooperative Highway Research Program Report 350 : Recommended Procedure for the Safety Performance Evaluation of Highway Features*. Washington, DC: National Academy Press.
- Rossi, P. (1998). *Les bétons de fibres métalliques*. Paris, France: Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.
- Sennah, K., Juette, B., Weber, A., & Witt, C. (2011). *Vehicle crash testing on a GFRP-reinforced PL-3 concrete bridge barrier*. Communication présentée à 2011 Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada - Transportation Successes: Let's Build on Them, TAC/ATC 2011, Edmonton, AB, Canada (p. Golder Associates).

- Staton, J. F., & Knauff, J. (2007). *Performance of Michigan's Concrete Barriers* (Rapport n° R-1498). Lansing, MI: Michigan Department of Transportation.
- Thiaw, A. (2014). *Conception et optimisation de parapets préfabriqués avec trottoir intégré en béton renforcé de fibres pour les ponts*. (Mémoire de maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal, Montreal, QC). Accessible par ProQuest Dissertations and Theses. (10296115). Tiré de <https://search.proquest.com/docview/1845327578?accountid=40695>
- Wipf, T., Ecklund, A., & Sritharan, S. (2018). *Precast Concrete Bridge Barriers for Accelerated Bridge Construction*. Ames, IA: Tiré de <https://abc-utc.fiu.edu/research-projects/isu-research-projects/development-of-prefabricated-bridge-railings/>

ANNEXE A PLANS DES PARAPETS PRÉFABRIQUÉS

Les plans du parapet hybride, du parapet MTQ301 préfabriqué, ainsi que des dalles de pont construites dans ce projet sont présentés dans cette annexe.

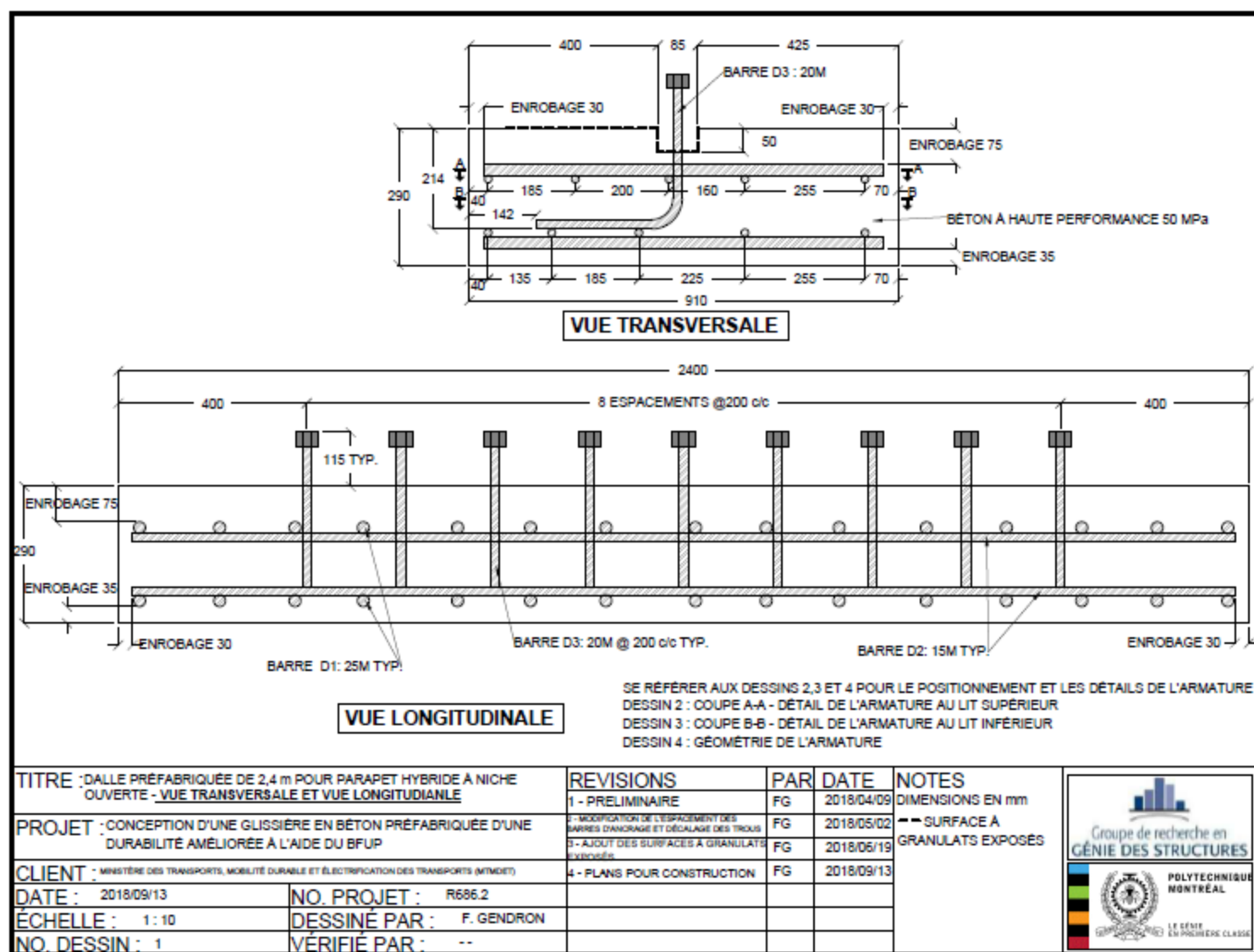


Figure A.1 - Dalle préfabriquée de 2.4 m pour parapet hybride à niche ouverte - vue transversale et vue longitudinale

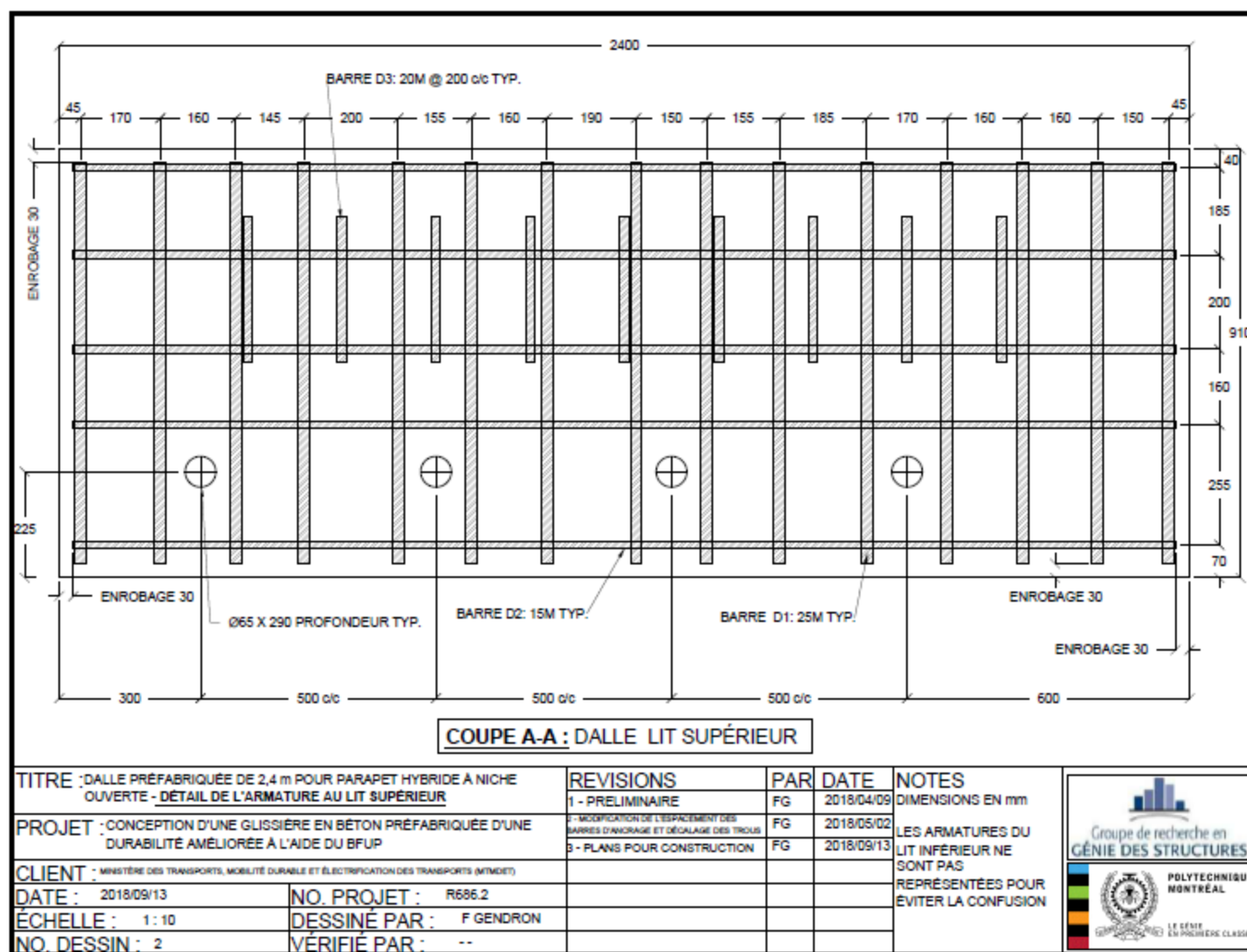


Figure A.2 - Dalle préfabriquée de 2.4 m pour parapet hybride à niche ouverte - détail de l'armature au lit supérieur

