DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET MINES

## CONCEPTION DE PARAPETS PRÉFABRIQUÉS EN BÉTON D'UNE DURABILITÉ AMÉLIORÉE À L'AIDE DU BFUP – PROJET R686.2

- RAPPORT FINAL -

Par

JEAN-PHILIPPE CHARRON, ING. (119373), PH.D., PROFESSEUR TITULAIRE CLÉLIA DESMETTRE, ING. (5029643), PH.D., ASSOCIÉE DE RECHERCHE FRÉDÉRICK GENDRON, ÉTUDIANT À LA MAÎTRISE

RAPPORT SR20-03

29 JANVIER 2020

**RAPPORT DE RECHERCHE SR20-03** 

## CONCEPTION DE PARAPETS PRÉFABRIQUÉS EN BÉTON DE DURABILITÉ AMÉLIORÉE À L'AIDE DU BFUP – PROJET R686.2 - RAPPORT FINAL -

PRÉPARÉ À L'ATTENTION DE

DANIEL BOULET, ING., PH.D.

Service de la gestion des structures Direction des structures Ministère des Transports du Québec (MTQ) 880, chemin Sainte-Foy, suite 3.50 Québec (Québec) G1S 2L2

PAR

JEAN-PHILIPPE CHARRON, ING. (119373), PH.D., PROFESSEUR TITULAIRE Clélia Desmettre, ING. (5029643), PH.D., Associée de recherche Frédérick Gendron, Étudiant à la maîtrise

> GROUPE DE RECHERCHE EN GÉNIE DES STRUCTURES ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL C.P. 6079, STATION CENTRE-VILLE MONTRÉAL (QUÉBEC) H3C 3A7

> > MONTRÉAL, 29 JANVIER 2020





## TABLE DES MATIÈRES

| TAB  | LE DES     | 5 MATIÈI                | RES   | I              |
|------|------------|-------------------------|---|----------------|
| LIST | E DES      | TABLEA                  | UX  | IV             |
| LIST | E DES      | FIGURES                 | S   | VI             |
| 1    | REM        | ERCIEM                  | ENTS  | 1              |
| 2    | INTR       | ODUCTI                  | ON  | 2              |
|      | 2.1        | Contex                  | te du mandat  | 2              |
|      | 2.3        | Organi                  | sation du rapport   | 3              |
| 3    | REVI       | JE DE LA                | A DOCUMENTATION SUR LES PARAPETS PRÉFABRIQUÉS   | 4              |
|      | 3.1<br>3.2 | Exigeno<br>Évaluat      | ces de conception des parapets TL-5<br>tion de la capacité structurale d'un parapet             | 4<br>6         |
|      |            | 3.2.1<br>3.2.2          | Méthode analytique avec les lignes de rupture<br>Exemple de calcul avec le parapet MTQ301       | 7<br>9         |
|      | 3.3<br>3.4 | Excent<br>Continu       | ricité de la charge<br>uité longitudinale des parapets préfabriqués<br>Considérations générales | 13<br>16       |
|      |            | 3.4.2                   | Types de connexion pour la continuité   | 17             |
|      | 3.5        | Synthè                  | se  | 23             |
| 4    | CON        | CEPTION                 | N DES PARAPETS PRÉFABRIQUÉS   | 25             |
|      | 4.1        | Concep                  | ots de parapets proposés  | 26             |
|      |            | 4.1.1<br>4.1.2          | Parapet hybride à niche ouverte<br>Parapet MTQ301 préfabriqué à niche ouverte                   | 26<br>28       |
|      | 4.2        | Modèle                  | es numériques   | 30             |
|      |            | 4.2.1<br>4.2.2<br>4.2.3 | Logiciel et modèles constitutifs du béton<br>Propriétés des matériaux<br>Géométrie des modèles  | 30<br>32<br>34 |

| 41<br>44<br>50<br>52 |
|----------------------|
| 44<br>44<br>50<br>52 |
| 44<br>50<br>52       |
| 50<br>52             |
| 52                   |
|                      |
| 53                   |
| 55                   |
| 59                   |
| 62                   |
| 71                   |
| 73                   |
| 73                   |
| 73                   |
| 74                   |
| 76                   |
| 77                   |
| 82                   |
| 83                   |
| 87                   |
| 88                   |
| 88                   |
| 88                   |
| 90                   |
| 90                   |
|                      |
| 91                   |
| •                    |

|   |      | 6.2.3            | Essai sur deux parapets MTQ301 préfabriqués de 2 m connectés                       | soumis à un             |
|---|------|------------------|--|-------------------------|
|   |      | 6.2.4            | Comparaison du comportement des parapets   |                         |
| 7 | VAL  | DATION           | I DES MODÈLES NUMÉRIQUES   |                         |
|   | 7.1  | Princip          | pales modifications entre les modèles préliminaires et finaux                      | 102                     |
|   |      | 7.1.1            | Propriétés des matériaux   |                         |
|   |      | 712              | Effet de l'orientation des fibres  | 103                     |
|   |      | 7.1.3            | Effet du retrait   | 103                     |
|   |      | 7.1.4            | Autres paramètres modifiés   |                         |
|   | 7.2  | Modèl            | e du parapet hybride   | 105                     |
|   |      | 7.2.1            | Comparaison des résultats numérique et expérimentaux                               | 105                     |
|   |      | 7.2.2            | Validation de la performance du parapet hybride selon la norme CSA-S6              | 108                     |
|   | 7.3  | Modèl            | e du parapet MTQ301 préfabriqué  | 110                     |
|   |      | 7.3.1<br>l'extré | Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour le ch<br>mité connectée | nargement sur<br>111    |
|   |      | 7.3.2            | Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour le                      | chargement à            |
|   |      | l'extré          | mité non-connectée   | 114                     |
|   |      | 7.3.3<br>norme   | Validation de la performance du parapet MTQ301 préfabriqué selon les CSA           | s critères de la<br>118 |
|   | 7.4  | Bilan s          | ur la conformité des parapets à l'étude  | 121                     |
| 8 | CON  | ICLUSIOI         | N ET RECOMMANDATIONS   | 122                     |
|   | 8.1  | Rappel           | l des objectifs  | 122                     |
|   | 8.2  | Conclu           | isions   | 122                     |
|   |      | 8.2.1            | Premier objectif   | 122                     |
|   |      | 8.2.2            | Deuxième et troisième objectifs  | 123                     |
|   |      | 8.2.3            | Quatrième objectif   | 124                     |
|   |      | 8.2.4            | Cinquième objectif   | 125                     |
|   | 8.3  | Recom            | imandations  | 126                     |
| 9 | BIBL | IOGRAP           | HIE  | 128                     |

## LISTE DES TABLEAUX

| Tableau 1 - Charges statiques non-pondérées de conception des dispositifs de retenue (CSA, 2014)5   |
|---|
| Tableau 2 - Paramètres utilisés pour évaluer la capacité maximale du parapet MTQ30111   |
| Tableau 3 - Capacité du parapet MTQ301 déterminée par la méthode des lignes de rupture, pour<br>L <sub>t</sub> = 700 mm   |
| Tableau 4 - Capacité du parapet MTQ301 déterminée par la méthode des lignes de rupture, pour $L_t$ = 2400 mm  |
| Tableau 5 - Pertes de capacité pour un chargement à l'extrémité versus un chargement centré15   |
| Tableau 6 - Propriétés des bétons du parapet MTQ301 préfabriqué (Charron et al., 2013a)32   |
| Tableau 7 - Propriétés des bétons du parapet hybride (Charron et al., 2013a)  |
| Tableau 8 - Propriétés des interfaces utilisées dans les modélisations       35   |
| Tableau 9 - Dimension du maillage (en mm) des éléments des parapets à l'étude   |
| Tableau 10 - Capacité maximale d'un parapet hybride de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm <sup>3</sup> sous chargement centré et à l'extrémité40            |
| Tableau 11 - Capacité maximale d'un parapet MTQ301 préfabriqué de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm <sup>3</sup> sous chargement centré et à l'extrémité43 |
| Tableau 12 - Résumé des propriétés utilisées pour les différents BFUP considérés45  |
| Tableau 13 - Capacité maximale du parapet hybride selon le pourcentage de fibres dans la coque pourun chargement central47  |
| Tableau 14 - Capacité maximale du parapet hybride selon le pourcentage de fibres dans la coque pourun chargement excentré   |
| Tableau 15 - Ouvertures de fissures dans la niche de connexion du parapet hybride pour unchargement centré49  |
| Tableau 16 - Ouvertures de fissures dans la niche de connexion du parapet hybride pour unchargement centré52  |
| Tableau 17 - Diminution de la capacité maximale pour les parapets hybride et MTQ301 préfabriqué<br>de 2 m dû à un chargement excentré54                                   |

| Tableau 18 - | <ul> <li>Augmentation de la capacité maximale du parapet hybride avec augmentation de sa<br/>longueur</li> </ul>                       | 6 |
|--------------|--|---|
| Tableau 19 - | <ul> <li>Diminution de capacité maximale du parapet hybride de différentes longueurs due à<br/>l'excentricité de la charge5</li> </ul> | 9 |
| Tableau 20 - | <ul> <li>Effet de plaques sélectionnées sur la capacité maximale de parapets de 4 m sous</li> <li>chargement excentré6</li> </ul>      | 0 |
| Tableau 21 - | <ul> <li>Effet de plaques sélectionnées sur la capacité maximale de parapets de 4 m sous<br/>chargement excentré6</li> </ul>           | 2 |
| Tableau 22 - | Propriétés des matériaux cimentaires utilisés dans les clés de connexion longitudinale6  | 3 |
| Tableau 23 - | - Effet de la connexion longitudinale sur la capacité maximale des parapets hybrides6  | 7 |
| Tableau 24 - | - Propriétés des bétons8   | 9 |
| Tableau 25 - | - Propriétés des barres d'armatures9   | 0 |
| Tableau 26 - | - Capacité maximale d'un parapet hybride de 4 m chargé par une plaque de chargement<br>de 2400 mm10                                    | 9 |
| Tableau 27 - | - Capacité maximale de parapets MTQ301 préfabriqués de 4 m chargés par une plaque de chargement de 2400 mm                             | 8 |

## LISTE DES FIGURES

| Figure 1 - Exemples d'essais de chargement sur des parapets en béton  | .5 |
|---|----|
| Figure 2 - Position d'application des charges sur les dispositifs de retenue (CSA, 2014)  | .6 |
| Figure 3 - Plans de rupture utilisés pour la dérivation des équations de lignes de rupture présentées dans la norme de l'AASHTO (2017)  | .7 |
| Figure 4 - Plans de rupture utilisés pour la dérivation des équations de lignes de rupture proposées par Fadaee et al. (2018)   | .7 |
| Figure 5 - Coupe type du parapet MTQ301 (MTQ, 2017)   | 10 |
| Figure 6 - Lignes de rupture considérées lors de l'analyse du parapet de référence  | 11 |
| Figure 7 - Plans de rupture d'un parapet en béton armé selon le type de chargement (Alberson et al., 2004)  | 14 |
| Figure 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) | 18 |
| Figure 9 - Connexion par effet de butée en béton armé (Bleitgen & Stiemer, 2006)  | 18 |
| Figure 10 - Connexion boulonnée croisée (Bligh et al., 2003)  | 19 |
| Figure 11 - Connexions coulées en place (a) clé de cisaillement (b) ajout de barres dans la connexion?  | 21 |
| Figure 12 - Parapet préfabriqué étudié par (Namy et al., 2015b)   | 22 |
| Figure 13 - Comparaison des résultats numériques (E.F.) et expérimentaux (Exp) pour chacune des configurations étudiées par Namy et al. (2015b)   | 22 |
| Figure 14 - Résultats numériques sur des parapets de 4 m connectés ou non (Namy et al., 2015a)  | 23 |
| Figure 15 - Parapet hybride à niche ouverte en BFUP - vue de profil note : Dimensions en mm   | 27 |
| Figure 16 - Parapet hybride à niche ouverte en BFUP - vue de face note : Dimensions en mm   | 27 |
| Figure 17 - Parapet MTQ301 préfabriqué versus parapet MTQ301 – vue de profil Note : Dimensions en mm  | 29 |
| Figure 18 - Parapet MTQ301 préfabriqué – vue de face (Note : Dimensions en mm)  | 29 |

| Figure 19 - Exemple d'une loi constitutive en traction définie par l'utilisateur du matériau<br>CC3DNonLinCementitious2User (Červenka et al., 2016)  |
|--|
| Figure 20 - Largeur de bande de fissuration $L_t$ (Červenka et al., 2016)  |
| Figure 21 - Comportement en traction des bétons du parapet MTQ301 préfabriqué (Charron et al., 2013a)33  |
| Figure 22 - Comportement en traction des bétons du parapet hybride (Charron et al., 2013a)   |
| Figure 23 - Comportement en traction des aciers d'armature   |
| Figure 24 - Géométries des modèles   |
| Figure 25 - Géométries de l'armature   |
| Figure 26 - Géométrie, maillage et conditions limites et de chargement du parapet MTQ301 préfabriqué 37  |
| Figure 27 - Géométrie, maillage et conditions limites et de chargement du parapet hybride37  |
| Figure 28 - Élément 3D tétraédrique (Červenka et al., 2016)  |
| Figure 29 - Modélisation d'un parapet hybride de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm <sup>3</sup><br>sous chargement centré et à l'extrémité40  |
| Figure 30 - Plan de rupture d'un parapet hybride de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm <sup>3</sup><br>(a) chargé au centre et (b) chargé à l'extrémité, ouverture de fissure (w) > 0.3 mm40 |
| Figure 31 - Contraintes maximales dans les barres d'armatures du parapet hybride de 4 m chargé par<br>une plaque de 2400 mm41  |
| Figure 32 - Modélisation d'un parapet MTQ301 préfabriqué de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm <sup>3</sup> sous chargement centré et à l'extrémité42  |
| Figure 33 - Plan de rupture d'un parapet MTQ301 préfabriqué de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm <sup>3</sup> (a) chargé au centre et (b) chargé à l'extrémité, w > 0.3 mm43                |
| Figure 34 - Contraintes maximales dans les barres d'armatures du parapet MTQ301 préfabriqué de 4<br>m chargé par une plaque de 2400 mm43   |
| Figure 35 - Courbes de comportement utilisées pour l'étude du pourcentage de fibres du BFUP dans<br>les niches de connexion45  |
| Figure 36 - Courbes de comportement réduites utilisées pour l'étude du pourcentage de fibres du<br>BFUP dans la coque du parapet hybride46   |
| Page   vi  |

| Figure 37 - | Effet du pourcentage de fibres dans la coque du parapet hybride47  |
|-------------|--|
| Figure 38 - | Effet du pourcentage de fibres dans la niche de connexion du parapet hybride49   |
| Figure 39 - | Effet du pourcentage de fibres sur la fissuration dans la niche de connexion du parapet hybride, au pic ( $F_{max}$ = 868 kN, d = 7.8 mm), aucun filtre sur <i>w</i> |
| Figure 40 - | Effet du retrait de la niche de connexion du parapet hybride51   |
| Figure 41 - | Effet du retrait sur la fissuration dans la niche de connexion du parapet hybride, au pic<br>( <i>F<sub>max</sub></i> = 868 kN, d = 7,8 mm)52                        |
| Figure 42 - | Modèle du parapet hybride de 2 m sous chargement excentré53  |
| Figure 43 - | Effet d'un chargement excentré sur les parapets hybride et MTQ 301 préfabriqué de 2 m54  |
| Figure 44 - | Plans de rupture des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué de 2 m55   |
| Figure 45 - | Effet de la longueur du parapet hybride sous chargement centré sur son comportement global   |
| Figure 46 - | Plans de rupture des parapets hybrides de 2, 3, 4 et 6 m, chargement centré<br>(d ≈ 11.5 mm, w > 500 μm)57   |
| Figure 47 - | Effet de la longueur du parapet hybride sous chargement excentré sur son comportement global   |
| Figure 48 - | Plans de rupture des parapets hybrides de 2, 3 et 4 m, chargés à leur extrémité<br>(F <sub>post-pic</sub> ≈ 250 kN, w > 500 µm)58                                    |
| Figure 49 - | Effet de la longueur de la plaque de chargement sur le comportement global des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué sous chargement excentré60                     |
| Figure 50 - | Effet des plaques chargement sélectionnées sur le plan de rupture de parapets de 4 m sous chargement excentré61  |
| Figure 51 - | Effet de la longueur de la plaque de chargement sur le comportement global des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué sous chargement centré61                       |
| Figure 52 - | Effet des plaques chargement sélectionnées sur le plan de rupture de parapets de 4 m sous chargement centré62  |
| Figure 53 - | Géométrie de la clé de connexion longitudinale modélisée63   |
| Figure 54 - | Cas de chargement étudiés pour les parapets connectés longitudinalement64<br>P a g e   viii  |

| Figure 55 - | Comportement de 2 parapets de 2 m et plaque L700 en présence de la clé de connexion longitudinale (configuration 1)      | 65 |
|-------------|--|----|
| Figure 56 - | Comportement de 2 parapets de 4 m et plaque L700 en présence de la clé de connexion longitudinale (configuration 2)      | 65 |
| Figure 57 - | Comportement de 2 parapets de 4 m et plaque L2400 en présence de la clé de connexion longitudinale (configuration 3)     | 66 |
| Figure 58 - | Comparaison fissuration Cas D de chargement, pour les configurations d'essai 2 et 3 (d $\approx$ 8 mm, w > 200 $\mu m$ ) | 69 |
| Figure 59 - | Comportement de 2 parapets de 2 m et plaque L700 en présence de la clé de connexion longitudinale (configuration 1)      | 70 |
| Figure 60 - | Comportement de 2 parapets de 4 m et plaque L700 en présence de la clé de connexion longitudinale (configuration 2)      | 70 |
| Figure 61 - | Comportement de 2 parapets de 4 m et plaque L2400 en présence de la clé de connexion longitudinale (configuration 3)     | 71 |
| Figure 62 - | Schémas des essais proposés  | 75 |
| Figure 63 - | Géométrie de la clé de connexion longitudinale (vue de haut)   | 76 |
| Figure 64 - | Fabrication du cœur en BO du parapet hybride   | 77 |
| Figure 65 - | Fabrication du parapet hybride   | 78 |
| Figure 66 - | Production des surfaces à granulats exposés  | 78 |
| Figure 67-  | Parapet MTQ301 préfabriqué   | 79 |
| Figure 68 - | Dalle de pont de 2,4 m   | 79 |
| Figure 69 - | Installation des parapets MTQ301 préfabriqués sur la dalle de pont   | 80 |
| Figure 70 - | Coulée de la niche de connexion  | 81 |
| Figure 71 - | Assemblage final des spécimens d'essai   | 81 |
| Figure 72 - | Schéma du montage expérimental   | 83 |
| Figure 73 - | Application du chargement excentré sur le parapet hybride  | 83 |

| Figure 74 - | Instrumentation pour l'essai sur le parapet hybride de 2 m   | 85          |
|-------------|--|-------------|
| Figure 75 - | Instrumentation pour l'essai sur les deux parapets MTQ301 préfabriqués avec chargeme<br>près de la clé de connexion longitudinale                          | nt<br>85    |
| Figure 76 - | Instrumentation pour l'essai sur les deux parapets MTQ301 préfabriqués avec chargeme<br>à l'extrémité libre  | nt<br>86    |
| Figure 77 - | Mesure du déplacement à l'arrière du spécimen  | 86          |
| Figure 78 - | Positionnement des barres instrumentées sur le spécimen composé d'un parapet hybrid<br>de 2 m  | e<br>86     |
| Figure 79 - | Positionnement des barres instrumentées sur le spécimen composé de deux parapets<br>MTQ301 préfabriqués de 2 m   | 87          |
| Figure 80 - | Comportement en traction des BFUP utilisés   | 89          |
| Figure 81 - | Courbes contrainte-déformation des aciers d'armatures  | 90          |
| Figure 82 - | Résultats d'essai sur parapet hybride de 2 m soumis à un chargement excentré   | 91          |
| Figure 83 - | Progression de la fissuration durant l'essai de chargement excentré sur parapet hybride de 2   | m 92        |
| Figure 84 - | Plan de rupture final d'un parapet hybride de 2 m soumis à un chargement excentré  | 92          |
| Figure 85 - | Résultats d'essai sur une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité connectée                               | 94          |
| Figure 86 - | Progression de la fissuration durant l'essai sur une série de deux parapets MTQ301<br>préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité connectée | 95          |
| Figure 87 - | Rupture de la clé de connexion longitudinale sur le parapet non-chargé   | 95          |
| Figure 88 - | Plan de rupture final d'une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité connectée                             | 95          |
| Figure 89 - | Résultats d'essai sur une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité libre                                   | 98          |
| Figure 90 - | Progression de la fissuration durant l'essai sur une série de deux parapets MTQ301<br>préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité libre     | 98          |
| Figure 91 - | Plan de rupture final d'une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un<br>chargement excentré à l'extrémité libre<br>P a g                     | 99<br>e   x |

| Figure 92 · | Comparaison des résultats obtenus des trois essais réalisés sur les parapets préfabriqués à<br>l'étude   |
|-------------|--|
| Figure 93 · | Lois de comportement en traction considérées dans les modèles numériques105  |
| Figure 94   | Comparaison entre les courbes force-déplacement transversal expérimentale et numérique pour l'essai de chargement excentré sur parapet hybride   |
| Figure 95 · | Comparaison de fissuration pour une charge appliquée d'environ 400 kN pour l'essai de chargement excentré sur parapet hybride107   |
| Figure 96   | Comparaison des plans de rupture finaux pour l'essai de chargement excentré sur parapet<br>hybride   |
| Figure 97 · | Comparaison des évolutions numérique et expérimentale de la contrainte dans les barres<br>d'armatures instrumentées pour l'essai de chargement excentré sur parapet hybride108   |
| Figure 98   | Parapet hybride de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm <sup>3</sup> 109   |
| Figure 99 · | Patron de fissuration à la résistance maximale du parapet hybride soumis à des chargements centré et excentré par une plaque de chargement de 2400 mm110   |
| Figure 100  | <ul> <li>Contraintes dans les barres d'armature à la résistance maximale du parapet hybride de</li> <li>4 m chargé par une plaque de chargement de 2400 mm110</li> </ul>   |
| Figure 101  | - Comparaison entre les courbes force-déplacement transversal expérimentale et numérique pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué  |
| Figure 102  | <ul> <li>Comparaison de fissuration pour une charge appliquée d'environ 250 kN pour l'essai de<br/>chargement excentré à l'extrémité connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué112</li> </ul>  |
| Figure 103  | <ul> <li>Comparaison des plans de rupture finaux pour l'essai de chargement excentré à<br/>l'extrémité connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué112</li> </ul>  |
| Figure 104  | <ul> <li>Comparaison entre le modèle numérique et les résultats expérimentaux de l'évolution de<br/>la contrainte dans les barres d'armatures instrumentées pour l'essai de chargement<br/>excentré à l'extrémité connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué</li></ul> |
| Figure 105  | <ul> <li>Contraintes dans les barres d'armature au pic de la courbe force-déplacement pour</li> <li>l'essai de chargement excentré à l'extrémité non connectée sur parapet MTQ301</li> <li>préfabriqué</li></ul>   |

| Figure 106 | <ul> <li>Comparaison entre les courbes force-déplacement transversal expérimentale et<br/>numérique pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité non-connectée sur parapet<br/>MTQ301 préfabriqué</li> </ul>  |
|------------|--|
| Figure 107 | <ul> <li>Comparaison de fissuration pour une charge appliquée d'environ 200 kN pour l'essai de<br/>chargement excentré à l'extrémité non-connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué115</li> </ul>  |
| Figure 108 | <ul> <li>Comparaison des plans de rupture finaux pour l'essai de chargement excentré sur<br/>parapet MTQ301 préfabriqué116</li> </ul>  |
| Figure 109 | <ul> <li>Comparaison entre le modèle numérique et les résultats expérimentaux de l'évolution de<br/>la contrainte dans les barres d'armatures instrumentées pour l'essai de chargement<br/>excentré à l'extrémité non connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué117</li> </ul> |
| Figure 110 | <ul> <li>Contraintes dans les barres d'armature au pic de la courbe force-déplacement pour<br/>l'essai de chargement excentré à l'extrémité non connectée sur parapet MTQ301<br/>préfabriqué</li></ul>   |
| Figure 111 | - Parapets MTQ301 préfabriqués de 4 m chargés par une plaque de chargement de 2400 mm119   |
| Figure 112 | <ul> <li>Patrons de fissuration à la résistance maximale du parapet MTQ301 préfabriqué soumis à<br/>des chargements centré et excentré par une plaque de chargement de 2400 mm119</li> </ul>   |
| Figure 113 | <ul> <li>Contraintes dans les barres d'armature à la résistance maximale du parapet MTQ301</li> <li>préfabriqué soumis à des chargements centré et excentré par une plaque de chargement</li> <li>de 2400 mm</li></ul>   |

## **1 REMERCIEMENTS**

Les auteurs de ce rapport désirent remercier les collaborateurs du ministère des Transports du Québec (MTQ) pour leur participation active au projet de recherche. Les collaborateurs sont :

- ✓ Daniel Boulet, ing., Ph.D., Direction générale des structures
- ✓ Rabah Magramane, ing., Direction générale des structures
- ✓ Vanessa Durand, ing., M.Sc., Direction Générale du Laboratoire des Chaussées (DGLC)
- ✓ Bruno Coulombe et Soufiene Ben Mabrouk, Direction Générale de la Gestion des Actifs Routiers et de l'Innovation (DGGARI)

#### 2.1 CONTEXTE DU MANDAT

Une large proportion des ouvrages d'art sous la juridiction du ministère des Transports du Québec (MTQ) présente actuellement des signes de dégradation. Selon l'avancement de la dégradation et la durée de vie utile résiduelle du pont, ou de ses éléments structuraux, une réhabilitation partielle ou une reconstruction complète peuvent être envisagées à court ou moyen termes. Dans certaines situations, il importe que ces interventions soient réalisées sur une courte période de temps afin de limiter leur impact sur les usagers et les résidents (temps et coûts des délais de transport, nuisance sonore, etc.). De plus, les interventions doivent présenter une durabilité prolongée pour maximiser les investissements sur les infrastructures.

Depuis les années 1990, des travaux de recherche ont mené au développement de bétons fibrés ultra performants (BFUP). En comparaison au béton conventionnel, les BFUP présentent des résistances remarquablement élevées, une grande capacité de déformation et une durabilité exceptionnelle (Charron & Desmettre, 2013). Le BFUP a été utilisé avec succès pour la conception de pré-dalles (Lessard et al., 2008), de dalles (Lachance et al., 2008; Toutlemonde & Resplendino, 2011) et parapets préfabriqués pour les ponts (Charron et al., 2013b; Duchesneau et al., 2011), ainsi que pour le renforcement de dalles (Habel, 2004; Noshiravani, 2012) et de piles de pont (Dagenais & Massicotte, 2013). Les comportements mécanique et déformationnel de même que la durabilité de ce matériau ont été caractérisés. L'efficacité du BFUP ayant été démontrée pour de multiples applications structurales, le MTQ peut envisager une utilisation de ce type de matériau pour des structures soumises à des conditions environnementales très sévères requérant une durabilité prolongée, et pour des structures nécessitant une performance mécanique très élevée (soumises à des charges importantes ou d'impacts, besoins de renforcement, zones restreintes de transfert d'efforts, etc.).

En 2011, le MTQ a financé le projet de recherche R686.1 qui consistait à développer des parapets préfabriqués de type TL-5 (CSA, 2014) pour les ponts conçus avec du BFUP, de manière à augmenter leur durée de vie utile. Ce projet a mis en évidence, via des essais expérimentaux et des simulations numériques, la performance mécanique sous chargement centré d'un parapet préfabriqué hybride (coque en BFUP et cœur en béton ordinaire (BO)) avec une niche de connexion parapet-dalle ouverte à remplir en chantier avec du BFUP. Ce type de parapet a permis d'atteindre une capacité maximale de 47 % supérieure à l'exigence du code CSA S6 (2014), une durabilité prolongée avec des fissures inférieures à 0.04 mm sous chargement de service et un coût réduit sur le cycle de vie d'un pont de 75 à 125 ans (Charron et al., 2011b). Le comportement de ce parapet sous d'autres conditions de chargement (chargement excentré, avec une connexion longitudinale, etc.) n'a cependant pas pu être évalué lors du projet R686.1. Le mandat de ce projet de recherche R686.2 consiste alors à valider le bon comportement du parapet hybride sous les conditions de chargement non testées lors du projet R686.1. En parallèle, il vise également à étendre le concept de connexion parapet-dalle en BFUP du parapet hybride pour

développer un parapet préfabriqué en BHP inspiré du parapet de référence MTQ301 coulé en place. L'objectif étant que ces concepts puissent être ensuite introduits sur les ponts par le MTQ.

#### 2.2 OBJECTIF DU MANDAT

Ce projet de recherche consiste à finaliser la conception du parapet hybride en BFUP de catégorie TL-5 en validant son comportement sous chargement excentré ainsi qu'en étudiant l'effet de différents paramètres sur son comportement mécanique (longueur du parapet, continuité entre les parapets, type de BFUP utilisé). En parallèle, ce projet a pour autre objectif de développer un parapet préfabriqué en BHP, inspiré du parapet de référence MTQ301 coulé en place présentement utilisé par le MTQ (2017), et qui utilise le même concept de connexion parapet-dalle en BFUP que le parapet hybride.

Les objectifs spécifiques du projet sont résumés ci-dessous.

- 1) Réaliser la conception ou la mise à jour des parapets préfabriqués hybrides et MTQ301.
- 2) Étudier numériquement l'effet des propriétés matériaux comme le dosage en fibres et le retrait sur le comportement des parapets développés.
- 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.
- 4) Étudier expérimentalement le comportement des parapets étudiés sous un chargement statique excentré.
- 5) Statuer sur la conformité des parapets vis-à-vis des exigences de la norme CSA S6.

#### 2.3 ORGANISATION DU RAPPORT

Tout d'abord, une revue de la littérature sur les parapets préfabriqués se concentrant principalement sur les effets de l'excentricité de la charge et de la continuité longitudinale est présentée au **Chapitre 3**. Ensuite, le **Chapitre 4** expose le processus de conception des parapets à l'étude dans ce projet ainsi qu'une étude paramétrique numérique préliminaire sur les effets des propriétés matériaux et des conditions structurales sur la performance des parapets conçus. Pour continuer, le **Chapitre 5** met de l'avant le protocole expérimental retenu (conditions d'essai, montage, instrumentation) ainsi que le processus de fabrication des spécimens d'essai avant de présenter et d'analyser les résultats expérimentaux au **Chapitre 6**. Par la suite, ces résultats expérimentaux sont comparés aux modélisations numériques au **Chapitre 7**. Finalement, les conclusions et recommandations sont formulées au **Chapitre 8**.

Une bonne partie des informations présentées dans ce rapport ont été extraites du mémoire de maîtrise de Frédérick Gendron (2019) dont les activités ont été financées par le projet de recherche R686.2 avec le MTQ.

#### **3** REVUE DE LA DOCUMENTATION SUR LES PARAPETS PRÉFABRIQUÉS

Ce **Chapitre 3** 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 2.2). 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 (Charron et al., 2013a) qui traite de cette question en détails.

#### 3.1 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 rependues sont : les tests de chargement statique (Figure 1a) afin de vérifier la capacité structurale de la glissière et les tests de chargement dynamique, généralement réalisés via un essai de pendule (Figure 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 comparé les effets d'un chargement statique et d'un chargement dynamique pour un montage expérimental similaire à celui présenté à la **Figure 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 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 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).

| Nivozu d'essai | Charge transversale | Charge longitudinale | Charge verticale |
|----------------|---------------------|----------------------|------------------|
| Niveau u essai | (kN)                | (kN)                 | (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). 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 - 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 4.6.3.

## **3.2** 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 3.2.1 puis appliquée sur le parapet MTQ301 à la Section 3.2.2.