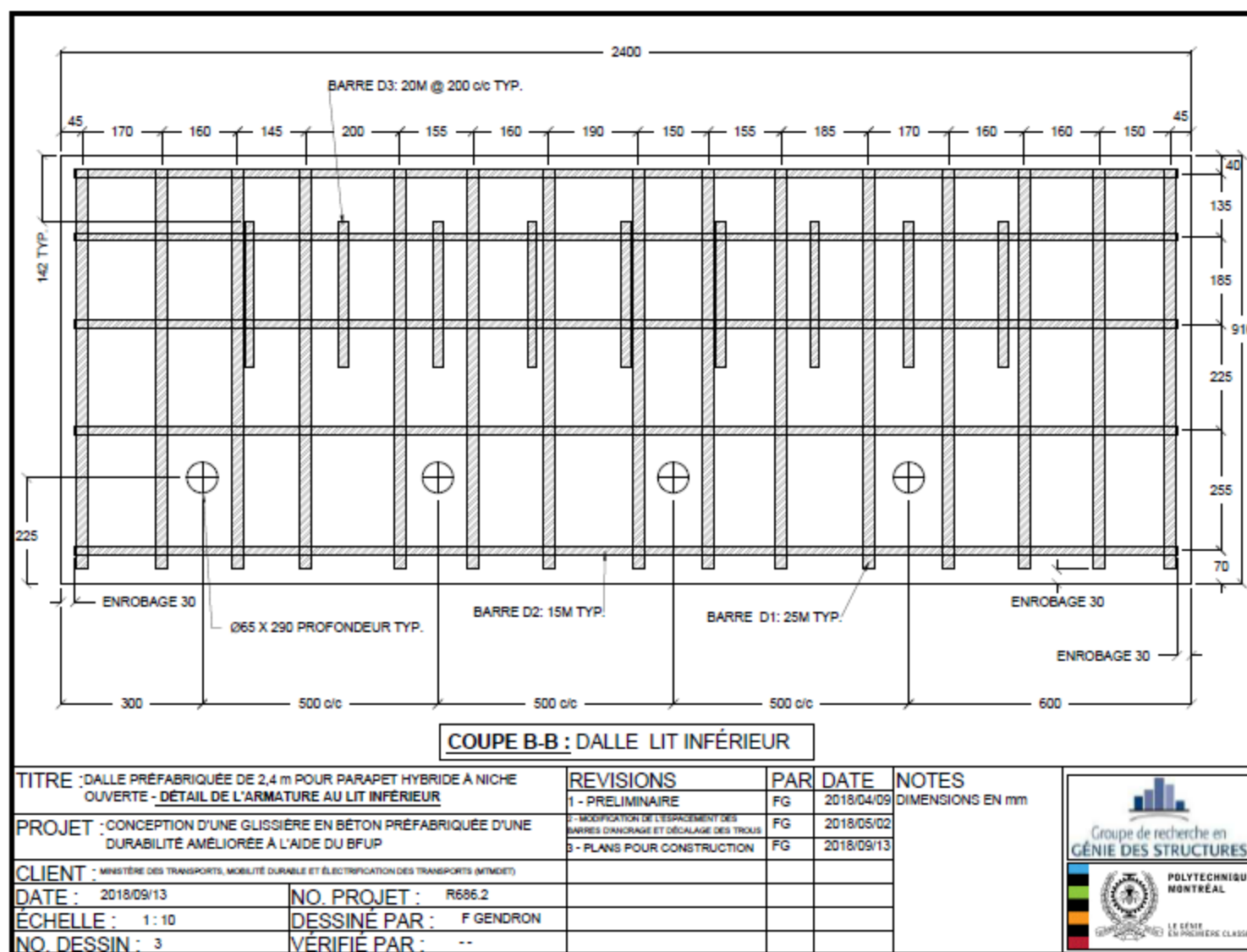


Figure A.3 - Dalle préfabriquée de 2.4 m pour parapet hybride à niche ouverte - détail de l'armature au lit inférieur

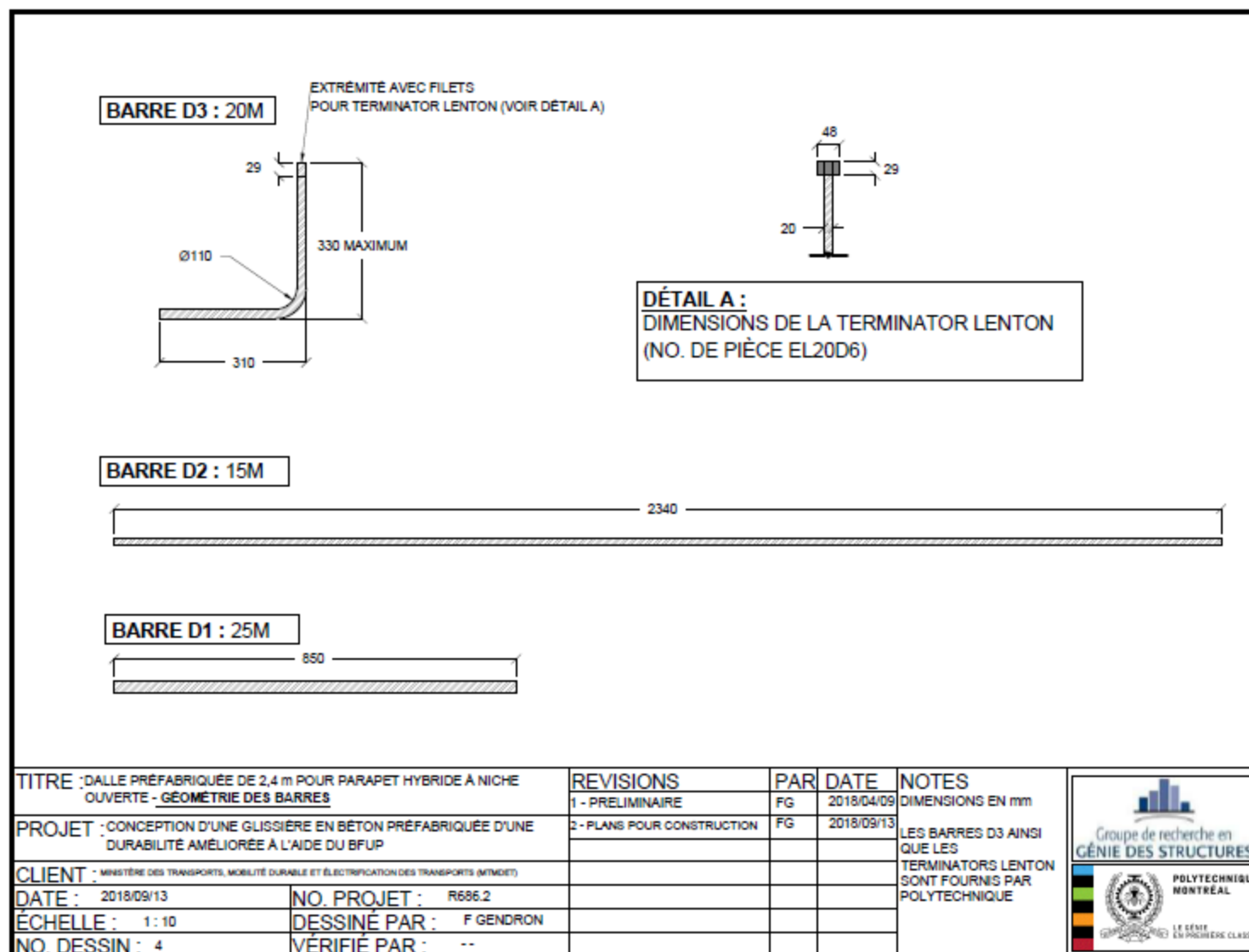


Figure A.4 - Dalle préfabriquée de 2.4 m pour parapet hybride à niche ouverte - géométrie des barres