#### 3.2.1 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 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 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 3 - Plans de rupture utilisés pour la dérivation des équations de lignes de rupture présentées dans la norme de l'AASHTO (2017)



Figure 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 3.1 ou l'équation 3.2 respectivement pour un impact dans la région

intérieure du parapet ou à son extrémité. Quant à la résistance flexionnelle, *R*<sub>w</sub>, elle doit être calculée selon l'équation 3.3 et l'équation 3.4 respectivement pour un impact dans la région intérieure du parapet ou à son extrémité.

$$L_c = \frac{L_t}{2} + \sqrt{\left(\frac{L_t}{2}\right)^2 + 8H\left(\frac{M_b + M_w}{M_c}\right)}$$
3.1

$$L_C = \frac{L_t}{2} + \sqrt{\left(\frac{L_t}{2}\right)^2 + H\left(\frac{M_b + M_w}{M_c}\right)}$$
3.2

$$R_{w} = \left(\frac{2}{2L_{c} + L_{t}}\right) \left(8M_{b} + 8M_{w} + \frac{M_{c}L_{c}^{2}}{H}\right)$$
3.3

$$R_{w} = \left(\frac{2}{2L_{c} + L_{t}}\right) \left(M_{b} + M_{w} + \frac{M_{c}L_{c}^{2}}{H}\right)$$
3.4

Où:

*H* = hauteur du parapet [m]

*L<sub>c</sub>* = longueur critique de rupture [m]

*L*<sub>t</sub> = 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 3.5 ou l'équation 3.6, 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 3.7 ou l'équation 3.8, respectivement pour un impact dans la région intérieure du parapet ou à son extrémité.

$$L_{c} = 0.5L_{t}(1+n_{2}^{2}) + \sqrt{\frac{1}{4}L_{t}^{2}(1+n_{2}^{2})^{2} + \frac{16M_{b}H + 16M_{w}H^{2} - M_{c}(n_{2}L_{t}^{2} + n_{2}^{3}L_{t}^{2}) - (M_{c\ base} - M_{c})(n_{2}^{2}L_{t}^{2} - n_{2}L_{t}^{2} - n_{2}^{3}L_{t}^{2})}{2M_{c}}}$$
3.5

$$L_{c} = 0.5L_{t}(1+n_{2}^{2}) + \sqrt{\frac{1}{4}L_{t}^{2}(1+n_{2}^{2})^{2} + \frac{2M_{b}H + 2M_{w}H^{2} - M_{c}(n_{2}L_{t}^{2} + n_{2}^{3}L_{t}^{2}) - (M_{c\ base} - M_{c})(n_{2}^{2}L_{t}^{2} - n_{2}L_{t}^{2} - n_{2}^{3}L_{t}^{2})}{2M_{c}}$$
3.6

$$R_{w} = \left(\frac{1}{2L_{c} - L_{t} - n_{2}^{2}L_{t}}\right) \left(16M_{b} + 16M_{w}H + \frac{M_{c}(L_{c}^{2} - n_{2}^{2}L_{t}L_{c}) + 2(M_{c \ base} - M_{c})(n_{2}L_{t}L_{c} - n_{2}^{2}L_{t}^{2})}{H}\right)$$

$$3.7$$

$$R_{w} = \left(\frac{1}{2L_{c} - L_{t} - n_{2}^{2}L_{t}}\right) \left(2M_{b} + 2M_{w}H + \frac{M_{c}\left(L_{c}^{2} - n_{2}^{2}L_{t}L_{c}\right) + 2(M_{c \ base} - M_{c})(n_{2}L_{t}L_{c} - n_{2}^{2}L_{t}^{2})}{H}\right)$$
3.8

Où:

H = hauteur du parapet [m]

*L<sub>c</sub>* = longueur critique de rupture [m]

*L*<sub>t</sub> = 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]

#### 3.2.2 Exemple de calcul avec le parapet MTQ301

Les équations présentées à la **Section 3.2.1** 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 6**, est un modèle de parapet standard coulé en place de niveau TL-5 utilisé actuellement au Québec.



Figure 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 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 (Fadaee et al., 2018). 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 6 - Lignes de rupture considérées lors de l'analyse du parapet de référence

Le **Tableau 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 3.1** à **3.8** pour deux configurations de chargement, soit un chargement réparti sur 700 mm de longueur (condition avec la plaque utilisée dans les essais expérimentaux lors du projet R686.1) 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 3** et au **Tableau 4**, respectivement pour les cas de chargement sur une longueur de 700 et 2400 mm.

| Paramètre       | LR1        | LR2       | LR3          | LR4          |
|-----------------|------------|-----------|--------------|--------------|
| Équations       | AASHTO     | AASHTO    | Fadaee et al | Fadaee et al |
| Н               | 1,14 m     | 0,815 m   | 1,14 m       | 0,815 m      |
| $\mathcal{M}_b$ | 0 kN-m     | 0 kN-m    | 0 kN-m       | 0 kN-m       |
| Mc              | 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 - Paramètres utilisés pour évaluer la capacité maximale du parapet MTQ301

|                               | Chargement intérieur      |                           | Chargement à l'extrémité  |                            |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Méthode                       | <i>L</i> <sub>c</sub> [m] | <i>R<sub>w</sub></i> [kN] | <i>L</i> <sub>c</sub> [m] | <i>R</i> <sub>w</sub> [kN] |
| YL1* AASHTO                   | 4.012                     | 739                       | 1.686                     | 310                        |
| YL3* Fadaee et al             | 4.016                     | 738                       | 1.690                     | 309                        |
| YL2 <sup>#</sup> AASHTO       | 2.882                     | 559                       | 1.303                     | 253                        |
| YL4 <sup>#</sup> Fadaee et al | 2.883                     | 559                       | 1.304                     | 252                        |

# Tableau 3 - Capacité du parapet MTQ301 déterminée par la méthode des lignes de rupture, pour $L_t = 700 \text{ mm}$

\* : Ligne de rupture sur la hauteur complète du parapet

<sup>#</sup> : Ligne de rupture au-dessus du point de changement de pente du parapet

# Tableau 4 - Capacité du parapet MTQ301 déterminée par la méthode des lignes de rupture, pour $L_t = 2400 \text{ mm}$

|                               | Chargement intérieur      |                           | Chargement à l'extrémité  |                           |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Méthode                       | <i>L</i> <sub>c</sub> [m] | <i>R<sub>w</sub></i> [kN] | <i>L</i> <sub>c</sub> [m] | <i>R<sub>w</sub></i> [kN] |
| YL1* AASHTO                   | 5.038                     | 928                       | 2.961                     | 545                       |
| YL3* Fadaee et al             | 5.023                     | 923                       | 2.973                     | 533                       |
| YL2 <sup>#</sup> AASHTO       | 3.980                     | 772                       | 2.961                     | 522                       |
| YL4 <sup>#</sup> Fadaee et al | 3.983                     | 770                       | 2.695                     | 517                       |

\* : Ligne de rupture sur la hauteur complète du parapet

<sup>#</sup>: Ligne de rupture au-dessus du point de changement de pente du parapet

Le **Tableau 3** et le **Tableau 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 pour un parapet de type TL-5, 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 3.3.

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 3.4.

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 3 et Tableau 4).

#### **3.3** EXCENTRICITÉ DE LA CHARGE

Cette section a pour objectif 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 7a), comparativement à un plan de rupture symétrique pour un chargement en zone intérieure (Figure 7b) qui implique donc une plus grande zone du parapet pour la reprise des efforts.





a) Chargement à l'extrémité

b) Chargement intérieur

Figure 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 glissières 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 3.2.2 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 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.

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

## Tableau 5 - Pertes de capacité pour un chargement à l'extrémité versus un chargement centré

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

Le **Tableau 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 3.2.2**), 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.

#### **3.4 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 3.4.1 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 3.4.2.

#### 3.4.1 Considérations générales

Tout type de glissière 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 de l'influence possible de la jonction entre deux parapets adjacents sur l'interaction entre la glissière et les véhicules, la discontinuité des parapets pourrait également modifier la capacité mécanique de la glissière. En effet, tel que présenté à la **Section 3.2.2**, il existe une longueur critique de parapet préfabriqué en-dessous de laquelle sa capacité structurale sera moindre que celle 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 (**Section 3.2.2**).

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 et 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 3.4.2 présente les principaux types de connexion retrouvés dans la littérature et met en avant les contextes d'utilisation auxquels ils se prêtent le mieux.

#### 3.4.2 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 3.4.2.1** à **3.4.2.3**.

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 connaitre le niveau de performance souhaité et le jeu disponible pour l'installation. Il faut effectivement considérer que, pour des parapets préfabriqués permanents, en plus de connecter les parapets entre eux, ceux-ci doivent être ancrés à une dalle. Dans ce cas, la précision requise pour l'ancrage 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.

## 3.4.2.1 Connexions par effet de butée

Les connexions par effet de butée sont les connexions entre éléments de glissière préfabriqués en béton les plus courantes. La connexion se fait par emboitement 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 8** et un exemple de butée en béton est illustré à la **Figure 9**. 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. Les connexions en béton sont moins sensibles aux conditions d'exposition extérieure qu'une connexion métallique.



Figure 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)



Figure 9 - Connexion par effet de butée en béton armé (Bleitgen & Stiemer, 2006)

Les connexions présentées à la **Figure 8** et à la **Figure 9** 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 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.

## 3.4.2.2 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 8**, le TxDOT a constaté que la capacité mécanique 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 10**, 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 10 - 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.

#### 3.4.2.3 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 11a** présente un détail possible pour ce type de connexion et la **Figure 11b** 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.

L'option illustrée à la Figure 11a 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 11b) demande beaucoup plus de précision à l'installation étant donné que les barres doivent être insérées correctement dans la connexion femelle du 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.





a) Namy et al. (2015a)

b) Wipf et al. (2017)

#### Figure 11 - Connexions coulées en place (a) clé de cisaillement (b) ajout de barres dans la connexion

Ce type de connexion ne serait pas adéquat pour des glissières 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 étudié l'effet de la continuité de parapets préfabriqués présentés à la **Figure 12**. 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 12) coulée en place à l'aide d'un mortier fibré.



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 13**.



Figure 13 - Comparaison des résultats numériques (E.F.) et expérimentaux (Exp) pour chacune des configurations étudiées par Namy et al. (2015b)

La Figure 13 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 glissières non connectées, 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 14**, 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, 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 3.3**.



Figure 14 - Résultats numériques sur des parapets de 4 m connectés ou non (Namy et al., 2015a)

#### 3.5 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 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.) pour le parapet étudié. Aussi, la capacité maximale du parapet est diminuée de 20 à 50 % lorsque la charge est appliquée sur 700 mm, tel que réalisé expérimentalement lors du projet R686.1, 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.

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 mettre en avant 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. Ces données concordent avec les analyses théoriques complétées au préalable.

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 différents types de connexion longitudinale existants 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 d'accommoder l'ancrage 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.

Considérant les informations recueillies dans cette revue de la documentation, une étude paramétrique numérique sera effectuée à la **Section 4.6** afin d'étudier plus en détail les effets d'excentricité de la charge, de longueur du parapet, de l'impact de la longueur de répartition de la charge ainsi que de la connexion longitudinale. Les informations présentées dans ce chapitre, combinées aux résultats de l'étude paramétrique numérique, permettront de déterminer les points « critiques » à tester lors de la phase expérimentale du projet de recherche R686.2.

### **4** CONCEPTION DES PARAPETS PRÉFABRIQUÉS

Tel que mentionné dans les objectifs du projet (cf. Section 2.2), deux concepts de parapets sont étudiés. Il s'agit du parapet hybride à niche ouverte développé dans la Phase 1 du projet (projet R686.1) et une version préfabriquée du parapet MTQ301 coulé en place qui est nommée parapet MTQ301 préfabriqué à niche ouverte, qui doit être développée. Le Chapitre 4 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 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 à la surface supérieure de la dalle et réparti sur 2400 mm de longueur (cf. Section 3.1).

Les concepts de parapets proposés sont présentés à la **Section 4.1**. 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 4.2**. 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 4.3** et **4.4**. Finalement, des études paramétriques sur l'effet des propriétés matériaux et sur l'effet des conditions structurales sont réalisées aux **Sections 4.5** et **4.6**.

#### 4.1 CONCEPTS DE PARAPETS PROPOSÉS

Dans cette section, le concept de parapet hybride à niche ouverte du projet R686.1 (Charron et al., 2013a) est présenté à la Section 4.1.1. Ensuite la conception du parapet MTQ301 préfabriqué à niche ouverte est détaillée à la Section 4.1.2.

# 4.1.1 Parapet hybride à niche ouverte

Le parapet hybride à niche ouverte en BFUP (Figure 15 et Figure 16), 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 comprenant 4% volumique de fibres s'épaissie 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 parapet-dalle (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. (2013a), 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 comprenant 4% volumique 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 15 - Parapet hybride à niche ouverte en BFUP - vue de profil note : Dimensions en mm



Figure 16 - Parapet hybride à niche ouverte en BFUP - vue de face note : Dimensions en mm

# 4.1.2 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 R686.1 (Charron et al., 2013a), la connexion avec une niche ouverte en BFUP comprenant 4% volumique 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. (2013a) 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 17b et à la Figure 18. Les barres d'armatures transversales présentes dans le parapet MTQ301 (Figure 17a) 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 17a) 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 17a) 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 18 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 17a) 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 18). 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 4.1.1, soit avec l'utilisation de coupleurs de type « Terminator » aux extrémités des barres provenant de la dalle et du parapet, afin d'augmenter le transfert d'efforts dans la connexion. De la même manière que pour le parapet hybride, la niche de connexion est encastrée dans la dalle (de 50 mm). La seule différence par rapport au parapet hybride est que la niche en BFUP est plus grosse (plus large et plus haute) afin d'assurer le recouvrement de 75 mm des barres de connexion provenant du parapet, par rapport au parapet hybride où la coque en BFUP, de par sa durabilité accrue, permet de placer la barre de connexion plus près de la surface extérieure avant du parapet.



a) Parapet MTQ301

b) Parapet MTQ301 préfabriqué





Figure 18 - Parapet MTQ301 préfabriqué – vue de face (Note : Dimensions en mm)

#### 4.2 MODÈLES NUMÉRIQUES

Une fois les concepts de parapets définis, des modèles numériques ont été réalisés afin de valider leurs conceptions et d'étudier leurs performances selon quelques variantes. Cette section présente les détails relatifs aux modèles numériques ayant servis aux études paramétriques. Les informations fournies concernent le logiciel choisi, les propriétés des matériaux utilisées, les éléments finis, le maillage, la méthode de résolution, les conditions limites et les conditions de chargement. Plusieurs parties présentées dans cette section sont directement extraites du rapport final du projet R686.1 (Charron et al., 2013a), puisque les informations relatives aux modèles numériques ont très peu changé depuis.

## 4.2.1 Logiciel et modèles constitutifs du béton

Les modélisations numériques des parapets ont été réalisées à l'aide de la version 5.4.1 du logiciel ATENA (Advance Tool for Engineering Nonlinear Analysis) développé par Cervenka Consulting. Il s'agit d'un logiciel d'analyses non linéaires par éléments finis, spécialisé dans la simulation d'éléments en béton armé.

Le modèle constitutif *CC3DNonLinCementitious2User* d'*ATENA* a été utilisé pour la modélisation des bétons, puisqu'il offre la possibilité d'introduire des lois de comportement obtenues lors d'essais de caractérisation, permettant ainsi de représenter adéquatement le comportement écrouissant puis adoucissant du BFUP en traction.

Ce modèle constitutif combine un modèle de fissuration pour le comportement en traction et un modèle de plasticité pour le comportement en compression (Červenka et al., 2016):

- Le modèle de fissuration en traction est basé sur le modèle orthotrope de fissuration répartie (orthotropic smeared crack model), qui considère un milieu fissuré homogénéisé (volume de béton fissuré = volume de béton non fissuré équivalent de même déformation pour une contrainte équivalente), et le modèle de bande de fissuration (crack band model). Le modèle de fissuration en traction est basé sur le critère de Rankine.
- Le modèle de plasticité en compression utilise la surface de rupture de Menétrey-William. La loi de comportement en compression comporte une phase écrouissante avant d'atteindre la résistance à la compression *f*'<sub>c</sub>, suivie d'une phase adoucissante.

Bien que l'utilisateur d'ATENA puisse introduire une loi spécifique de comportement en compression dans le modèle *CC3DNonLinCementitious2User*, les modélisations des parapets ont été effectuées avec les lois de comportement en compression définies par défaut dans ATENA, pour les valeurs de  $f'_c$  et module d'élasticité ( $E_c$ ) obtenues des essais de caractérisation menés lors du projet R686.1 sur les différents bétons utilisés.

Le comportement en traction du béton est décrit, dans ATENA, par la courbe représentant le ratio de la contrainte en traction sur la contrainte de première fissuration ( $\sigma_t/f'_t$ ) en fonction des déformations ( $\varepsilon$ ), tel qu'illustré à la **Figure 19**. Lors de la définition de cette loi, une déformation de localisation de la

fissuration,  $\varepsilon_t^{loc}$ , peut être spécifiée. Celle-ci permet de séparer le comportement écrouissant en traction, associé à la présence de multifissuration, du comportement adoucissant associé à la localisation d'une ou plusieurs macrofissures au sein du matériau. Pour une déformation supérieure à  $\varepsilon_t^{loc}$ , la déformation est évaluée à l'aide de l'Éq. 4.1, pour laquelle  $\varepsilon_1^f$  représente la déformation calculée à partir du tenseur des déformations aux points d'intégration de l'élément fini,  $\tilde{\varepsilon}_1^f$  la déformation utilisée pour déterminer la résistance actuelle en traction à partir du diagramme contrainte-déformation,  $L_t$  la largeur de la bande de fissuration (taille de l'élément projeté dans la direction de la fissure, **Figure 20**), et  $L^t_{ch}$  la longueur caractéristique (prise égale à la dimension du maillage selon des études précédentes (Beaurivage, 2009; Delsol, 2012; Duchesneau, 2011)).