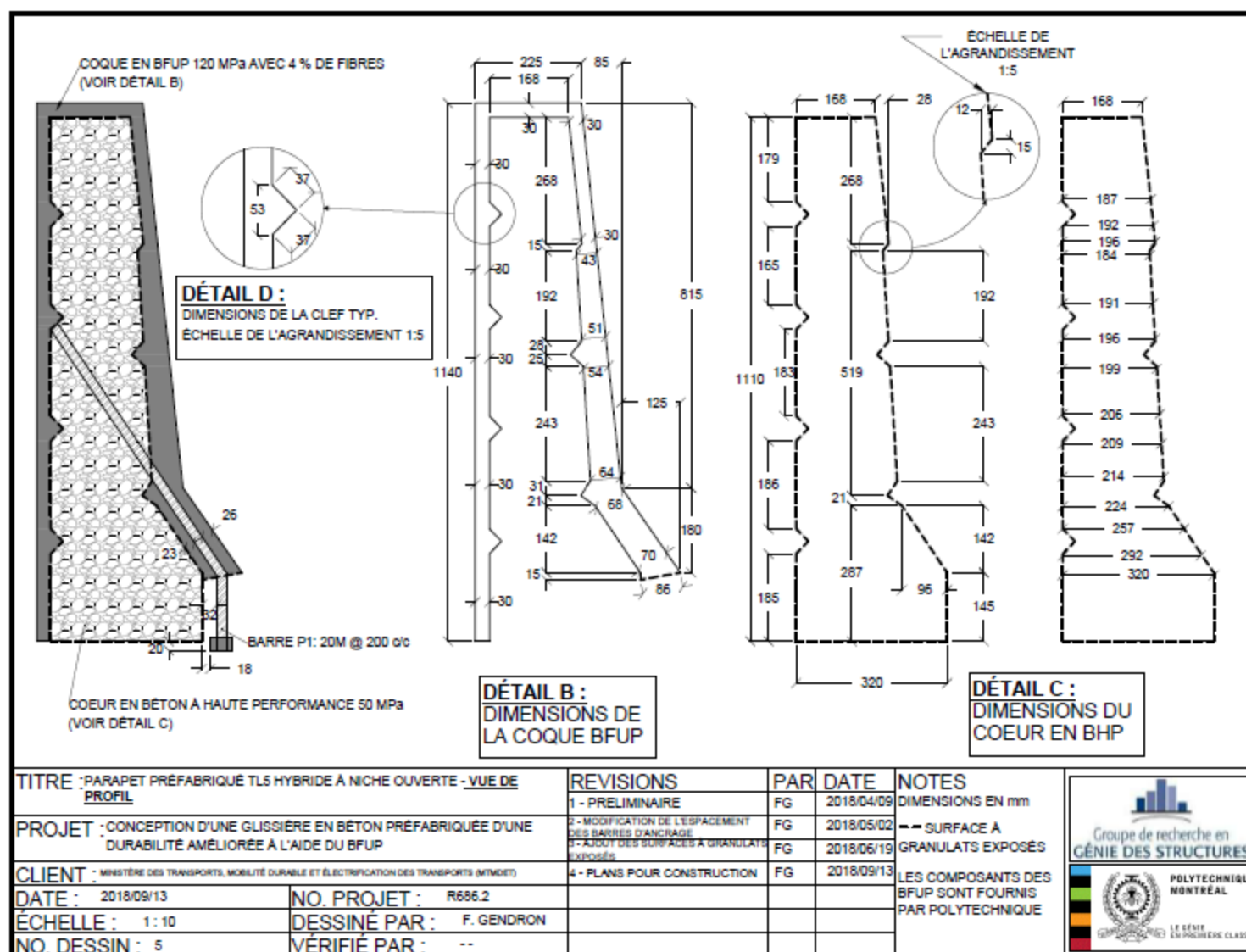


Figure A.5 - Parapet préfabriqué TL-5 hybride à niche ouverte - vue de profil

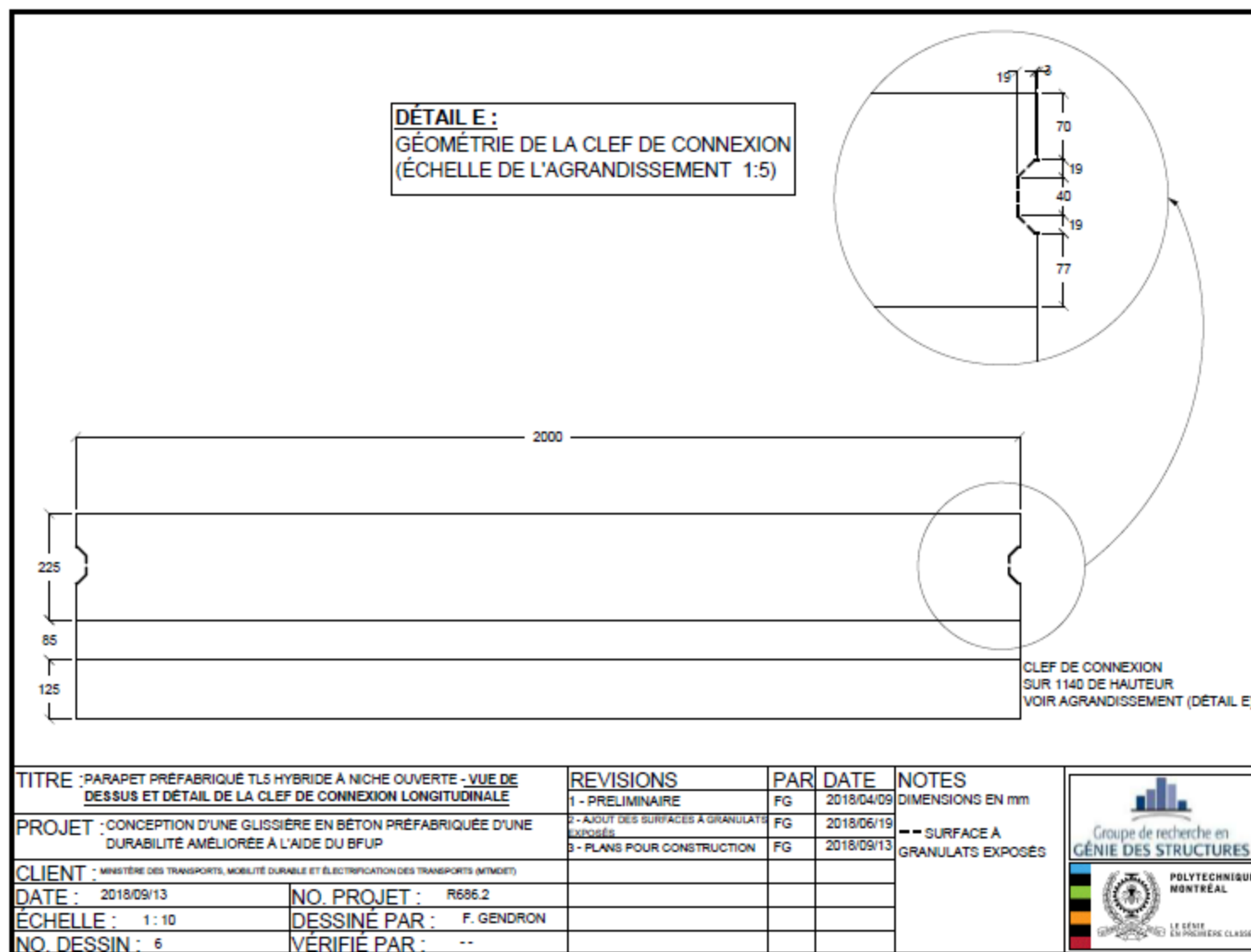


Figure A.6 - Parapet préfabriqué TL-5 hybride à niche ouverte - vue de dessus et détail de la clef de connexion longitudinale

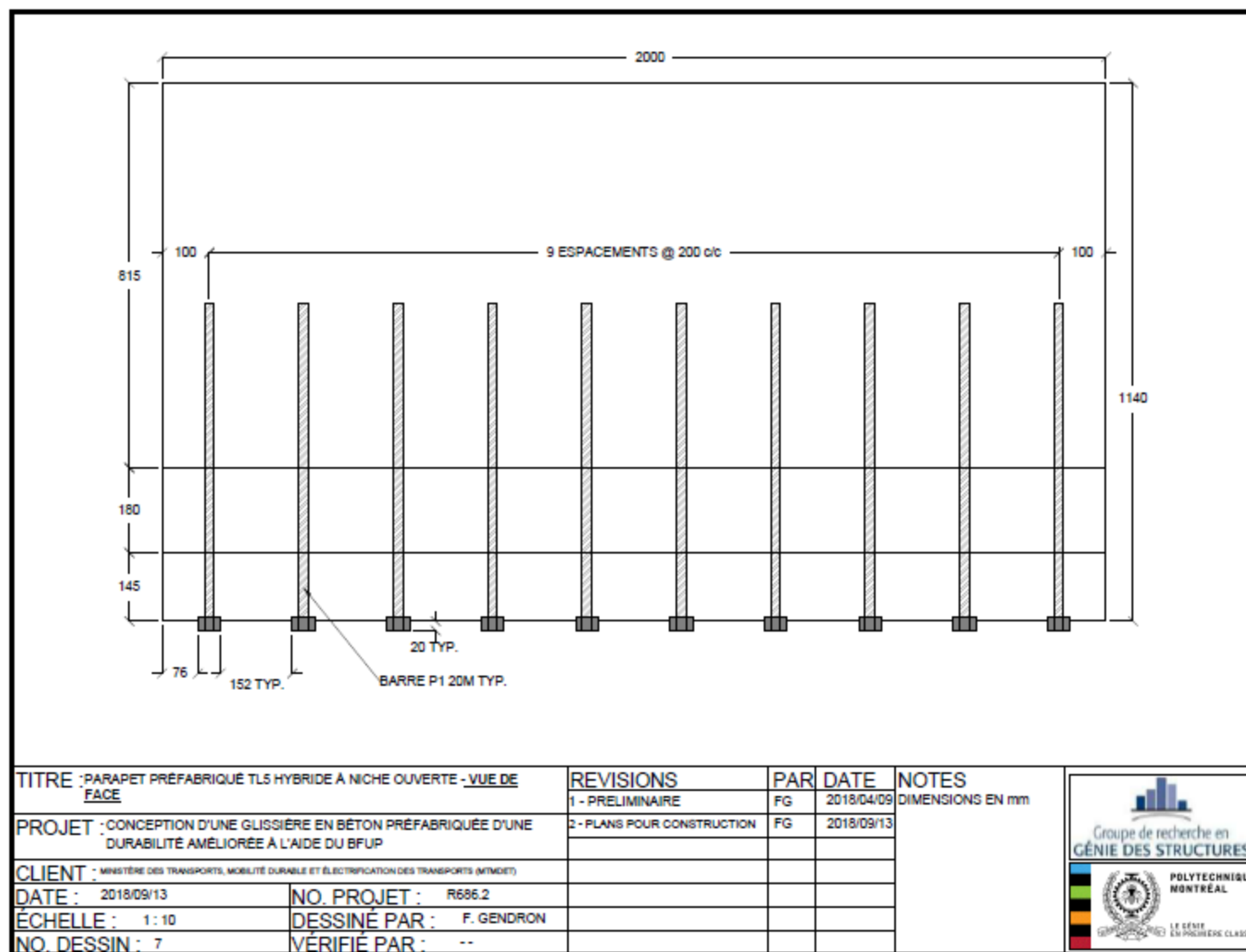


Figure A.7 - Parapet préfabriqué TL-5 hybride à niche ouverte - vue de face

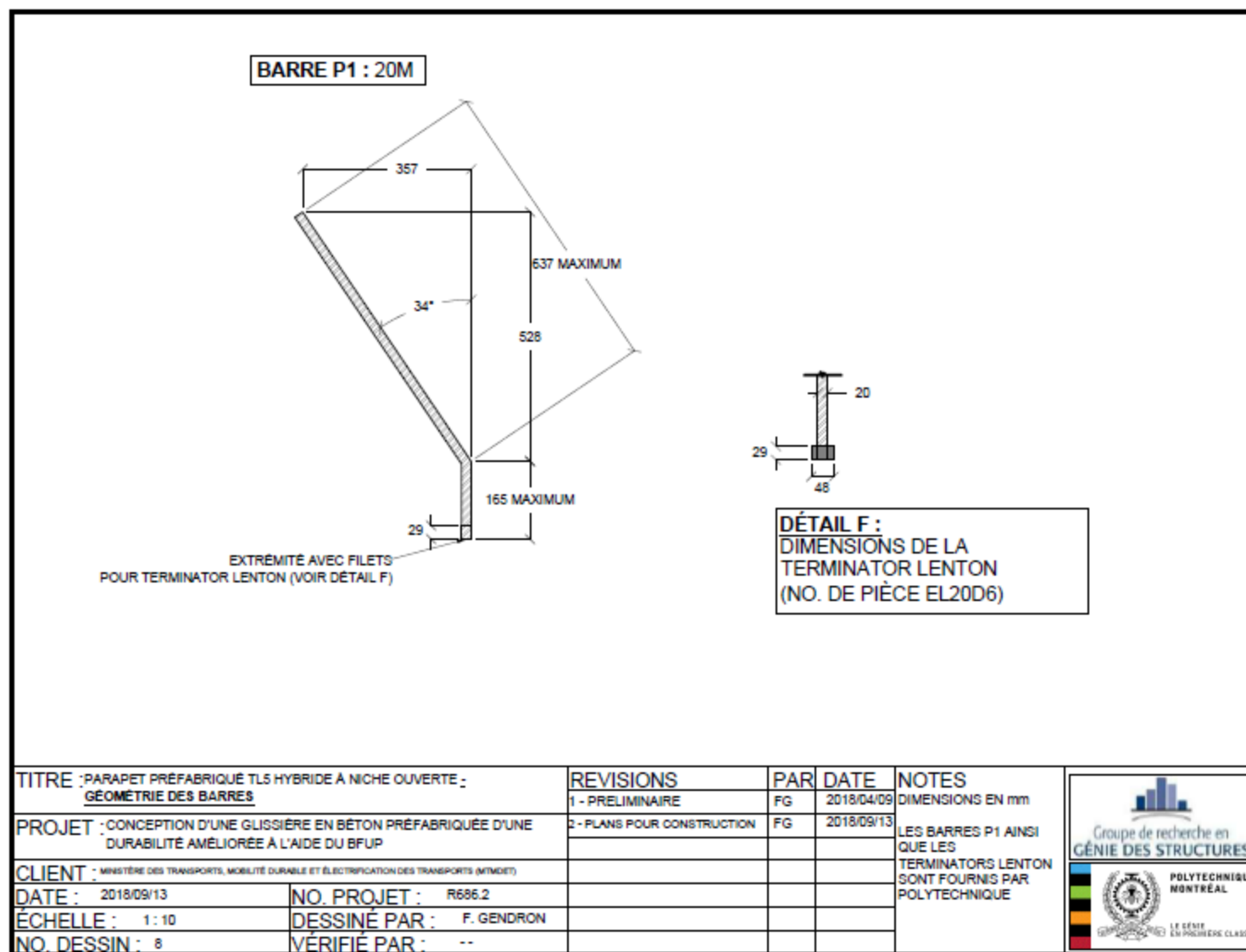


Figure A.8 - Parapet préfabriqué TL-5 hybride à niche ouverte - géométrie des barres