Figure 19 - Exemple d'une loi constitutive en traction définie par l'utilisateur du matériau CC3DNonLinCementitious2User (Červenka et al., 2016)

$$\tilde{\varepsilon}_{1}^{f} = \varepsilon_{loc}^{f} + \left(\varepsilon_{1}^{f} - \varepsilon_{loc}^{f}\right) \frac{L_{t}}{L_{ch}^{t}}$$
 Éq. 4.1



Figure 20 - Largeur de bande de fissuration L<sub>t</sub> (Červenka et al., 2016)

Les parapets sont modélisés avec un modèle à fissures fixes (fixed crack model), ce qui signifie que la direction de la fissure est fixée selon la direction dans laquelle la fissure s'initie.

## 4.2.2 Propriétés des matériaux

Le **Tableau 6** et le **Tableau 7** regroupent les données utilisées dans le modèle constitutif de béton, respectivement pour la modélisation du parapet hybride et du parapet MTQ301 préfabriqué. Pour chacun des bétons constituant les parapets (BO des parapets et dalles, BFUP à 4% vol. de fibres des coques et niches), les valeurs de  $f'_c$  et  $E_c$ , la loi de comportement en traction, ainsi que la longueur caractéristique en traction  $L_t^{ch}$  et la déformation de localisation  $\varepsilon_t^{loc}$  sont introduites dans le modèle. Les autres données sont celles par défaut du logiciel.

Les comportements en traction utilisés pour les modélisations numériques des différents bétons constituant les deux types de parapets sont illustrés aux Figure 21 et Figure 22, respectivement pour le parapet hybride et le parapet MTQ301 préfabriqué. Ces figures sont subdivisées en deux graphiques, l'un présentant le comportement pré-pic en déformation (Figure 21a et Figure 22a), l'autre présentant le comportement postpic en ouverture de fissure (Figure 21b et Figure 22b). Les mêmes propriétés ont été utilisées pour le BFUP de la niche du parapet hybride et du parapet MTQ301 préfabriqué. Celles-ci ne sont pas illustrées sur la Figure 21, mais seulement sur la Figure 22. Les propriétés utilisées, en traction et en compression, proviennent des essais de caractérisation effectués sur les différents bétons lors du projet R686.1 et dont les résultats sont présentés à la Section 5.1.1 du rapport final de ce projet (Charron et al., 2013a).

Le **Tableau 7** et la **Figure 22** présentent deux ensembles de données pour le BFUP de la coque du parapet hybride (BFUP coque et BFUP coque réelle). Ceci s'explique par le fait que l'analyse d'une partie de carotte extraite dans le plan horizontal des parapets hybrides du projet R686.1 avait montré que l'orientation des fibres dans la coque était plus défavorable que l'orientation préférentielle retrouvée dans les spécimens de caractérisation, étant donné leurs différences de taille et de mise en œuvre. Cette orientation plus défavorable dans le BFUP constituant la coque du parapet a résulté en des propriétés en traction légèrement réduites, soit la loi nommée « coque réelle ». Cette loi a été utilisée pour la coque de BFUP dans les modélisations numériques.

| Propriétés  | BHP dalle | BHP parapet | BFUP niche |
|---|-----------|-------------|------------|
| Module élastique <i>E</i> <sub>c</sub> (MPa)                              | 33 400    | 30 000      | 40400      |
| Résistance à la traction $f_t$ (MPa)                                      | 2.74      | 2.70        | 11.5       |
| Résistance à la compression $f'_c$ (MPa)                                  | 46.8      | 45.4        | 100.8      |
| Taille caractéristique en traction <i>L<sup>t</sup><sub>ch</sub></i> (mm) | 30        | 30          | 35         |
| Déformation de la localisation $\epsilon_t^{loc}$ (-)                     | 0         | 0           | 1.73E-3    |

#### Tableau 6 - Propriétés des bétons du parapet MTQ301 préfabriqué (Charron et al., 2013a)





| Dropriátác  | BHP   | BHP   | BFUP    | BFUP coque | BFUP    |
|---|-------|-------|---------|------------|---------|
| Proprietes  | dalle | coeur | coque   | réelle     | niche   |
| Module élastique $E_c$ (MPa)  | 37400 | 38100 | 40100   | 40100      | 40400   |
| Résistance à la traction $f_t$ (MPa)                                      | 2.76  | 2.91  | 11.1    | 8.19       | 11.5    |
| Résistance à la compression $f'_c$ (MPa)                                  | 47.7  | 52.8  | 128.7   | 128.7      | 100.8   |
| Taille caractéristique en traction <i>L<sup>t</sup><sub>ch</sub></i> (mm) | 30    | 30    | 100     | 100        | 35      |
| Déformation de la localisation $\epsilon_t^{loc}$ (-)                     | 0     | 0     | 1.13E-3 | 1.04E-3    | 1.73E-3 |

# Tableau 7 - Propriétés des bétons du parapet hybride (Charron et al., 2013a)



Figure 22 - Comportement en traction des bétons du parapet hybride (Charron et al., 2013a)

Les aciers d'armature ont été modélisés à l'aide du matériau *Reinforcement*. Leurs comportements en traction, illustrés à la Figure 23, reproduisent fidèlement les courbes expérimentales obtenues lors du projet R686.1.



Figure 23 - Comportement en traction des aciers d'armature

### 4.2.3 Géométrie des modèles

Les modèles étant réalisés en 3D, les modélisations reprennent donc fidèlement la géométrie réelle des parapets étudiés (Figure 24). 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 Knn, la rigidité en cisaillement Ktt, la résistance à la traction ft, la cohésion C ainsi qu'un coefficient de friction (Červenka et al., 2016). Les propriétés des contacts utilisés sont résumées au **Tableau 8**, 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 24**) 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.

| Interface                       | Knn<br>(kN/m3) | Ktt<br>(kN/m3) | ft<br>(MPa) | C<br>(MPa) | Coefficient de<br>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                              |

#### Tableau 8 - Propriétés des interfaces utilisées dans les modélisations

Ensuite, les barres d'armatures ont été modélisées par des éléments « CCReinforcement » 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 6.1.2). 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 où 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 24) ainsi que la géométrie de l'armature (Figure 25) 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.





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



# 4.2.4 Éléments finis, maillage et méthode de résolution

La Figure 26a et la Figure 27a illustrent les maillages choisis pour modéliser respectivement le parapet MTQ301 et le parapet hybride. Les modèles de parapets utilisent majoritairement des éléments solides 3D tétraédriques à un point d'intégration (Figure 28). Des éléments solides 3D brick à 8 points

d'intégration ont été utilisés pour le maillage des clés de connexion longitudinale. Les dimensions de maillage, qui diffèrent selon les parties des parapets (dalle, cœur, coque, niche ou clé de connexion), sont résumées au **Tableau 9**. Un raffinement de maillage a été effectué autour du point d'application de la charge, au niveau des surfaces cœur-niche et de la surface extérieure de la niche ainsi que sur les surfaces verticales adjacentes à la clé de connexion longitudinale.

La méthode d'intégration numérique de Gauss est utilisée avec des fonctions d'interpolation linéaires et la méthode de résolution de Newton-Raphson a été utilisée (Červenka et al., 2016).



a) Maillage

b) Conditions limites et chargement

Figure 26 - Géométrie, maillage et conditions limites et de chargement du parapet MTQ301 préfabriqué



a) Maillage







Figure 28 - Élément 3D tétraédrique (Červenka et al., 2016)

#### Tableau 9 - Dimension du maillage (en mm) des éléments des parapets à l'étude

| Parapets           | Dalle | Cœur | Coque | Niche | Clé<br>longitudinale |
|--------------------|-------|------|-------|-------|----------------------|
| MTQ301 préfabriqué | 80    | 100  | 100   | 35    | 20                   |
| Parapet hybride    | 80    | 100  | -     | -     | 20                   |

# 4.2.5 Conditions limites et chargement

La Figure 26b et la Figure 27b illustrent les conditions limites ainsi que les chargements appliqués aux parapets à l'étude. Afin de représenter les conditions limites du parapet sur un tablier de pont, le déplacement de la dalle a été bloqué dans les trois directions. Le chargement est contrôlé en déplacement, perpendiculairement au parapet, au nœud situé au centre de la plaque de chargement. L'incrément de déplacement à chaque pas de chargement est de 0.0002 m. Le poids propre du parapet et de la dalle est négligé. Préalablement au chargement, les dalles des parapets sont mises en post-tension dans le modèle numérique via des câbles tendus (Figure 26b et Figure 27b) afin de reproduire l'effet de la précontrainte appliquée sur les dalles avant d'effectuer l'essai, pour les ancrer à la dalle du laboratoire. Dans les modèles, il est nécessaire d'introduire des plaques au-dessous de la dalle de pont pour appliquer cette post-tension. Dans les essais de laboratoire, celles-ci ne sont pas présentes et la dalle de pont est déposée directement au sol.

## 4.3 MODÉLISATION DU PARAPET HYBRIDE À NICHE OUVERTE

Avec les informations et les propriétés présentées à la Section 4.2, un parapet hybride (présenté à la Section 4.1.1) de 4 m de longueur a été modélisé numériquement. Deux modélisations ont été effectuées, 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<sup>3</sup> (L x h x  $e_{moy}$ ). 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 3.1).

La Figure 29 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 réduite de 17.4 % dans le cas du chargement à l'extrémité (résistance maximale de 711 kN versus 861 kN pour le chargement centré, cf. Tableau 10). Cette diminution de capacité correspond aux valeurs retrouvées dans la littérature pour des parapets de plus de 3 m de longueur (cf. Section 3.3). Pour les deux cas de chargement étudiés, les plans de rupture obtenus (Figure 30) 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 31 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 6.1.2 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 29 - Modélisation d'un parapet hybride de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm<sup>3</sup> sous chargement centré et à l'extrémité

Tableau 10 - Capacité maximale d'un parapet hybride de 4 m chargé via une plaque de2400 x 100 x 113 mm³ sous chargement centré et à l'extrémité

| Longueur   |                    | E (kN)             |
|------------|--------------------|--------------------|
| du parapet | Fmax centrée (KIN) | max excentree (KN) |
| 4 m        | 861                | 711                |



a) Chargement au centre

b) Chargement à l'extrémité

Figure 30 - Plan de rupture d'un parapet hybride de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm<sup>3</sup> (a) chargé au centre et (b) chargé à l'extrémité, ouverture de fissure (w) > 0.3 mm



a) Chargement au centre (à 861 kN)



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

Figure 31 - Contraintes maximales dans les barres d'armatures du parapet hybride de 4 m chargé par une plaque de 2400 mm

## 4.4 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 4.1.2**. 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 4.3**), 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 32** et le **Tableau 10** montrent que la résistance maximale est de 682 kN pour un chargement central et 612 kN pour un chargement excentré, soit 10 % inférieure 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 33**, 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 34** permet d'observer les contraintes dans les barres d'armatures lorsque la charge appliquée est maximale. Il faut rappeler que conformément aux informations présentées à la **Section 6.1.2** 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 34**) 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 32 - Modélisation d'un parapet MTQ301 préfabriqué de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm<sup>3</sup> sous chargement centré et à l'extrémité

# Tableau 11 - Capacité maximale d'un parapet MTQ301 préfabriqué de 4 m chargé via une plaque de2400 x 100 x 113 mm³ sous chargement centré et à l'extrémité

| Longueur<br>du parapet | F <sub>max centrée</sub> (kN) | F <sub>max excentrée</sub> (kN) |
|------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 4 m                    | 682                           | 612                             |



a) Chargement au centre

b) Chargement à l'extrémité

Figure 33 - Plan de rupture d'un parapet MTQ301 préfabriqué de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm<sup>3</sup> (a) chargé au centre et (b) chargé à l'extrémité, w > 0.3 mm



Figure 34 - Contraintes maximales dans les barres d'armatures du parapet MTQ301 préfabriqué de 4 m chargé par une plaque de 2400 mm

#### 4.5 ÉTUDES PARAMÉTRIQUES SUR LES PROPRIÉTÉS MATÉRIAUX

Étant donné la réserve de capacité observée aux **Sections 4.3** et **4.4** sur les concepts de parapets proposés en utilisant des BFUP à 4 % vol. 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 4.5.1**, alors que l'effet du retrait est présenté à la **Section 4.5.2**.

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 x 100 x 113 mm<sup>3</sup> présentée à la section 4.3. Les paramètres de modélisation sont les mêmes que ceux présentées à la Section 4.2.

# 4.5.1 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 et sa durabilité. 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 4.5.1.1** et **4.5.1.2**. 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., 2013a) 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 6.1.1), 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 12 et leurs courbes de comportement en traction sont présentées aux Figure 35 et Figure 36 respectivement pour les lois réelles et les lois réduites. À noter que le BFUP à 1 % vol. de fibres a été étudié seulement à titre indicatif et

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

| Pronriétés  | BFUP         | BFUP | BFUP | BFUP | BFUP   | BFUP   | BFUP   | BFUP   |
|---|--------------|------|------|------|--------|--------|--------|--------|
| ropreces  | 1%           | 2 %  | 3 %  | 4 %  | réduit | réduit | réduit | réduit |
| Module élastique $E_c$ (GPa)  | 36           | 36   | 36   | 36   | 36     | 36     | 36     | 36     |
| Résistance à la traction $f_t$ (MPa)                                      | 5 <i>,</i> 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 <i>L<sup>t</sup><sub>ch</sub></i> (mm) | 35           | 35   | 35   | 35   | 100    | 100    | 100    | 100    |
| Déformation de la localisation $\epsilon_t^{loc}$ (µɛ)                    | 2600         | 2500 | 2100 | 1900 | 1600   | 1500   | 1300   | 1100   |

Tableau 12 - Résumé des propriétés utilisées pour les différents BFUP considérés



b) comportement en post-pic

Figure 35 - Courbes de comportement utilisées pour l'étude du pourcentage de fibres du BFUP dans les niches de connexion



#### a) Comportement en pré-pic

#### b) Comportement en post-pic



#### 4.5.1.1 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 13** et **Tableau 14** (capacités maximales atteintes, respectivement pour les chargements centré et excentré) ainsi qu'à la **Figure 37**. Pour ces modèles, la niche de connexion parapet-dalle 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 de 5 % à 13 % de la capacité maximale pour chaque diminution de 1 % du pourcentage de fibres, autant pour les conditions de chargement centré qu'excentré. Il est logique de constater une influence du comportement du BFUP de la coque sur le comportement global des parapets 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.

| Pourcentage de<br>fibres | F <sub>max centrée</sub> (kN) | Diminution F <sub>max</sub><br>vs F <sub>max 4%</sub> |
|--------------------------|-------------------------------|---|
| BFUP 4%                  | 859                           | -   |
| BFUP 3%                  | 797                           | -7.2%   |
| BFUP 2%                  | 757                           | -11.9%  |
| BFUP 1%                  | 667                           | -22.4%  |

# Tableau 13 - Capacité maximale du parapet hybride selon le pourcentage de fibres dans la coque pour un chargement central

Tableau 14 - Capacité maximale du parapet hybride selon le pourcentage de fibres dans la coque pour un chargement excentré

| Pourcentage de<br>fibres | F <sub>max excentrée</sub> (kN) | Diminution F <sub>max</sub><br>vs F <sub>max 4%</sub> |
|--------------------------|---------------------------------|---|
| BFUP 4%                  | 754                             | -   |
| BFUP 3%                  | 683                             | -9.4%   |
| BFUP 2%                  | 650                             | -13.8%  |
| BFUP 1%                  | 564                             | -25.2%  |





b) Chargement à l'extrémité



D'après les résultats présentés au **Tableau 13**, **Tableau 14** et **Figure 37**, il apparait 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 conservé. 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.

# 4.5.1.2 NICHE DE CONNEXION DU PARAPET HYBRIDE

Pour étudier l'effet du pourcentage de fibres dans le BFUP constituant la niche de connexion parapet-dalle du parapet hybride, la coque a été modélisée à l'aide d'un BFUP à 4 % vol. 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 38**), 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 microfissuration qui se produit dans la niche de connexion. La **Figure 39** présente la fissuration totale (fissures de toutes tailles comprenant même les fissures non visibles (1-100  $\mu$ m) du parapet hybride au pic de la courbe force déplacement et le **Tableau 15** regroupe les ouvertures de fissure maximales observées au même moment dans la niche de connexion parapet-dalle. Si le parapet est fortement fissuré à cette charge, la niche est quant à elle relativement peu endommagée. Avec un BFUP 4 %, seules quelques microfissures très fines ( $\leq$  20  $\mu$ 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  $\mu$ m et de 30  $\mu$ m, alors que celles pour le BFUP 1% sont légèrement plus ouvertes ( $\leq$  75  $\mu$ m).





| Tableau 15 - Ouvertures de fissures dans la niche de connexion du parapet hybride pour un |  |
|---|--|
| chargement centré   |  |

| Pourcentage de | Ouverture de fissures maximale |
|----------------|--------------------------------|
| fibres         | <i>w<sub>max</sub></i> (μm)    |
| BFUP 4%        | 20                             |
| BFUP 3%        | 20                             |
| BFUP 2%        | 30                             |
| BFUP 1%        | 75                             |



Figure 39 - Effet du pourcentage de fibres sur la fissuration dans la niche de connexion du parapet hybride, au pic ( $F_{max}$  = 868 kN, d = 7.8 mm), aucun filtre sur w

Considérant les résultats présentés dans cette section, l'utilisation d'un BFUP à 4 % vol. 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 4.5.2 étudiant l'effet du retrait.