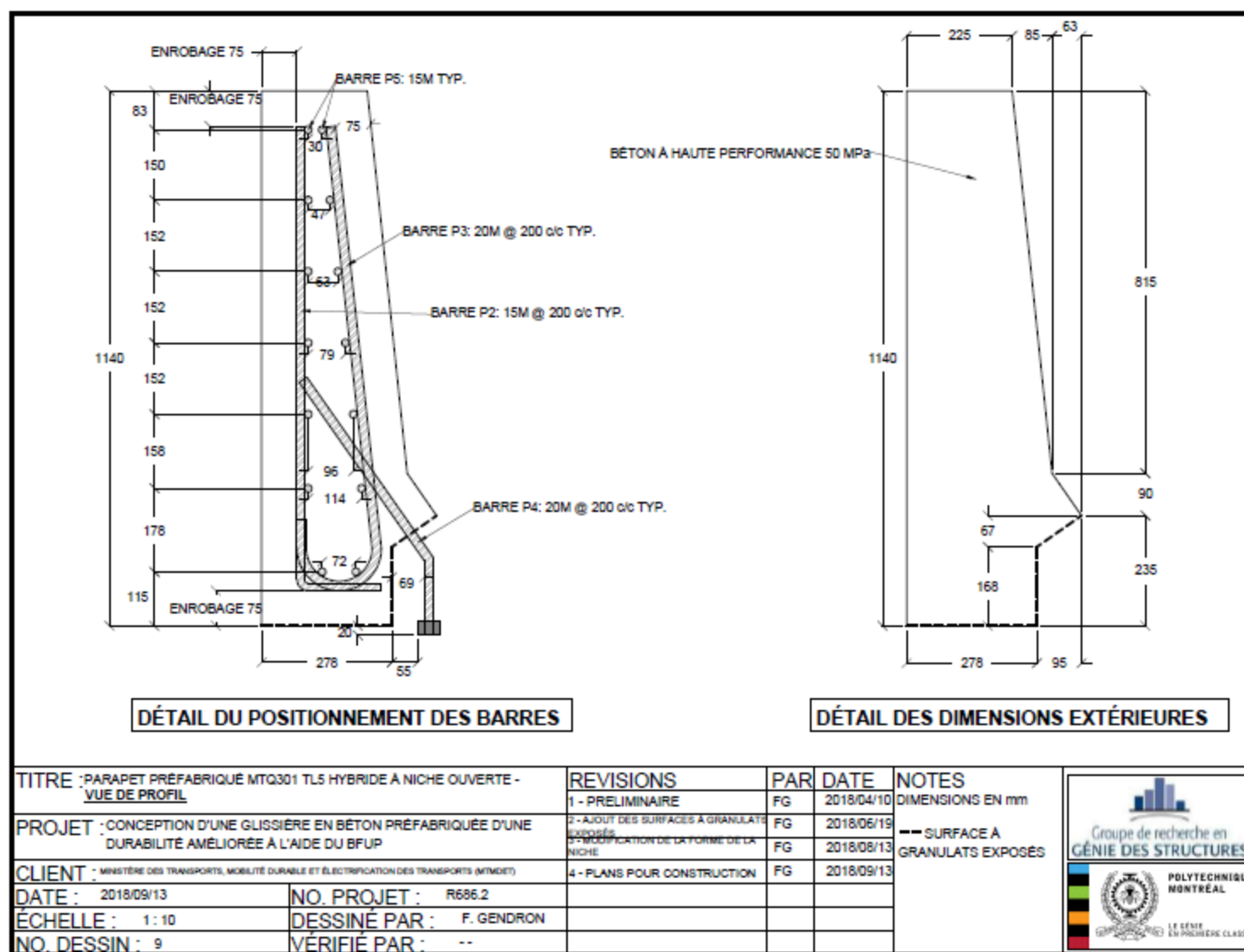


Figure A.9 - Parapet préfabriqué MTQ301 TL-5 à niche ouverte - vue de profil

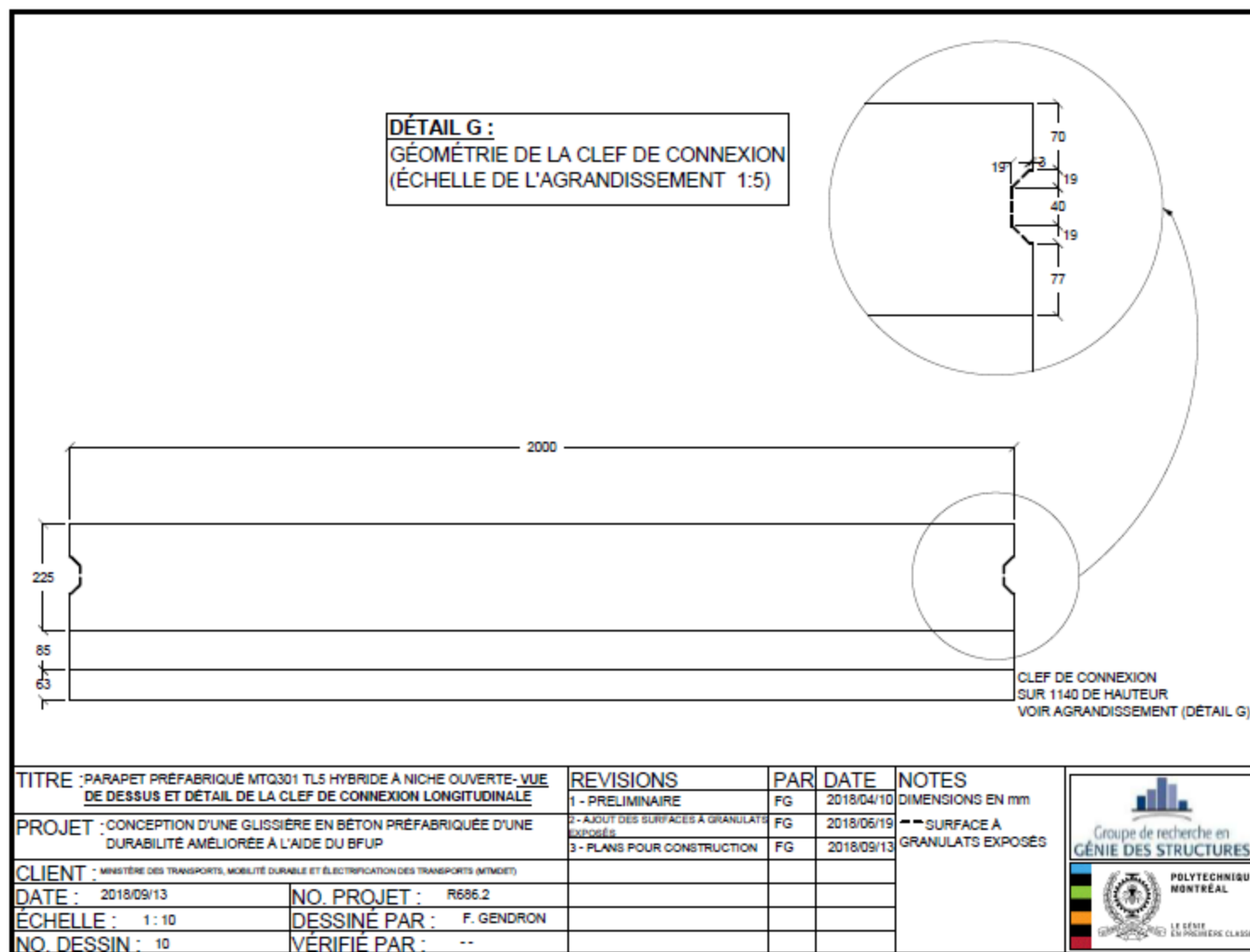


Figure A.10 - Parapet préfabriqué MTQ301 TL-5 à niche ouverte - vue de dessus et détail de la clef de connexion longitudinale

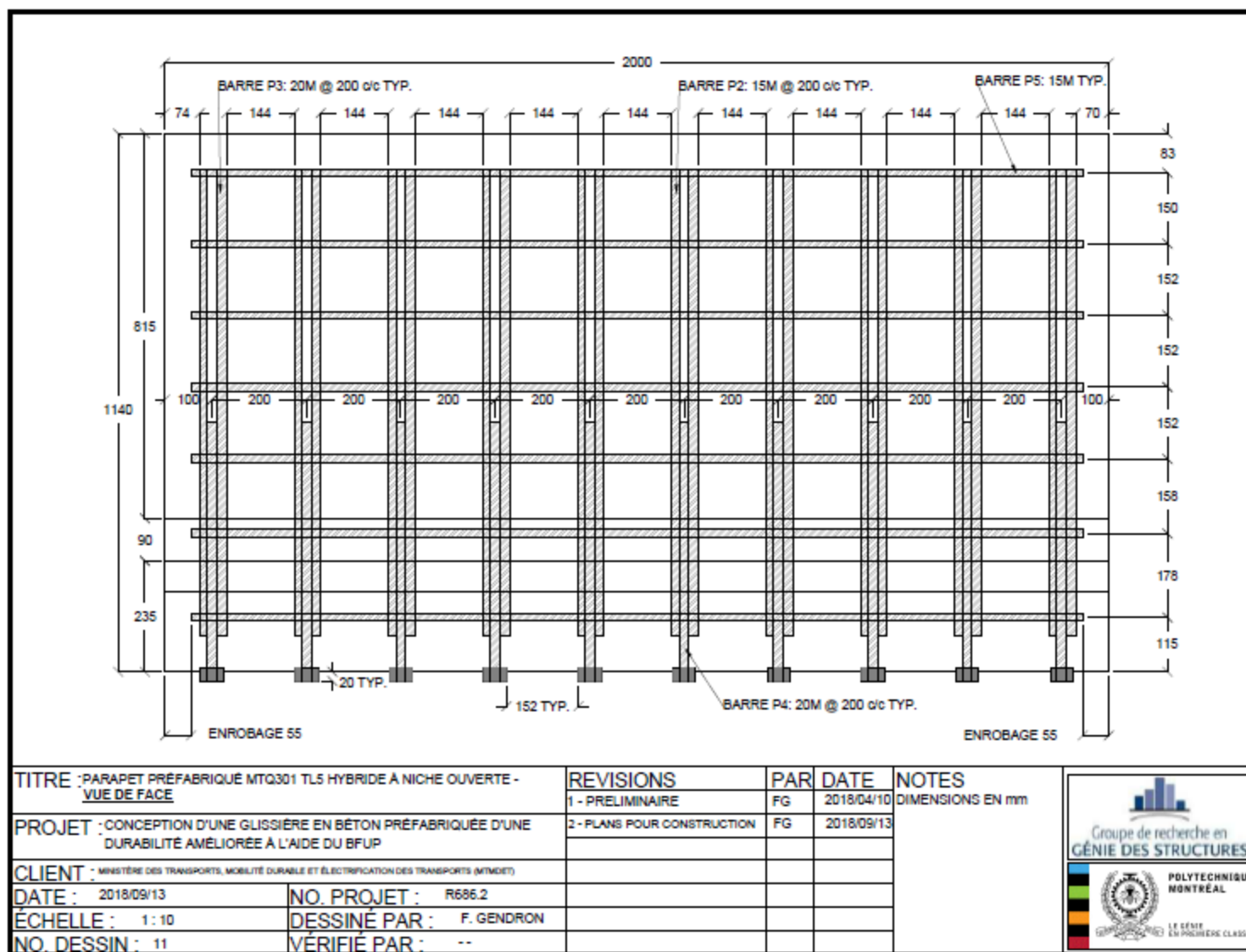


Figure A.11 - Parapet préfabriqué MTQ301 TL-5 à niche ouverte - vue de face

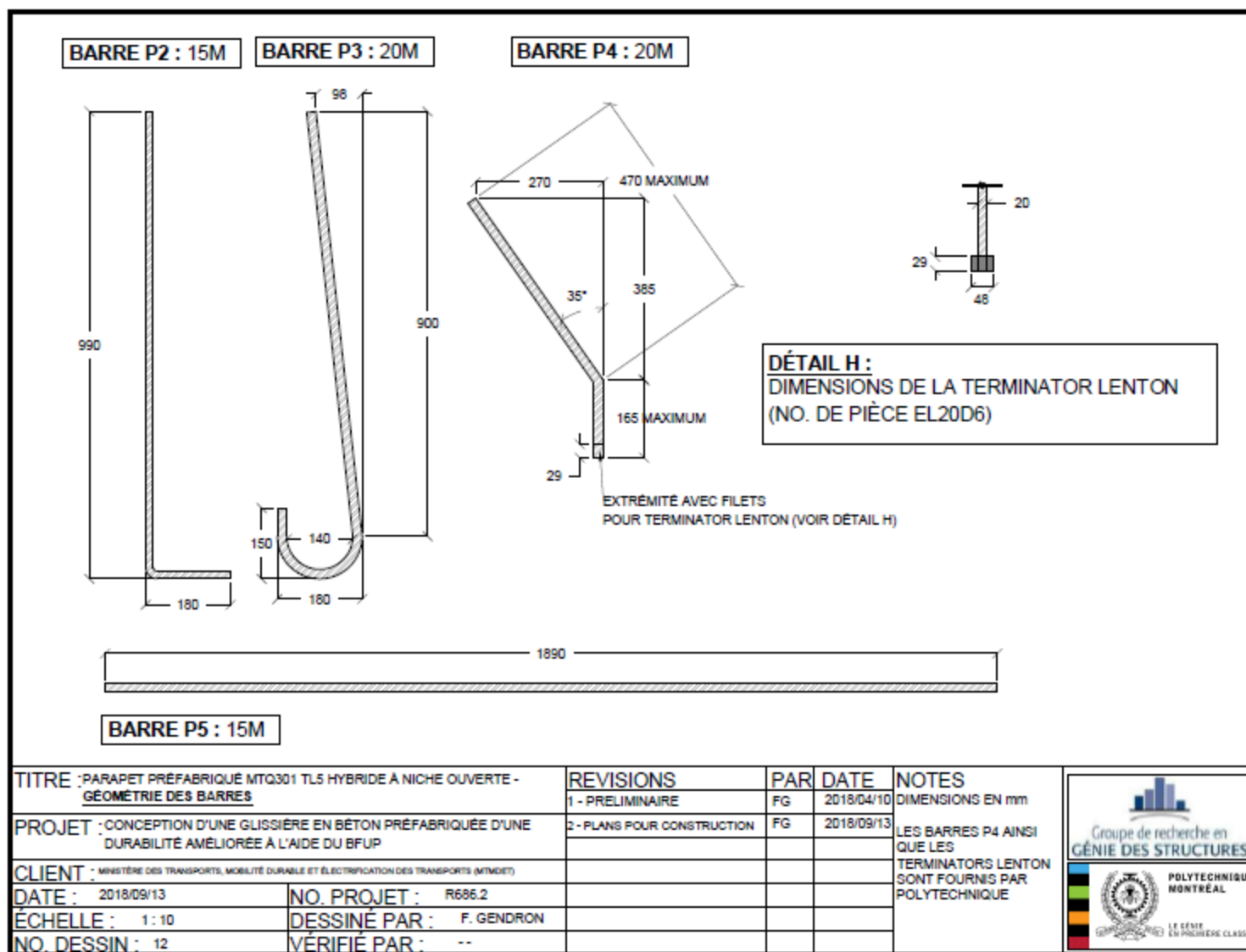


Figure A.12 - Parapet préfabriqué MTQ301 TL-5 à niche ouverte - géométrie des barres