## 4.5.2 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. Elles sont seulement restreintes 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 ( $\mu$ E). De cette façon, il sera possible d'observer l'effet du retrait sur toute la plage de retrait envisageable. Dans les modèles numériques, 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 4.5.1.2). La coque est ici modélisée par un 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 40) sont parfaitement superposées, quel que soit le retrait appliqué, autant lors de l'utilisation de BFUP à 2 % que de BFUP à 3 % vol. 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 με (Tableau 16 et Figure 41), 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 µɛ, 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 donc recommandé d'utiliser un BFUP avec 3 % vol. de fibres pour la niche de connexion du parapet hybride et du parapet MTQ301 préfabriqué.



Figure 40 - Effet du retrait de la niche de connexion du parapet hybride

| Pourcentage de | Retrait appliqué | Ouverture de fissures maximale |
|----------------|------------------|--------------------------------|
| fibres         | (με)             | <i>w<sub>max</sub></i> (μm)    |
| BFUP 2%        | -                | 30                             |
| BFUP 2%        | 600              | 100                            |
| BFUP 3%        | -                | 20                             |
| BFUP 3%        | 600              | 20                             |

# Tableau 16 - Ouvertures de fissures dans la niche de connexion du parapet hybride pour un chargement centré





## 4.6 ÉTUDE PARAMÉTRIQUE SUR LES EFFETS STRUCTURAUX

Alors que la Section 4.5 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 4.2** sur les concepts de parapet hybride (**Section 4.1.1**) et de parapet MTQ301 préfabriqué (**Section 4.1.2**). 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 considérations pratiques 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 longueur de chargement exigée dans la norme CSA-S6 est de 2.4 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 4.6.1. 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 4.6.2 et 4.6.3 L'effet de la continuité longitudinale sera traité à la Section 4.6.4.

# 4.6.1 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., 2013a). 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 3.3**). 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., 2013a). Cependant, cette fois, la charge a été appliquée à l'extrémité des parapets (**Figure 42**).



Figure 42 - 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 43**, ces résultats diffèrent de ceux présentés aux **Sections 4.3** et **4.4** qui considéraient 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 43** et **Tableau 17**). 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 43**).



Figure 43 - Effet d'un chargement excentré sur les parapets hybride et MTQ 301 préfabriqué de 2 m

Tableau 17 - Diminution de la capacité maximale pour les parapets hybride et MTQ301 préfabriqué de2 m dû à un chargement excentré

| Modèle de parapet et   | F <sub>max centrée</sub> (kN) | F <sub>max excentrée</sub> (kN) | Diminution F <sub>max</sub> |
|------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| longueur               |                               |                                 | 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 (Figure 44b) est comparé à celui obtenu lors du chargement centré (Figure 44a) 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 et 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 dans le cas du chargement centré (Figure 44a), la rupture a lieu en cisaillement autour de la plaque de chargement dans le cas du chargement excentré (Figure 44b). Il est à noter également que les barres d'armatures verticales du parapet plastifient lors du chargement

centré, tandis qu'elles ne plastifient pas lors du chargement excentré. Des modes de rupture similaires sont observés pour le parapet MTQ301 préfabriqué (Figure 44c et d).



a) parapet hybride - charge centrée (d  $\approx 8.3$  mm, w > 300  $\mu m$ )



c) parapet MTQ301 préfabriqué – charge centrée  $(d\approx 10.5 \text{ mm, w} > 100 \text{ } \mu\text{m})$ 



b) parapet hybride - charge excentrée (d  $\approx 8.3$  mm, w > 300  $\mu m)$ 



d) parapet MTQ301 préfabriqué – charge excentrée (d  $\approx$  9.5 mm, w > 100  $\mu$ m)

## Figure 44 - 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 montré une capacité maximale inférieure d'environ 25 % pour un chargement excentré par rapport à un chargement centré.

## 4.6.2 Effet de longueur

Tel que mentionné précédemment, les parapets testés expérimentalement lors du projet R686.1 (Charron et al., 2013a) 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 4.6.2.1 et 4.6.2.2, 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 préfabriqué ont permis d'observer les mêmes tendances.

#### 4.6.2.1 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 45** et les charges maximales obtenues sont résumées au **Tableau 18**. La capacité maximale du parapet augmente de manière significative avec l'augmentation de sa longueur (**Tableau 18**), jusqu'à environ 3 à 4 m. Un allongement supplémentaire du parapet n'amène cependant pas de gain significatif de résistance (**Figure 45** et **Tableau 18**). Cette longueur seuil de 3 à 4 m s'explique par le fait qu'une augmentation supplémentaire de longueur n'induit pas de modification (forme et longueur) du plan de rupture (**Figure 46**). 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 18). 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 45** illustre le moment de la plastification. Plus la longueur du parapet augmente, plus la contrainte maximale atteinte dans les barres d'armature diminue. Ceci explique pourquoi il n'y a aucun carré rouge d'illustré pour les parapets de plus de 2 m.

| Longueur du parapet | F <sub>max centrée</sub> (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 %                                     |

# Tableau 18 – Augmentation de la capacité maximale du parapet hybride avec augmentation de sa longueur



Figure 45 - Effet de la longueur du parapet hybride sous chargement centré sur son comportement global



Figure 46 - Plans de rupture des parapets hybrides de 2, 3, 4 et 6 m, chargement centré (d ≈ 11.5 mm, w > 500 µm)

# 4.6.2.2 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 47) 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 48), 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. Cette dimension de plaque n'est toutefois pas celle prescrite dans la norme, l'effet de la longueur de la plaque de chargement est discuté à la Section 4.6.3. Il est à noter que la plastification des barres n'est atteinte pour aucun des parapets hybrides (2, 3 ou 4 m) chargés à l'extrémité.



Figure 47 - Effet de la longueur du parapet hybride sous chargement excentré sur son comportement global



Figure 48 - Plans de rupture des parapets hybrides de 2, 3 et 4 m, chargés à leur extrémité (F<sub>post-pic</sub> ≈ 250 kN, w > 500 μm)

Le **Tableau 19** 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 19**). 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 3.3**.
| Longueur du parapet | F <sub>max centrée</sub> (kN) | F <sub>max excentrée</sub> (kN) | Diminution F <sub>max</sub> avec excentricité |
|---------------------|-------------------------------|---------------------------------|---|
| 2 m                 | 554                           | 418                             | - 24.5 %                                      |
| 3 m                 | 799                           | 435                             | - 45.6 %                                      |
| 4 m                 | 904                           | 426                             | - 52.9 %                                      |

Tableau 19 – Diminution de capacité maximale du parapet hybride de différentes longueurs due à l'excentricité de la charge

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

## 4.6.3 Effet de la plaque de chargement

Les **Sections 4.6.1** et **4.6.2** ont 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., 2013a). Tel que stipulé à la **Section 3.1**, 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 expérimentaux ont été étudiées soit : la plaque de chargement de 2400 x 100 x 113 mm<sup>3</sup> (L x l x e<sub>moy</sub>) utilisée aux **Sections 4.3** à **4.5** afin de valider la conception des parapets selon les critères normatifs et la plaque de chargement 700 x 350 x 57 mm<sup>3</sup> (L x l x e<sub>moy</sub>) utilisée lors des essais de la Phase 1 et dans les modélisations présentées aux **Sections 4.6.1 et 4.6.2**. 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 49 présente l'effet de la plaque de chargement sur le comportement mécanique des parapets et le **Tableau 20** 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 2400 mm ressemble davantage à celui observé dans le cas d'un chargement centré (flexion-cisaillement) qu'à la rupture en cisaillement observée lorsque le chargement excentré est appliqué sur 700 mm (Figure 50).

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 49 - Effet de la longueur de la plaque de chargement sur le comportement global des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué sous chargement excentré

| Tableau 20 – Effet de plaques sélectionnées sur la capacité maximale de parapets de 4 m sous |
|--|
| chargement excentré  |

| Modèle de parapet et<br>longueur | F <sub>max L700</sub> (kN) | F <sub>max L2400</sub> (kN) | Augmentation F <sub>max</sub><br>Avec L <sub>2400</sub> |
|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---|
| Hybride 4 m                      | 426                        | 711                         | + 67.0 %  |
| MTQ301 préfabriqué 4 m           | 333                        | 612                         | + 83.8 %  |



Figure 50 - 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 51 et la Figure 52 montrent 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 21 résume les capacités maximales. Les résultats, que ce soit en termes de courbe force déplacement transversal (Figure 51) ou de la capacité maximale (Tableau 21), 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 51 - Effet de la longueur de la plaque de chargement sur le comportement global des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué sous chargement centré

| Modèle de parapet et<br>longueur | F <sub>max L700</sub> (kN) | F <sub>max L2400</sub> (kN) | Augmentation F <sub>max</sub><br>Avec L <sub>2400</sub> |
|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---|
| Hybride 4 m                      | 903                        | 863                         | - 4.6 %   |
| MTQ301 préfabriqué 4 m           | 688                        | 681                         | - 1.0 %   |

 

 Tableau 21 – Effet de plaques sélectionnées sur la capacité maximale de parapets de 4 m sous chargement excentré



Figure 52 - 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 (2400 mm), les parapets hybride et MTQ301 préfabriqué surpassent les exigences de la norme CSA-S6.

## 4.6.4 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 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 4.3** et **4.4** 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 53**), remplie d'un mortier fibré de 60 MPa a été considérée. Les propriétés du mortier sont décrites au **Tableau 22** 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.



Figure 53 - Géométrie de la clé de connexion longitudinale modélisée

| Tableau 2  | 77 - Pi | ronriétés | des | matériaux | cimentaires | : utilisés | dans  | les clés d | e connexion | longitudinale | ρ |
|------------|---------|-----------|-----|-----------|-------------|------------|-------|------------|-------------|---------------|---|
| i abicau z |         | opiletes  | ues | Παιεπαυλ  | Cimentanes  | s utilises | ualis | ies cies u | e connexion | Iongituumaid  | - |

| Propriétés  | Mortier<br>fibré |
|---|------------------|
| Module élastique $E_c$ (MPa)  | 26100            |
| Résistance à la traction $f_{\scriptscriptstyle t}$ (MPa)                 | 2.4              |
| Résistance à la compression $ f_c^\prime $ (MPa)                          | 60.4             |
| Quantité de fibres* (% vol.)  | 1 %              |
| Taille caractéristique en traction $ L^{\scriptscriptstyle t}_{ch} $ (mm) | 25               |
| Déformation de la localisation $arepsilon_t^{\it loc}$ (-)                | 2.26E-4          |

Le comportement de 2 parapets adjacents connectés longitudinalement par la clé rectangulaire présentée à la **Figure 53** a été étudié pour plusieurs cas de chargement représentés à la **Figure 54**, 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 plaques de chargement ont été utilisées dans cette étude soit : la plaque de 700 x 350 x 57 mm<sup>3</sup> (L700) et la plaque de 2400 x 100 x 113 mm<sup>3</sup> (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 CSA-S6.



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 54 - Cas de chargement étudiés pour les parapets connectés longitudinalement

## 4.6.4.1 PARAPET HYBRIDE

Les courbes force-déplacement, pour l'ensemble des cas de chargement testés (cas A à D) sont regroupées aux **Figure 55**, **Figure 56** et **Figure 57**, respectivement pour les configurations d'essais 1, 2 et 3. Ces courbes sont comparées au comportement du même parapet non connecté longitudinalement. La condition de chargement sans clé pour le cas C et le cas D correspondent à la même configuration de chargement soit un chargement excentré sur un parapet seul. 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 23**.

La Figure 55, la Figure 56 et la Figure 57 illustrent le fait que la différence de capacité maximale entre les cas A, B, C et D de chargement varie 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), cas pour lequel la clé est moins sollicitée. 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 2 m avec plaque L700, **Figure 55**) ainsi que pour le cas D de la configuration 2 (parapets de 4 m avec plaque L700, **Figure 56**) 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 55 - Comportement de 2 parapets de 2 m et plaque L700 en présence de la clé de connexion longitudinale (configuration 1)



Figure 56 - Comportement de 2 parapets de 4 m et plaque L700 en présence de la clé de connexion longitudinale (configuration 2)



Figure 57 - 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 57), 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 parapet 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 55 et Figure 56), 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 55, Figure 56 et Figure 57). 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 23 regroupe les capacités maximales pour chacun des cas de chargement à l'étude.

|                       | Plaque chargement expérimentale<br>700 x 350 x 57 mm <sup>3</sup> |               |                      |           |          |                     | Plaque chargement<br>expérimentale<br>2400 x 100 x 113 mm <sup>3</sup> |          |                     |
|-----------------------|---|---------------|----------------------|-----------|----------|---------------------|--|----------|---------------------|
|                       | C   | Configuration | on 1 Configuration 2 |           |          | Configuration 3     |  |          |                     |
|                       | 2x2m non  | 2x2m          | $\Delta F_{max} av$  | 2x4m non  | 2x4m     | $\Delta F_{max} av$ | 2x4m non   | 2x4m     | $\Delta F_{max} av$ |
|                       | connecté  | connecté      | connexion            | connecté* | connecté | connexion           | connecté*  | connecté | 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 %            |
| ΔF <sub>m</sub><br>vs | <sub>ax</sub> cas D<br>cas C                                      | + 55.4 %      |                      |           | + 61.7 % |                     |  | + 13.7 % |                     |

## Tableau 23 – Effet de la connexion longitudinale sur la capacité maximale des parapets hybrides

L'analyse du Tableau 23 mène 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 (ΔF<sub>max</sub> 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 (ΔF<sub>max</sub> de + 0.2 %) pour la plaque de 700 mm de longueur et est légèrement plus important (ΔF<sub>max</sub> 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 4.6.1**), 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 58**).

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 58);
- 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 58);
- 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 58b, ouverture moindre caractérisée par un rouge moins vif).



b) Cas D – Configuration 3

Figure 58 - Comparaison fissuration Cas D de chargement, pour les configurations d'essai 2 et 3 (d ≈ 8 mm, w > 200 µm)

# 4.6.4.2 PARAPET MTQ301 PRÉFABRIQUÉ

Les Figure 59, Figure 60 et Figure 61 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 4.6.4) sous les 3 mêmes configurations 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 à la Section 4.6.4.1 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 chargement (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 60). Cette charge de 476 kN est cependant largement dépassée en présence de la plaque L2400 exigé dans la norme CSA-S6, qu'il y ait ou non présence de la clé de connexion longitudinale (Figure 61). L'impact de la clé est moins prononcé pour le cas de chargement via la plaque de 2400 mm (Figure 61). 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 éloigné 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 59 - Comportement de 2 parapets de 2 m et plaque L700 en présence de la clé de connexion longitudinale (configuration 1)



Figure 60 - Comportement de 2 parapets de 4 m et plaque L700 en présence de la clé de connexion longitudinale (configuration 2)



Figure 61 - Comportement de 2 parapets de 4 m et plaque L2400 en présence de la clé de connexion longitudinale (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 appliqué sur le côté connecté du parapet (cas D) et lorsque la plaque de chargement L700 est utilisée. Selon les conditions normatives, soit avec la plaque de L2400 (configuration 3), ce gain reste faible. Considérant également que la capacité maximale de parapets non-connectés surpasse la charge pondérée de conception que le chargement soit appliqué au centre ou à l'extrémité du parapet préfabriqué et que les parapets sont assez rigides pour assurer un profil continu de redirection de véhicules, l'utilisation d'une continuité longitudinale ne serait pas requise.

## 4.6.5 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 connexion 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 :

• La capacité maximale du parapet augmente avec l'augmentation de sa longueur jusqu'à atteindre une longueur seuil comprise entre 3 et 4 m et 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 x 350 x 57 mm<sup>3</sup> et 2400 x 100 x 113 mm<sup>3</sup>) 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 :

- 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 x 350 x 57 mm<sup>3</sup> telle qu'utilisée lors du projet R686.1, la charge pondérée de conception de 476 kN n'est pas atteinte;
- L'utilisation d'une plaque de 2400 mm de longueur pouvant potentiellement être utilisée au laboratoire (2400 x 100 x 113 mm<sup>3</sup>), a induit un plan de rupture plus étendu sur le parapet qu'avec la plaque de 700 mm, faisant ainsi intervenir d'avantage d'armatures et impliquant un plus grand volume de béton pour la reprise des efforts. Il en 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 x 100 x 113 mm<sup>3</sup>, la charge pondérée de conception de 476 kN est largement atteinte.

En présence d'une clé de connexion longitudinale entre 2 parapets :

- 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.

## 5 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Suite aux études numériques présentées aux sections précédentes, des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué pleine grandeur ont été testés au laboratoire des structures de Polytechnique Montréal. Ce **Chapitre 5** 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 en laboratoire. 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 sur l'impact des parapets structuraux (longueur, excentricité, plaque de chargement, continuité) sur le comportement des parapets étudiés dans ce projet (Section 4.6).

Dans ce chapitre, les résultats de l'étude paramétrique préliminaire permettront en premier lieu de définir les configurations d'essais à tester (Section 5.1). Ensuite, la procédure de fabrication des spécimens d'essai sera présentée à la Section 5.2 et le montage expérimental à la Section 5.3. Finalement, l'instrumentation choisie pour les essais ainsi que le protocole de chargement des parapets seront respectivement détaillés aux Sections 5.4 et 5.5.

## 5.1 CONFIGURATIONS D'ESSAI SÉLECTIONNÉES

## 5.1.1 Généralités

Les études numériques présentées à la Section 4.6 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 décrits à la Section 4.6.4) 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 4**. 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 R686.1 (Charron et al., 2013a) 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 4.6.4.1 et 4.6.4.2 ont montré qu'une telle connexion n'est pas requise pour atteindre la résistance maximale prescrite dans la norme CSA-S6 lorsque les parapets sont soumis à des chargements centré et excentré sur une longueur de 2400 mm, tel que prescrit dans cette norme. La connexion longitudinale permet néanmoins d'augmenter légèrement la capacité structurale sous un chargement excentré et il serait pertinent d'évaluer ce gain en laboratoire.

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 lors du projet R686.1. 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.

## 5.1.2 Choix des conditions d'essai

Étant donné les considérations énumérées à la **Section 5.1.1**, il est plus pertinent de tester le comportement des parapets sous chargement excentré, puisque ceci n'a jamais été réalisé 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 4.6.2.2**), 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). Néanmoins, une fois que les modèles numériques des parapets de 2 m avec une plaque de 700 mm, développés au **Chapitre 4**, auront pu être validés à l'aide des résultats expérimentaux , ils pourront être 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). Ceci permettra de valider que la capacité du parapet chargé dans les conditions prescrites dans la norme surpasse la charge de conception de 476 kN requise par cette norme.

Concernant les types de parapets à étudier, le parapet MTQ301 coulé en place a 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 de « 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 expérimental doit permettre de tester les deux parapets préfabriqués sous charge excentrée et de quantifier le gain apporté 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 62a);
- 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 62b). 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 62c). Cet essai, en comparaison à l'essai 2 permettra d'évaluer le renforcement procuré par la connexion longitudinale.





c) Essai 3 - 2 Parapets MTQ301 préfabriqués de 2 m

Figure 62 - 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. Aux vues des résultats des modélisations numériques préliminaires, il ne devrait pas avoir d'endommagement majeur sur le parapet adjacent lors des essais 2 et 3, ce qui permet de réaliser ces deux essais sur le même spécimen et ainsi minimiser les coûts de production.

#### 5.1.3 Modifications aux concepts

Quelques modifications mineures ont été apportées aux concepts de parapets hybride et MTQ301 préfabriqué présentés aux Sections 4.1.1 et 4.1.2 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). Cette modification a été apportée de telle sorte à 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 4.5) 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 63.** 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 4.2**, il a été décidé de la remplir avec le même BFUP 3 % que la niche de connexion parapet-dalle, 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.



Figure 63 - Géométrie de la clé de connexion longitudinale (vue de haut)

## 5.2 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.

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., 2013a) avaient eux aussi été produits à cette usine. Pour le parapet hybride illustré à la **Figure 65**, le cœur en béton ordinaire a été coulé en premier lieu à l'horizontale afin d'assurer un bon remplissage du coffrage (**Figure 64a**). La coque en BFUP a ensuite été coulée avec le parapet en position verticale, depuis le haut du parapet, une semaine plus tard (**Figure 65a**). Le cœur après démoulage ainsi que le parapet une fois la coque en BFUP fabriquée sont présentés respectivement à la **Figure 64b** et à la **Figure 65b**.

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 en BFUP. Les surfaces sur lesquelles un retardateur de prise a été appliqué ont été nettoyées avec un jet d'eau à haute pression au démoulage (24 heure après la coulée) afin d'obtenir une surface à granulats exposés et permettre une meilleure adhérence entre le BO du cœur et le 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 66**.

Figure 64 - Fabrication du cœur en BO du parapet hybride





a) Coffrage du cœur en BO

b) Cœur en BO



a) Coulée de la coque en BFUP



b) Parapet hybride





a) Nettoyage de la surface



b) Surface à granulats exposés Figure 66 - Production des surfaces à granulats exposés

Le parapet MTQ301 préfabriqué (Figure 67) a été coulé à la verticale mais à l'envers (depuis la base du parapet), 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 68. 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

Barres d'ancrage

> Niche de connexion parapet-dalle

Connexion longitudinale



Zone où sera

déposé le parapet

b) Parapet MTQ301 préfabriqué





Barres d'ancrage

Ouvertures pour les barres de précontrainte (pour fixation à la dalle du laboratoire)

Figure 68 - 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 69a** présente l'ensemble de 2 parapets MTQ301 préfabriqués de 2 m suite à cette étape et les **Figure 69b** et **Figure 69c** 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 69 - Installation des parapets MTQ301 préfabriqués sur la dalle de pont

L'étape suivante de l'assemblage entre les parapets et les dalles de ponts a consisté 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 70a). Le BFUP utilisé pour les niches de connexion a été introduit dans les coffrages par ces ouvertures et s'est rependu de lui-même dans l'ensemble de la niche étant donné qu'il s'agit d'un matériau autoplaçant (Figure 70b). Une fois la niche complètement remplie, les ouvertures ont été refermées à l'aide d'une tôle qui suit la forme du parapet. La clé de connexion longitudinale a ensuite été coulée. La Figure 71 présente les parapets hybride et MTQ301 préfabriqué après démoulage de la niche de connexion.



a) Coffrage de la niche

b) Coulée de la niche

Figure 70 - 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 71 - Assemblage final des spécimens d'essai

#### 5.3 MONTAGE EXPÉRIMENTAL

Le montage expérimental est illustré schématiquement à la Figure 72 et via une photo à la Figure 73. 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. Ceci diffère de la réalité des ouvrages pour lesquels les parapets sont positionnés sur une portion de la dalle de pont qui est en porte-à-faux. Néanmoins, tel que montré par Namy (2012), la condition d'appui choisie pour ces essais, soit une dalle supportée à plat, correspond à un cas de chargement plus critique qu'une dalle en porte-à-faux (cf. Section 3.1). La dalle est ensuite ancrée à celle du laboratoire par des barres de post-tension prétendues à 10 000 PSI. 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<sup>3</sup> (Figure 72). 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 du vérin 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 72). 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.

Il est possible d'observer la similitude entre les conditions des essais en laboratoire et les conditions limites appliquées aux modèles numériques présentées à la **Section 4.2**. En effet, 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 avant de procéder, numériquement, au chargement du parapet.



Figure 72 - Schéma du montage expérimental



Figure 73 - Application du chargement excentré sur le parapet hybride

#### 5.4 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 74** à la **Figure 76**. 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 77**. 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 inférieure et supérieure 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 74 à Figure 76).

La procédure d'analyse par corrélation d'images, réalisée avec le logiciel VIC-3D (Correlated Solutions, 2019), consiste à peinturer 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 exemptes 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 78 et Figure 79). 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 peinturés 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 74 - Instrumentation pour l'essai sur le parapet hybride de 2 m



Figure 75 - Instrumentation pour l'essai sur les deux parapets MTQ301 préfabriqués avec chargement près de la clé de connexion longitudinale



Figure 76 - Instrumentation pour l'essai sur les deux parapets MTQ301 préfabriqués avec chargement à l'extrémité libre



Figure 77 - Mesure du déplacement à l'arrière du spécimen



Figure 78 - Positionnement des barres instrumentées sur le spécimen composé d'un parapet hybride



Figure 79 - Positionnement des barres instrumentées sur le spécimen composé de deux parapets MTQ301 préfabriqués de 2 m

#### 5.5 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 3.1). 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/min. 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 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.

## 6 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Ayant établi la procédure expérimentale et documenté le mode de fabrication des spécimens d'essai au **Chapitre 5**, le **Chapitre 6** 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 6.1.** Ensuite, les résultats des trois essais sur parapets, soient leur comportement mécanique global, leurs patrons de fissuration et les déformations enregistrées dans les barres d'armatures, seront présentés à la **Section 6.2**.

## 6.1 **PROGRAMME DE CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX**

L'objectif de ce programme est de connaitre le plus précisément possible les propriétés matériaux au moment des essais structuraux afin de les implémenter dans les modèles numériques. Les résultats des essais de caractérisation des bétons sont présentés à la Section 6.1.1 et ceux des aciers d'armature à la Section 6.1.2.

## 6.1.1 Propriétés des bétons

Les dalles de pont, les parapets MTQ301 préfabriqués et le cœur du parapet hybride sont constitués de béton ordinaire (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 parapet-dalle 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., 2011a) et commercialisés 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. Pour des raisons pratiques, le BFUP 3 % de la clé de connexion longitudinale a été coulée à partir d'une gâchée différente que le BFUP 3 % des niches de connexion. Aucun essai de traction n'a été effectué sur le BFUP 3 % de la clé de connexion.

Les résultats moyens des essais de caractérisation sont résumés au **Tableau 24** et les courbes de comportement en traction des BFUP sont présentées à la **Figure 80**. 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 et un module d'Young d'environ 36 GPa. Le comportement en traction est tout aussi excellent avec des résistances maximales de 10.5 MPa pour une déformation de 2400 µɛ et de 13.5 MPa pour une déformation de 2200 µɛ respectivement pour le BFUP 3 % des niches de connexion et le BFUP 4 % de la coque du parapet hybride. Les propriétés des BO correspondent aux valeurs attendues, les résistances à la compression variant entre 34.3 et 46.3 MPa, les résistances à la traction indirecte variant entre 3.23 et 4.42 MPa et les modules d'Young variant entre 24 GPa et 30 GPa.

## Tableau 24 - Propriétés des bétons

| Élément                                      | Résistance la<br>compression<br>(échéance) | Module<br>d'Young<br>(échéance) | Coefficient<br>de poisson<br>(échéance) | Résistance à la<br>traction<br>(échéance) |
|--|--|---------------------------------|---|---|
| Cœur du parapet hybride                      | 46.3 MPa (197 j)                           | 29.1 GPa (197 j)                | 0.223 (197 j)                           | 4.42 MPa (225 j) <sup>2</sup>             |
| Dalle de 2 m et parapet MTQ<br>préfabriqué 1 | 34.3 MPa (213 j)                           | 24.4 GPa (213 j)                | 0.204 (213 j)                           | 3.23 MPa (220 j) <sup>2</sup>             |
| Dalle de 4 m et parapet MTQ<br>préfabriqué 2 | 40.1 MPa (217 j)                           | 24.9 GPa (217 j)                | 0.192 (217 j)                           | 3.89 MPa (219 j) <sup>2</sup>             |
| Coque du parapet hybride                     | 148.3 MPa (183 j)                          | 36.4 GPa (183 j)                | 0.225 (183 j)                           | 13.5 MPa (166 j) <sup>1</sup>             |
| Niches d'ancrage                             | 148.4 MPa (120 j)                          | 36.8 GPa (120 j)                | 0.233 (120 j)                           | 10.5 MPa (85 j) <sup>1</sup>              |
| Clé de connexion longitudinale               | 129.3 MPa (120 j)                          | 36.4 GPa (120 j)                | 0.209 (120 j)                           | -   |

<sup>1</sup>Essai de traction directe sur os

<sup>2</sup> Essai Brésilien (traction indirecte)





#### 6.1.2 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 25** et à la **Figure 81**. 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.

| Barres       | Fy      | Fu      | Module<br>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             |

#### Tableau 25 - Propriétés des barres d'armatures



Figure 81 - Courbes contrainte-déformation des aciers d'armatures

#### 6.2 COMPORTEMENT EXPÉRIMENTAL DES PARAPETS

Tel que présenté au **Chapitre 5**, 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 parapet n'ayant pas encore été chargé. Les résultats pour chacun de ces essais sont respectivement présentés aux **Sections 6.2.1** à **6.2.3**. Enfin, la **Section 6.2.4** fournit quelques analyses complémentaires en comparant les résultats des trois essais entre eux.

#### 6.2.1 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 82**, à la **Figure 83** et à la **Figure 84**. La **Figure 82a** présente l'évolution de la charge appliquée en fonction du déplacement horizontal du parapet, la **Figure 82b** présente l'évolution de la charge appliquée en fonction du soulèvement du parapet par rapport à la dalle de pont et la **Figure 82c** présente l'évolution de la charge appliquée en charge appliquée en fonction de la contrainte dans les barres d'armatures instrumentées situées dans la niche de connexion. La **Figure 83** 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 84** présente le plan de rupture final.



Figure 82 - Résultats d'essai sur parapet hybride de 2 m soumis à un chargement excentré



Figure 83 - Progression de la fissuration durant l'essai de chargement excentré sur parapet hybride de 2 m



a) Face d'extrémité du parapet



b) Face avant du parapet

# Figure 84 - Plan de rupture final d'un parapet hybride de 2 m soumis à un chargement excentré

Pour débuter, l'analyse du comportement mécanique force-déplacement transversal du parapet (**Figure 82a**) révèle que le parapet hybride a montré un comportement linéaire élastique jusqu'à une charge d'environ 175 kN. Son comportement devient ensuite non-linéaire avec l'apparition de fissures jusqu'à atteindre la capacité maximale pour une force de 428 kN et un déplacement transversal de 6.3 mm en arrière du point d'application de la charge. Une fois le pic de résistance atteint, la charge 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 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 4.6.1).

Le soulèvement entre le parapet et la dalle de pont (Figure 82b) est demeuré quasi-nul jusqu'à une charge de 100 kN. Par la suite, le soulèvement a augmenté de façon non-linéaire jusqu'à la capacité maximale du parapet hybride, soit de 428 kN. À ce moment, le soulèvement maximal était de 0.9 mm.

Les barres d'armatures instrumentées dans la niche de connexion (cf. Section 5.4) sont demeurées élastiques en tout temps durant le chargement, tel qu'illustré à la Figure 82c. 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. Cette contrainte maximale est atteinte lorsque la charge appliquée est maximale.

Les premières fissures visibles à l'œil nu (Figure 83) sont apparues vers 350 kN au point de changement de pente du parapet, 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 fissure commence à être visible à l'œil nu juste au-dessus du changement de pente du parapet pour ensuite se poursuivre de manière oblique vers le haut du parapet. Au même moment, d'autres fissures obliques se sont également développées en région inférieure de la face d'extrémité du parapet. Vers 428 kN, soit au pic de résistance, le plan de rupture final s'est développé. Celui-ci consiste en une fissure qui contourne la plaque de chargement et qui se poursuit sur la face d'extrémité du parapet pour ensuite descendre jusqu'à sa base. Le plan de rupture final, après déchargement du parapet, est illustré à la Figure 84. Aussi une courte fissure s'est développée à 428 kN 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 pic de résistance selon la lecture du capteur servant à mesurer l'ouverture de fissure à cet endroit. Enfin, il est important de noter que la dalle de pont (dalle sur laquelle est ancré le parapet durant l'essai) n'a subi aucun endommagement durant l'essai. Cette dalle est cependant pleinement appuyée sur la dalle de laboratoire alors qu'elle devrait être en porte-à-faux dans la réalité. Des informations sur l'endommagement de la dalle de pont, lorsque celle-ci est ne porte-à-faux versus une dalle pleinement appuyée, 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 d'armature dans la niche de connexion. Ce mode de rupture est le même que celui du parapet MTQ301 coulé en place. L'utilisation du parapet hybride préfabriqué ne change donc pas le comportement global habituel du parapet sur dalle de pont.

# 6.2.2 Essai sur deux parapets MTQ301 préfabriqués de 2 m connectés longitudinalement 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 85a**, **Figure 85b** et **Figure 85c** présentent l'évolution de la charge appliquée en fonction respectivement du déplacement horizontal, des glissements entre le parapet et la dalle de pont et entre la dalle de pont et la dalle du laboratoire et de la contrainte dans les barres d'armatures instrumentées dans la niche de connexion (cf. Section 5.4). La Figure 86 présente l'évolution de la fissuration durant l'essai. La **Figure 87** et la **Figure 88** présentent le plan de rupture final du spécimen d'essai. Malheureusement, pour cet essai, le soulèvement n'a pas pu être analysé, car le capteur a été mal installé.