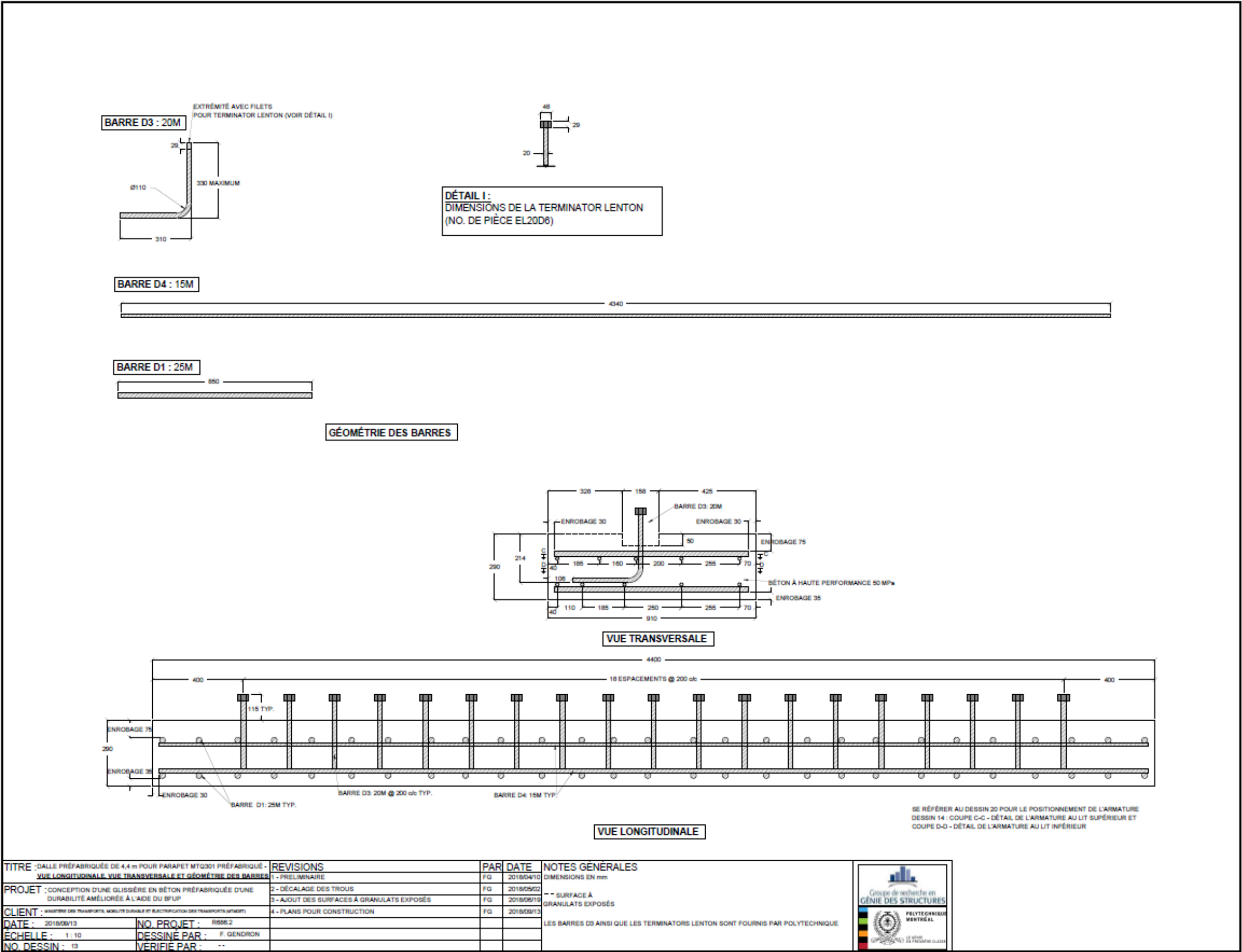


Figure A.13-Dalle de 4.4m pour parapet MTQ301 préfabriqué-vue longitudinale, vue transversale et géométrie des barres

Figure A.14- Dalle de 44 mpour parapet MIO801 préfabriqué- détail de l'armature au lit supérieur et au lit inférieur

ANNEXE B ÉTAPES DE L'INSTALLATION DU MONTAGE EXPÉRIEMENTAL

Tableau B .1 - Étapes générales de l'installation du montage (suite)

#	Description des tâches
A	MÉNAGE
A1	Plancher (dégagement pour plateforme élévatrice)
A2	Sous-sol
B	INSTALLER ÉQUERRE
B1	Transporter les pièces dans zone
B2	Placer la colonne
B3	Fixer la béquille à la colonne - serrer les boulons
B4	Installer les plaques d'ancrage et les barres Diwidag 1-7/8" 6pi
B5	Installer les plaques d'ancrage au plafond (sous-sol)
B6	Tensionner les barres par le haut (Tentec)
B7	Fixer la plaque de butée du vérin
C	INSTALLER LE VÉRIN MÉCANIQUEMENT
C1	Installer un support temporaire pour le vérin
C2	Transporter le vérin dans la zone
C3	Fixer la plaque d'ancrage et la plaque bélier (Vis 1,5"-12 serrer manuellement)
C4	Soulever et fixer le vérin à l'équerre (Vis 2"-4,5)
C5	Déterminer le poids du vérin à balancer
D	FABRIQUER ET INSTALLER LA PLAQUE BÉLIER
D1	Faire trou fileté 1/2" -? dans "Plaque de connexion D" pour manutention (= plaque bélier)
D2	Coffrage - armature
D3	Coulée BFUP
D4	Aligner la rotule (horizontale) + bloquer supernut
D5	Soulever la plaque et soutenir devant la rotule du vérin
D6	Fixer la plaque bélier (Vis 1,5"-12 serrer manuellement)
E	INSTALLER LE SYSTÈME HYDRAULIQUE
E1	Aménager l'espace (contrôleur, HSM, boyaux)
E2	Raccorder les boyaux
E3	Sécuriser les boyaux

Tableau B .1 - Étapes générales de l'installation du montage (suite)

#	Description des tâches
E4	Raccorder les câbles
E5	Purger (cycliser vérin)
F	INSTALLER LE PORTIQUE
F1	Transporter les pièces dans zone
F2	Installer les plaques d'ancrage et les barres Diwidag 1-3/8" 6pi (colonnes)
F3	Installer les plaques d'ancrage au plafond (sous-sol)
F4	Tensionner les barres par le haut (Tentec)
F5	Fixer la poutre aux colonnes (cornières + boulons 1"-8)
F6	Assembler les bras et poulies (boulons 1"-8)
F7	Fixer les bras à la colonne (boulons 1"-8) - ajuster leur position vis-à-vis émerillons et trous plancher
F8	Installer le panier du contre-poids au sous-sol
F9	Attacher les câbles (1/2" ; boucle + serre-câbles)
F10	Charger le contre-poids (légèrement moins que poids vérin)
G	INSTALLER LA BUTÉE À L'ARRIÈRE
G1	Transporter les pièces dans zone
G2	Préparer la zone pour le coulis (ducktape sans plastique) + repère d'alignement
G3	Fabriquer le coulis épais (drystone ou Ultracal) et l'étendre
G4	Déposer la dalle de butée
G5	Installer les barres Diwidag 1-7/8" 6pi
G6	Installer les plaques d'ancrage au plafond (sous-sol)
G7	Tensionner les barres par le sous-sol (Tentec)
H	INSTALLER LE PARAPET
H1	Peindre (latex mat)
H2	Préparer la zone pour le coulis (plastique + coffrage)
H3	Transporter le parapet dans la zone
H4	Soulever le parapet - ajuster la balance
H5	Attacher plastique en-dessous du parapet
H6	Fabriquer le coulis épais (Ultracal) et l'étendre aux points de compression (contre butée et sous ancrages)
H7	Positionner et déposer le parapet
H8	Installer les plaques d'ancrage (coulis) et les barres Diwidag 1-7/8" 6pi
H9	Installer les plaques d'ancrage au plafond (sous-sol)

Tableau B .1 - Étapes générales de l'installation du montage (fin)

#	Description des tâches
H10	Tensionner les barres par le dessus (Tentec)
I	INSTALLER L'INSTRUMENTATION
I1	Préparer surface de béton (! Poussière)
I2	Coller les supports (X60)
I3	Installer poutre de support
I4	Fixer les capteurs
J	FAIRE LE CONTACT VÉRIN/PARAPET
J1	Ajuster l'orientation de la rotule + bloquer
J2	Avancer le vérin
J3	Placer "jack" sous rotule et enlever la béquille ; ajuster la hauteur
J4	Construire le coffrage
J5	Fabriquer le coulis fluide (drystone)
J6	Remplir espace entre butée et parapet ; entre béliet et parapet
K	ESSAIS
K1	Vérifier instrumentation - zéro
K2	Appliquer une Précharge pour soutenir vérin et enlever le "jack"
K3	Photos - lancer caméra
K4	Démarrer protocole de chargement (manuel)
K5	Dessiner les fissures
K6	Rupture
K7	Décharger jusqu'à la précharge
K8	Attacher le vérin pont-roulant et soutenir le vérin
K9	Rétracter le vérin puis placer la béquille
L	DÉINSTALLER L'INSTRUMENTATION ET LE PARAPET
L1	Retirer les capteurs
L2	Enlever la postension des barres
L3	Enlever les barres
L4	Soulever le parapet - ajuster la balance
L5	Transporter à proximité
L6	Transporter en entreposage

ANNEXE C LISTE DE CONTRÔLE POUR LES ESSAIS

OUVERTURE DES SYSTÈMES DE CONTRÔLE / ACQUISITION DE DONNÉES

- ☐ Vérifier le positionnement physique des capteurs

Catman - Acquisition :