(c) Contrainte dans les armatures

Figure 85 - Résultats d'essai sur une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité connectée


Figure 86 - Progression de la fissuration durant l'essai sur une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité connectée



Figure 87 - Rupture de la clé de connexion longitudinale sur le parapet non-chargé



Figure 88 - Plan de rupture final d'une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité connectée

Au départ de l'essai, la rigidité initiale (pente force-déplacement) du spécimen d'essai (Figure 85a) semblait beaucoup plus faible qu'anticipée par les modèles numériques. La charge a augmenté de façon linéaire, avec la faible rigidité observée, jusqu'à une charge appliquée de 300 kN. Le parapet a ensuite présenté un comportement non-linéaire, avec apparition de fissures, jusqu'à atteindre la capacité maximale du parapet pour une force de 359 kN. Par la suite, la résistance a rapidement diminué jusqu'à atteindre un plateau de charge à 300 kN (Figure 85a). Le déchargement a été effectué à une charge de 300 kN. Il a été décidé de ne pas poursuivre plus loin le chargement notamment pour ne pas trop endommager les parapets en vue du prochain essai qui devait être réalisé sur ces mêmes spécimens mais cette fois en zone non connectée longitudinalement du parapet qui n'avait pas été chargé dans cet essai). Tel qu'attendu par les modélisations numériques préliminaires, la résistance minimale de conception de 476 kN n'est pas atteinte, cela est encore une fois expliquée par le fait d'appliquer un chargement vec une plaque de 700 mm de longueur sur un parapet de 2 m (cf. Section 4.6.1).

La contrainte dans la barre instrumentée provenant du parapet et dans la barre provenant de la dalle dans la niche de connexion (Figure 85c) varient de façon similaire au cours du chargement. Ces contraintes demeurent élastiques tout au long du chargement avec une contrainte maximale d'environ 250 MPa au pic de chargement.

Les premières fissures sont apparues entre 250 kN et 300 kN (Figure 86). Celles-ci sont horizontales dans la section en dessous de la plaque de chargement et qu'elles changent suite de direction (deviennent obliques) pour se poursuivre vers le haut du parapet. Elles se développent autant sur le parapet chargé que sur le parapet adjacent avec des ouvertures similaires. À 300 kN, une fissure à 45 degrés a commencé à se développer sur le dessus du parapet non chargé, depuis l'avant de la clé de connexion longitudinale, pour se poursuivre jusqu'à la face arrière du parapet non chargé. Cette fissure a ensuite continué de se propager et de s'ouvrir jusqu'à atteindre la charge maximale de 359 kN associée à une rupture de cette zone (Figure 87). Suite à cette première rupture, la clé de connexion longitudinale ne permet plus réellement de transférer les efforts du parapet chargé vers le parapet non chargé et seul le parapet chargé reprend les efforts. La fissuration s'accentue donc seulement sur ce parapet, principalement dans le haut du parapet autour de la plaque de chargement (Figure 88). Étant donné que le chargement a été arrêté à 300 kN en post-pic, le plan de rupture final n'est pas aussi évident sur la Figure 88 que pour les autres essais. Le mode de rupture final est représentatif du mode de rupture d'un parapet seul soumis à un chargement excentré (la connexion longitudinale étant devenue inefficace à la fin du chargement). Cela permet de conclure que la connexion longitudinale a permis d'augmenter la capacité maximale du parapet chargé de 59 kN (différence entre la force maximale et la force post-pic pour un parapet seul). Comme pour l'essai sur le parapet hybride, la dalle de pont n'a subi aucun endommagement. Par ailleurs, aucune fissuration n'a été relevée sur la niche connexion.

Dès le début de l'essai, des glissements importants ont été enregistrés entre le spécimen d'essai (parapetdalle) et la dalle du laboratoire, donc à l'interface dalle-sol. Ce glissement a augmenté relativement linéairement jusqu'à une valeur de 0.16 mm pour une charge appliquée de 175 kN. Par la suite, le glissement n'a quasiment pas évolué (Figure 85b). Ce glissement dalle-sol aurait dû être négligeable et n'était donc pas souhaité durant l'essai. L'analyse des résultats obtenus par corrélation d'images a également permis d'observer que les glissements relevés n'étaient 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 se situe logiquement le long de la base arrière de la dalle de pont, il a été possible de calculer l'angle de rotation moyen du spécimen d'essai par rapport au sol à partir des données du glissement moyen et d'éliminer l'effet de cette rotation sur les résultats d'essai. Ceci a permis d'obtenir un déplacement transversal corrigé (Figure 85a). La rigidité initiale obtenue suite à cette correction est cohérente avec celle attendue de par les modélisations numériques, ce qui semble donc valider l'hypothèse d'une rotation du spécimen d'essai par rapport au sol (dalle du laboratoire).

# 6.2.3 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 apparait très peu probable que celle-ci contribue à la reprise des efforts dans cet essai. Cet essai vise donc à observer 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 89a présente l'évolution de la charge appliquée en fonction du déplacement horizontal, la Figure 89b montre l'évolution de la charge appliquée en fonction du soulèvement entre le parapet chargé et la dalle de pont, la Figure 89c 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 5.4), la Figure 90 décrit l'évolution de la fissuration selon différents niveaux de chargement et la Figure 91 présente le plan de rupture final.



Figure 89 - Résultats d'essai sur une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité libre



Figure 90 - 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 91 - Plan de rupture final d'une série de deux parapets MTQ301 préfabriqués soumis à un chargement excentré à l'extrémité libre

Tout d'abord, le spécimen a montré un comportement linéaire et élastique jusqu'à une charge de 100 kN (**Figure 89a**). Par la suite, un comportement non-linéaire a été observé alors que la fissuration se développait à l'avant et sur le côté du parapet. La charge maximale atteinte a été de 293 kN pour un déplacement de 10.5 mm. Ensuite, la charge appliquée a diminué lentement jusqu'à l'arrêt du chargement. Le déchargement a été effectué lorsque le déplacement transversal a atteint 20 mm. Tel qu'observé dans les modélisations numériques préliminaires, la résistance minimale de conception de 476 kN de conception n'a pas été atteinte. Cela est à nouveau expliqué par le fait que le chargement a été appliqué avec une plaque de 700 mm de longueur sur un parapet de 2 m (cf. Section 4.6.1).

Le soulèvement du parapet par rapport à la dalle de pont a augmenté de façon graduelle tout au long du chargement jusqu'à l'atteinte de la valeur maximale de 0.52 mm au pic de chargement (Figure 89b).

La **Figure 89c** 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 puis a ensuite augmenté jusqu'à une 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. Il n'y a donc pas eu plastification des barres d'armatures. Les contraintes maximales ont été atteintes à la charge maximale.

Les premières fissures visibles à l'œil nu (Figure 90) sont apparues en premier lieu sur la face d'extrémité du parapet, vers 200 kN. À 250 kN, une nouvelle fissure oblique est apparue sur cette même face ainsi que deux fissures sur la face avant du parapet. Ces fissures sont horizontales dans la section en dessous

de la plaque de chargement et qu'elles changent suite de direction (deviennent obliques) pour se poursuivre vers le haut du parapet. Au pic de résistance, les fissures s'ouvrent grandement sur la face d'extrémité du parapet et quelques nouvelles fissures apparaissent à l'avant du parapet. Le plan de rupture final (Figure 91) correspond à une rupture en cisaillement autour de la plaque de chargement qui se poursuit obliquement sur la face d'extrémité du parapet tel qu'observé pour les deux autres essais (cf. Sections 6.2.1 et 6.2.2). 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 le comportement du parapet chargé lors de cet 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 final s'est produit dans la partie supérieure du parapet tout comme le mode de rupture observé pour un parapet coulé en place. L'utilisation de parapets MTQ301 préfabriqués n'influence donc par le comportement global conventionnel des parapets sur dalle de pont.

## 6.2.4 Comparaison du comportement des parapets

Les courbes de comportement mécanique (force-déplacement horizontal) provenant des trois essais structuraux réalisés dans ce projet sont comparées à la **Figure 92**.



Figure 92 - Comparaison des résultats obtenus des trois essais réalisés sur les parapets préfabriqués à l'étude

Tout d'abord, les trois courbes montrent la même rigidité initiale, ce qui vient appuyer la correction faire 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 de la clé de connexion longitudinale, la résistance du parapet chargé avait chuté pour atteindre 300 kN. Il a été mentionné à la **Section 6.2.2** que cette résistance de 300 kN représentait 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 parapets MTQ301 préfabriqués ont permis d'obtenir deux mesures de la résistance d'un parapet seul soumis à un chargement excentré, soit 300 kN et 293 kN ainsi qu'une mesure de la résistance avec une continuité longitudinale mesurée à 359 kN. Il est alors possible de reconfirmer qu'un parapet MTQ301 préfabriqué de 2 m chargé via une plaque de chargement de 700 mm sur son extrémité connectée longitudinalement a une capacité maximale de 59 kN à 66 kN supérieure à la capacité maximale du même parapet non connecté longitudinalement.

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 de 46 % (135 kN) supérieure à celle du parapet MTQ301 préfabriqué. En contrepartie, le parapet MTQ301 préfabriqué présente un comportement plus ductile que le parapet hybride.

## 7 VALIDATION DES MODÈLES NUMÉRIQUES

Ce chapitre présente les modélisations numériques réalisées pour reproduire le comportement mécanique des parapets testés puis compare les résultats numériques aux résultats expérimentaux. Cette comparaison permettra d'une part de confirmer la validité des modèles numériques utilisés pour l'étude paramétrique préliminaire présentée aux Sections 4.5 et 4.6 et qui étudiait 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. D'autre part, les modèles numériques finaux, validés sur les parapets préfabriqués de 2 m chargés via une plaque de chargement de 700 mm (configuration des essais expérimentaux), pourront être 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 cette norme.

La Section 7.1 indique les principales modifications effectuées entre les modèles numériques préliminaires (cf. Section 4.2) et les modèles finaux présentés dans ce chapitre. Les résultats numériques obtenus de ces modèles finaux sont ensuite comparés aux résultats expérimentaux aux Sections 7.2 et 7.3, respectivement pour le parapet hybride et pour le parapet MTQ301 préfabriqué. Enfin, la Section 7.4 présente un bilan sur la conformité des parapets à l'étude.

### 7.1 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.

## 7.1.1 Propriétés des matériaux

Les propriétés des matériaux constituant les parapets testés ont été déterminées avec des essais de caractérisation lors de la phase expérimentale (cf. Section 6.1) afin de pouvoir les introduire dans les modèles numériques finaux. Il est à noter que les valeurs de résistance à la traction des BO ont été obtenues à partir d'essais de traction indirecte par fendage (essais brésiliens). Ces valeurs ont donc été diminuées de 15 % pour obtenir la résistance en traction directe correspondante afin de l'implémenter dans les modèles numériques.

## 7.1.2 Effet de l'orientation des fibres

Lors des essais de chargement central sur parapet hybride réalisés dans le cadre du projet R686.1 (Charron et al., 2013a), il avait été constaté que l'orientation des fibres dans la coque en BFUP était moins favorable que dans les spécimens de caractérisation en traction, du fait des techniques de coulée et des géométrie différentes. Ceci avait amené à réduire la loi de traction du BFUP obtenue des essais de caractérisation, afin de modéliser adéquatement le comportement en traction 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. 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. Ces réductions ont donc été appliquées aux propriétés en traction des BFUP de la coque et de la niche de connexion. Les courbes de comportement en traction utilisées pour le BFUP de la niche de connexion et de la coque seront présentées à la Section 7.1.3.

## 7.1.3 Effet du retrait

Afin de reproduire toutes les sollicitations subies par 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 notamment 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 a consisté 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 7.1, 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.

$$\varepsilon_{cm} = \frac{\varepsilon_{sh}}{1+n\rho}$$
 7.1

Où :

 $\varepsilon_{cm}$  = le retrait restreint ( $\mu\epsilon$ )  $\varepsilon_{sh}$  = le retrait libre ( $\mu\epsilon$ )  $E_s$  = le module élastique de l'acier  $E_c$  = le module élastique du béton n = le ratio des modules  $E_s/E_c$  (-)

 $\rho$  = 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  $\mu$ E basé sur les valeurs de retrait total 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 7.1 donne un retrait restreint de 615  $\mu$ E. La multiplication de la différence entre le retrait libre et le retrait restreint par le module d'élasticité du BO à l'étude (24 900 MPa) résulte en une 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 la restriction ne provient pas, cette fois, des barres d'armatures mais de l'interface entre les deux bétons. 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 mince en BFUP sur un élément en 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 με 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) et les réduction appliqués lors du projet R686.1 qui avaient bien reproduit le comportement expérimental du parapet chargé au centre.

Les lois de traction directe obtenues des essais de caractérisation sur les BFUP 4 % (coque) et 3 % (niche), ainsi que les lois réduites associées, utilisées pour modéliser leur comportement réel en traction respectivement dans la coque et la niche, sont présentées à la **Figure 93**. Même si les résultats présentés à la **Section 4.5.1.2** montrent qu'une diminution des propriétés en traction de la niche de connexion n'affecte pas le comportement global des parapets, les mêmes réductions ont été appliquées au BFUP de la niche de connexion par souci de cohérence.



Figure 93 - Lois de comportement en traction considérées dans les modèles numériques

## 7.1.4 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.

## 7.2 MODÈLE DU PARAPET HYBRIDE

### 7.2.1 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 94.** L'exigence de capacité de 476 kN 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 94a). Par la suite, le comportement devient nonlinéaire et la rigidité à l'état fissurée 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.



Figure 94 - Comparaison entre les courbes force-déplacement transversal expérimentale et numérique pour l'essai de chargement excentré sur parapet hybride

La Figure 95 et la Figure 96 comparent la fissuration du modèle numérique à la fissuration observée pendant l'essai. Tout comme lors des essais expérimentaux (Figure 95b), les premières fissures dans le modèle apparaissent au point de changement de pente du parapet avant d'atteindre la charge de 400 kN (Figure 95a). La fissuration se développe ensuite autour de la plaque de chargement vers le haut du parapet et cette fissuration se poursuit sur la face d'extrémité 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 96. Le processus de fissuration dans le parapet hybride ainsi que le mode de rupture final obtenu numériquement est très similaire à ce qui a été observé lors des essais expérimentaux (cf. Section 6.2.1). Par ailleurs, le modèle numérique ne présente aucun endommagement de la dalle de pont, tel qu'observé lors de l'essai.





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

b) Résultats expérimentaux (à 400 kN)

Figure 95 - Comparaison de fissuration pour une charge appliquée d'environ 400 kN pour l'essai de chargement excentré sur parapet hybride







Résultats expérimentaux

Figure 96 - Comparaison des plans de rupture finaux pour l'essai de chargement excentré sur parapet hybride

Finalement, des jauges de déformation étaient positionnées sur certaines barres d'armatures dans la niche de connexion des parapets (cf. Section 5.4). 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 97. Cette Figure illustre que le modèle numérique reproduit très bien les données expérimentales avec une 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.



# Figure 97 - Comparaison des évolutions numérique et expérimentale de la contrainte dans les barres d'armatures instrumentées pour l'essai de chargement excentré sur parapet hybride

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.

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

Tel que mentionné à la **Section 6.2.1**, la capacité maximale du parapet hybride de 2 m chargé à son extrémité via une plaque de chargement de 700 mm de longueur est inférieure à la charge pondérée de conception de 476 kN prescrite dans la norme CSA-S6. Ces conditions expérimentales sont cependant plus pénalisantes que les conditions prescrites par la norme CSA-S6 pour cette catégorie de parapet (TL-5), qui requièrent que le chargement soit appliqué sur une longueur de 2400 mm (cf. **Section 4.6.3**).

Le modèle numérique du parapet hybride permettant de bien reproduire les résultats expérimentaux (sur parapet de 2 m avec une plaque de chargement de 700 mm), 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 mm<sup>3</sup> 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 du parapet. Les résultats de ces modélisations sont résumés à la **Figure 98** et au **Tableau 26**. Le concept de parapet hybride sollicité tel que requis dans la norme CSA-S6 surpasse largement la charge pondérée de conception (représentée en pointillé rouge à la **Figure 98**). 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 le plus critique, cette charge de conception est surpassée de 43 %. Le patron de fissuration obtenu pour les deux cas de chargement (centré et excentré) est illustré à la **Figure 99**. Tel que décrit à la **Section 4.6.3**, le plan de rupture s'étend sur une plus grande longueur du parapet avec cette plaque de chargement qu'avec la plaque de 700 mm. Davantage de matériau (béton et armature) participe donc au mécanisme de rupture, ce qui explique la hausse significative de résistance avec l'utilisation de la plaque de 2400 mm. Le mode de rupture correspond à un mode mixte en flexion-cisaillement comparativement à la rupture en cisaillement observée lors de l'essai de chargement excentré du parapet hybride via la plaque de chargement de 700 mm. La Figure 100 permet d'observer qu'il n'y a aucune plastification des barres d'armatures de la niche de connexion.