- ☐ Ouvrir l'ordinateur ET le système d'acquisition ET Alimentation 10.00V
- ☐ Démarrer le logiciel Catman AP
- ☐ Ouvrir le projet « Fred01.MEP » (dans D:\Projets\Frederick Gendron 2019\)

Contrôleur – Contrôle vérin :

- ☐ Alimenter le contrôleur
- ☐ Démarrer l'ordinateur – mot de passe : *****
- ☐ **Attendre que le LED jaune (carte 493.73 HPU) s'éteigne**
- ☐ Dans Project Manager : sélectionner le projet « Frederick Gendron 2019 »
- ☐ Dans Project Manager : cliquer sur l'icône Station Manager et attendre qu'une fenêtre de dialogue d'ouverture de fichier CFG apparaisse (peut prendre plusieurs minutes)
- ☐ Ouvrir la configuration V1000-4_Frederick Gendron_2019
- ☐ Laisser le HSM OFF

MPE TestSuite – Procédure d'essai :

- ☐ Ouvrir MPE TestSuite
- ☐ Menu : Préférence → Configuration : Double-clic sur le projet Frederick Gendron 2019 [Apply] et [OK]
- ☐ « Recent Tests » : Double-clic sur « Frederick Gendron 2019 »

VIC3D – Corrélation d'images :

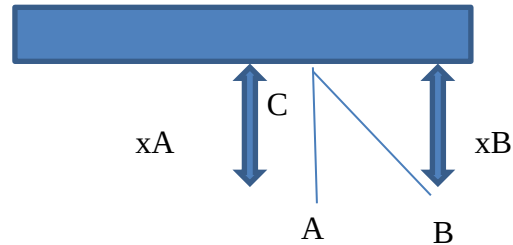
- ☐ Ouvrir le système à basse vitesse
- ☐ Synchronisation des horloges des PC

FAIRE LE CONTACT DU VÉRIN

- ☐ Démarrer 6 pompes
- ☐ **SST** – périmètre de sécurité autour du spécimen (évacuer zone)
- ☐ Attacher pont-roulant (5 tonnes) au vérin (autour du HSS)
- ☐ Suspendre le vérin : retirer les calles sur le support
- ☐ Faire ZÉRO de la charge
- ☐ **SST** – périmètre de sécurité autour du spécimen (évacuer zone)
- ☐ HSM ON
- ☐ Déplacer le vérin à : ____ mm (gap 50 mm)
- ☐ Ajuster la hauteur de la plaque de chargement à l'aide du pont roulant
 - À faire pour le 1^{er} spécimen uniquement – friction 700 kN
 - **SST** : vérifier l'action du contre poids – avec cellule de charge
 - **SST** : si le contre poids est insuffisant (vérin descend sous son poids) – ajouter des sacs (sans excès)

- ☐ Déplacer le vérin à : ____ mm (gap 5 mm)
- ☐ HSM OFF
- ☐ **SST** sécuriser l'appui du vérin (cales) – détacher le pont roulant
- ☐ Installer un coffrage entre la plaque de chargement et le spécimen
- ☐ Dry Stone (très liquide) entre la plaque de chargement et le spécimen
- ☐ Branchement des instruments
- ☐ **Catman** :
- ☐ Vérification instrumentation
 - Paramètres triangulation

AB	____ mm
AC	____ mm
BC	____ mm
xA	____ mm
xB	____ mm



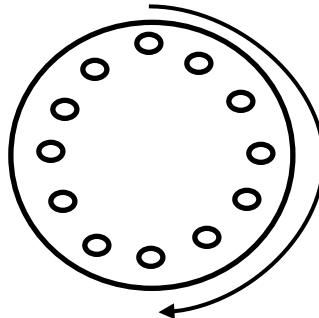
- Voltage d'alimentation 10.00 V (9.99 à 10.01V)
- « Undo Zero » des capteurs **SAUF** Charge et déplacement V1000-4
- Capture d'écran (référence course des extensomètres)
- Zéro des capteurs **SAUF** Charge et déplacement V1000-4
- Taux d'Acquisition 5 Hz
- Vérifier fonctionnement / branchement des instruments
- Vérifier avec LABO
- ☐ **Sécurité**
 - Panneau entre opérateur et vérin
 - Périmètre sécurité 1 exclusion totale(ruban)
 - Périmètre sécurité 2 exclusion visiteurs(ruban)
 - Pont roulant
 - Protection des câbles & plancher
 - Nettoyer zone d'essai (outils, ...)
 - Panneaux Lexan – sortie hydraulique
- ☐ **VIC3D** : Calibration des caméras

ESSAI – RUPTURE

- ☐ **Contrôleur** : contrôle en « Displacement »
- ☐ **MPE TestSuite** :
 - Plage vitesse [0.001 à 10] mm/min ([0.00002 à 0.167] mm/s) (Variables)
 - Vitesse initiale 0.12 mm/min (0.002 mm/s)
 - Jusqu'à déplacement de : 75 mm (Procédure)
- ☐ **Catman** : Zéro des capteurs SAUF Charge et déplacement V1000-4
- ☐ **VIC3D** : Zéro DIC – images de référence
- ☐ Attacher pont-roulant (5 tonnes) au vérin et tendre les chaines
- ☐ Ajuster serrage supernut de la rotule (desserrer)

Desserrage superbolt de la rotule

- Clé Allen 8 mm
- 1/8 de tour max à la fois
- Une vis après l'autre



- ☐ Enlever le support sous l'appui vérin après durcissement du drystone (55 MPa après 1h)
- ☐ **SST** – évacuer le périmètre 1
- ☐ **Contrôleur** : Zéro du déplacement vérin @ __ kN (Dry stone sèche)
- ☐ **SST** HSM ON
- ☐ **VIC3D** : Démarrer caméra
- ☐ **Catman** : Démarrer Acquisition
- ☐ **Contrôleur** : Appliquer charge de 25 kN (contrôle de déplacement) @ 0.01mm / click
- ☐ Relâcher les chaines du pont-roulant
- ☐ **MPE TestSuite** : Démarrer Essai
- ☐ Créer un nouveau Test Run
- ☐ Nommer fichier acquisition
- ☐ Pause – palier (100 kN, 200 kN, à tous les 50 kN jusqu'au pic, au pic et une mesure en post-pic)
- ☐ Observation des fissures et photos
 - **SST** – délimiter zone d'accès
 - **SST** – opérateur surveille contrôleur en tout temps
- ☐ **MPE TestSuite** : Arrêter essai
- ☐ Décharger et maintenir 25 kN
- ☐ Tendre les chaines du pont-roulant
- ☐ Décharger à une force de 3 kN (gap invisible)
- ☐ **VIC3D** : Arrêter caméra
- ☐ **Catman** : Arrêter acquisition
- ☐ **SST** – HSM OFF
- ☐ Poser le vérin sur le support – Détacher le pont-roulant
- ☐ Enregistrer et vérifier les données avec LABO

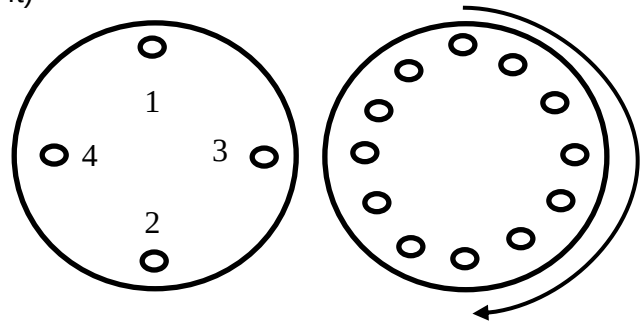
APRÈS RUPTURE

- ☐ Attacher le pour roulant au bélier - supporter
- ☐ **SST** - évacuer le périmètre 1
- ☐ **SST** – HSM ON
- ☐ **Contrôleur** : Rétracter le vérin jusqu'à course min
- ☐ **SST** – HSM OFF
- ☐ Réaligner la rotule avec un pont roulant attaché sur la plaque bélier
- ☐ Resserrer superbolt de la rotule (T = 10 lb-ft)

Serrage superbolt de la rotule

- Clé Allen 8 mm
- Phase 1
 - Serrer quatre premières vis en quinconce (T = 10 lb-ft)

- ☐ Enlever instrumentation
- ☐ Enlever la posttension
- ☐ Photos



Phase 1

Phase 2