Figure 98 - Parapet hybride de 4 m chargé via une plaque de 2400 x 100 x 113 mm<sup>3</sup>

# Tableau 26 - Capacité maximale d'un parapet hybride de 4 m chargé par une plaque de chargement de2400 mm

| Chargement | F <sub>max</sub> (kN) | Variation F <sub>max</sub> vs<br>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 99 - Patron de fissuration à la résistance maximale du parapet hybride soumis à des chargements centré et excentré par une plaque de chargement de 2400 mm







## 7.3 MODÈLE DU PARAPET MTQ301 PRÉFABRIQUÉ

Deux essais ont été réalisés sur le parapet MTQ301 préfabriqué, soit l'essai une extrémité connectée longitudinalement (cf. Section 6.2.2) et l'essai sur l'extrémité libre (cf. Section 6.2.3). Des modélisations numériques reproduisant les conditions de ces essais ont été effectuées afin d'être comparées aux résultats d'essai.

Les résultats de la modélisation sont comparés aux résultats expérimentaux à la Section 7.3.1 et à la Section 7.3.2 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 7.3.3.

# 7.3.1 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 101** à la **Figure 104**. La **Figure 101** 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 du maximum de résistance, le modèle n'arrive plus à converger. Le calcul numérique se termine donc au pic et il n'est pas possible d'obtenir le comportement post-pic.



Figure 101 - Comparaison entre les courbes force-déplacement transversal expérimentale et numérique pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué

La Figure 102 et la Figure 103 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 102) 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 une autre fissure s'initie de la clé de connexion longitudinale pour se développer sur la face supérieure du parapet non chargé. Lors de l'essai, une rupture en deux temps a été observée. Premièrement, la fissure initiée au

niveau de la clé de connexion longitudinale a continué de se développer à 45 degrés sur la face supérieure et à l'arrière du parapet non chargé (parapet adjacent), jusqu'à une rupture à l'arrière de ce parapet. Par la suite, la clé de connexion longitudinale ne reprend plus vraiment d'efforts et le parapet chargé supporte seul les efforts. La rupture finale est alors similaire à une rupture retrouvée sur un parapet seul chargé à son extrémité. Numériquement, la première phase de la rupture (au niveau de la connexion longitudinale et à l'arrière du parapet non chargé) est bien reproduite autant au niveau du patron de fissuration (Figure 103) qu'au niveau de la charge maximale atteinte (Figure 101). Cependant, à partir du moment où cette rupture se produit, 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 numériquement la deuxième phase de la rupture.





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

b) Résultats expérimentaux (environ à 250 kN)

Figure 102 - 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



Résultats numériques (w > 0,2 mm)



Résultats expérimentaux

Figure 103 - Comparaison des plans de rupture finaux pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué

Ensuite, la **Figure 104** compare les évolutions numérique et expérimentale de la contrainte dans les barres d'armatures instrumentées de la niche de connexion (cf. **Section 5.4**). Les résultats numériques représentent globalement bien l'allure de la courbe expérimentale. Le comportement dans la phase 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 105** permet d'observer les contraintes 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.



Figure 104 - 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

En résumé pour cet essai, le modèle a permis de représenter de façon adéquate le comportement forcedéplacement (Figure 101) jusqu'à l'atteinte de la rupture à l'arrière de la clé de connexion longitudinale. À partir de ce point, le modèle ne peut représenter le comportement post-pic observé. Le patron de fissuration (Figure 102 et Figure 103) est bien reproduit, tandis que les contraintes dans les barres d'armatures (Figure 104) 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 105 - Contraintes 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

# 7.3.2 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 5.1.2. 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 justifié par le fait que la clé de connexion longitudinale a un faible impact sur le comportement d'un parapet chargé sur son extrémité non connecté, d'autant plus que la connexion longitudinale était endommagée lors du premier essai et donc très peu effective pour l'essai à l'extrémité non connectée (Section 6.2.3).

La Figure 106 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 de charge, les courbes numérique et expérimentale se séparent et le modèle montre un comportement un peu moins ductile 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 donc 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.



Figure 106 - Comparaison entre les courbes force-déplacement transversal expérimentale et numérique pour l'essai de chargement excentré à l'extrémité non-connectée sur parapet MTQ301 préfabriqué

La Figure 107 et la Figure 108 comparent la fissuration du modèle numérique à la celle 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 la face d'extrémité du parapet autour de 180 kN (Figure 107). Lors de l'essai, les premières fissures sur la face d'extrémité du parapet ont été observées autour de 200 kN et celles sur sa face vers 250 kN. Il faut cependant garder en mémoire que le modèle permet d'observer des fissures extrêmement fines alors que, lors de l'essai, elles ne sont perceptibles à l'œil nu qu'une fois qu'elles ont atteint une certaine ouverture. Le patron de fissuration à la rupture obtenu numériquement est comparé à celui observé lors de l'essai par le système de corrélation d'image à la Figure 108. Ces patrons sont très semblables 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.





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

b) Résultats expérimentaux (environ à 250 kN)

Figure 107 - 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 108 - Comparaison des plans de rupture finaux pour l'essai de chargement excentré sur parapet MTQ301 préfabriqué

La Figure 109 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 dans la niche de connexion (cf. Section 5.4). Globalement, les résultats numériques présentent des tendances similaires aux courbes expérimentales, bien que le premier changement de pente numérique est plus prématuré. La contrainte maximale dans la barre provenant du parapet est évaluée numériquement à 186 MPa alors que les résultats d'essai ont mesuré cette contrainte à 176 MPa. Pour la barre provenant 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 14 % respectivement pour les barres provenant du parapet et de la dalle). La Figure 110 présente les contraintes 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. 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.



Figure 109 - 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 110 - Contraintes 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

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 106). Les rigidités en condition non-fissurée et fissurée ainsi que la charge maximale atteinte 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 107 et Figure 108). Le modèle numérique permet de bien reproduire la contrainte maximale dans les barres d'armatures instrumentées (Figure 109). 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.

# 7.3.3 Validation de la performance du parapet MTQ301 préfabriqué selon les critères de la norme CSA

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 conformité du parapet MTQ301 préfabriqué. C'est pourquoi, dans cette section, le modèle validé du parapet MTQ301 préfabriqué sera utilisé pour évaluer la performance de ce parapet selon les critères de la norme CSA-S6. Pour ce faire, le parapet MTQ301 préfabriqué a été modélisé avec une longueur de 4 m et l'application du chargement via une plaque de 2400 mm de longueur. Cette modélisation a tout d'abord était effectué pour un chargement centré et un chargement excentré sur un parapet seul. Puis, puisque l'effet de la clé de connexion longitudinale a été étudié sur le parapet MTQ301 préfabriqué, des modélisations ont également été réalisées pour étudier le comportement du même parapet lorsque connecté longitudinalement à un autre parapet du même type. Pour ce faire, une série de deux parapets de 4 m connectés longitudinalement entre eux par une clé de connexion a été modélisée. Le chargement a ensuite été appliqué, via une plaque de 2400 mm de longueur, au centre du parapet ainsi qu'à son extrémité connectée. Les résultats de ces modélisations sont présentés à la Figure 111 et à la Figure 112. Les capacités maximales correspondantes sont résumées au Tableau 27.

| Chargement                      | F <sub>max</sub> (kN) | Variation F <sub>max</sub> vs<br>exigence CSA |
|---------------------------------|-----------------------|---|
| Centré                          | 667                   | + 40.1 %                                      |
| Centré avec clé longitudinale   | 705                   | + 48.1 %                                      |
| Excentré                        | 652                   | + 37.0 %                                      |
| Excentré avec clé longitudinale | 673                   | + 41.4 %                                      |

# Tableau 27 - Capacité maximale de parapets MTQ301 préfabriqués de 4 m chargés par une plaque dechargement de 2400 mm



Figure 111 - Parapets MTQ301 préfabriqués de 4 m chargés par une plaque de chargement de 2400 mm



(a) Chargement centré (à 667 kN, w > 0,1 mm)





(c) Chargement centré joint longitudinal

(à 705 kN, w > 0,1 mm)



Figure 112 - Patrons de fissuration à la résistance maximale du parapet MTQ301 préfabriqué soumis à des chargements centré et excentré par une plaque de chargement de 2400 mm

Les résultats présentés à la Figure 111, à la Figure 112 et au Tableau 27 permettent tout d'abord de constater que pour les quatre cas de chargement étudiés, la charge pondérée de conception de 476 kN est surpassée d'au moins 37 %. Le cas de chargement critique demeure le cas de chargement excentré, mais la différence de capacité est très faible par rapport au cas de chargement centré, soit de 2.3 %. L'ajout d'une clé de connexion longitudinale permet d'obtenir des capacités maximales quelque peu supérieures au cas sans connexion longitudinale. Plus précisément, la clé de connexion longitudinale

permet d'augmenter la capacité maximale de 5.7 % 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 4.6.3 et 4.6.4). L'analyse des plans de rupture (Figure 112) 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 la clé longitudinale) 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, visible à travers le patron de fissuration Figure 112) ainsi que par l'analyse des contraintes dans les barres d'armatures (Figure 113). 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 113). 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.



b) Chargement à l'extrémité (à 652 kN)

Figure 113 - Contraintes dans les barres d'armature à la résistance maximale du parapet MTQ301 préfabriqué soumis à des chargements centré et excentré par une plaque de chargement de 2400 mm

#### 7.4 BILAN SUR LA CONFORMITÉ DES PARAPETS À L'ÉTUDE

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 chargés sur une longueur de 2400 mm 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 2400 mm 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 connexion longitudinale entre les parapets. La contribution d'une clé de connexion longitudinale est faible sur des parapets de 4 m et ne semble pas requis. À moins qu'un chargement transversal en sens inverse puisse survenir sur les parapets préfabriqués, la clé de connexion longitudinale pourrait être éliminée pour simplifier leur installation en chantier.

## 8 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le **Chapitre 8** rappelle les objectifs de ce projet pour ensuite résumer les principales conclusions et recommandations quant à l'utilisation des parapets développés dans le cadre de ces travaux de recherche.

#### 8.1 RAPPEL DES OBJECTIFS

Le premier objectif principal de ce projet était de poursuivre le développement du parapet hybride préfabriqué avec une connexion parapet-dalle en BFUP en élargissant l'étude de son comportement à différentes configurations de matériaux et conditions de chargement.

Le deuxième objectif principal était de développer une version préfabriquée du parapet MTQ301 habituellement coulé en place. Pour ce faire, l'objectif était de proposer un mode de connexion parapet-dalle similaire à celui utilisé pour le parapet hybride, soit avec une niche de connexion en BFUP, tout en modifiant le moins possible le positionnement des armatures ainsi que les matériaux utilisés dans le parapet MTQ301. Ce parapet vise à proposer une option de parapet préfabriqué avec ses avantages associés (durabilité améliorée et diminution du temps de chantier) tout en étant plus simple et moins coûteux à produire que le parapet hybride.

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 dans le BFUP 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;
- Valider la conformité des parapets développés vis-à-vis de des exigences de la norme CSA-S6 (2014).

## 8.2 CONCLUSIONS

## 8.2.1 Premier objectif

Le premier objectif spécifique du projet était de réaliser, ou mettre à jour, la conception des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué. Ceci a été possible en s'inspirant de la conception du parapet hybride réalisée lors de la Phase 1 du projet (projet R686.1), ainsi qu'en recensant des données de la littérature

sur l'efficacité de différentes connexions longitudinales (Section 3.4.2). Les principaux éléments considérés lors de la conception des parapets à l'étude sont les suivants :

- Pour le parapet hybride, le mode de connexion parapet-dalle par une niche ouverte remplie de BFUP a été conservé puisqu'il a présenté un très bon comportement lors de la Phase 1 du projet. 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 conserver un espacement constant entre les barres, même dans les zones de jonction entre les parapets et ainsi faciliter l'installation d'une série de parapets côtes-à-côtes;
- Pour le parapet MTQ301 préfabriqué, le même mode de connexion à niche ouverte en BFUP que pour le parapet hybride a été retenu étant donné sa bonne performance mécanique. La niche est cependant un peu plus volumineuse afin de respecter l'épaisseur de recouvrement des armatures requise pour ce parapet constitué de béton ordinaire;
- Pour les deux parapets préfabriqués, une clé de connexion longitudinale de type coulée en place a été choisie par rapport à d'autres méthodes de connexion existantes afin d'offrir une certaine souplesse pour l'installation des parapets sur la dalle de pont ainsi qu'un apport mécanique pour de faibles déplacements transversaux des parapets.

## 8.2.2 Deuxième et troisième objectifs

Les deuxième et troisième objectifs spécifiques du projet consistaient à étudier numériquement l'effet des propriétés matériaux et l'effet de paramètres structuraux sur les parapets développés. Des études numériques paramétriques, présentées aux **Sections 4.5** et **4.6**, ont étudié l'effet du pourcentage de fibres dans le 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 contenant 2 % et 3 % volumique 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 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 fibres dans le BFUP de la niche de connexion parapet-dalle a peu d'influence sur la capacité maximale du parapet, même lorsque le retrait est considéré. Il y a seulement une légère influence sur la quantité de microfissures et sur leur ouverture. En ce sens, il n'est pas requis d'utiliser un BFUP 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. À titre d'exemple, la capacité

maximale d'un parapet de 4 m est supérieure d'environ 60 % à celle d'un parapet de 2 m, mais seulement 2 % moindre que pour 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 (validé pour des longueurs supérieures à 2 m) n'influence pas la résistance du parapet, puisque le plan de rupture se développe sur une longueur plus courte que la longueur de l'élément. Le cas de chargement excentré constitue le cas de chargement critique. La capacité maximale pour un chargement excentré via une plaque de 700 mm est diminuée de 25 % et 53 %, respectivement pour des parapets de 2 m et de 4 m, par rapport à la capacité maximale de ce même parapet soumis à un chargement centré;
- Le fait d'appliquer le chargement sur une plaque de 700 mm de longueur entraine une capacité maximale inférieure aux exigences de la norme CSA-S6 pour un chargement excentré. L'utilisation d'une plaque de 2400 mm de longueur, qui suit les exigences de la norme CSA-S6, permet d'augmenter cette capacité de 37 % et 43 % et d'ainsi surpasser la capacité minimale exigée par cette norme;
- Le fait d'appliquer le chargement sur une plaque de 700 mm de longueur entraine une capacité maximale supérieure aux exigences de la norme CSA-S6 pour un chargement centré. Pour cas de chargement (centré), le choix de la plaque de chargement (700 mm ou 2400 mm) n'a pas de réelle influence sur la résistance maximale;
- La connexion longitudinale entre deux parapets préfabriqués permet généralement d'augmenter la capacité maximale du parapet connecté. Cet effet est plus marqué lorsque le lieu d'application de la charge se rapproche de la connexion longitudinale. À titre d'exemple, pour un chargement appliqué à l'extrémité connectée d'un parapet (hybride ou MTQ301 préfabriqué), la connexion longitudinale 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.

# 8.2.3 Quatrième objectif

Le quatrième objectif spécifique du projet était d'étudier expérimentalement le comportement des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué. 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'une clé de connexion longitudinale 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 à ces 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 parapets hybride et MTQ301 préfabriqué de 2 m ont atteint, sous chargement excentré, 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 durant les essais, alors que la norme CSA-S6 spécifie un chargement sur une longueur de 2400 mm, ce qui est seulement applicable sur des parapets de 4 m qui auraient été plus coûteux à produire;

- L'ajout d'une clé de connexion longitudinale au parapet MTQ301 préfabriqué a permis d'obtenir une capacité additionnelle d'environ 60 kN (augmentation de 20%) lors d'un chargement excentré sur le côté connecté du parapet;
- 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.

## 8.2.4 Cinquième objectif

Les essais en laboratoire ne permettant 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. Le cinquième objectif spécifique du projet était ainsi d'utiliser des modèles numériques pour vérifier le respect des critères de performance de la norme. Pour ce faire, les modèles devaient d'abord être validés avec les résultats d'essais sur parapets.

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. Le but 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 force-déplacement transversal des parapets testés. 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 de 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.

Les modèles numériques ayant démontré une performance satisfaisante pour reproduire les résultats d'essais sur parapets à taille réelle, ils ont donc été utilisés pour vérifier le respect des critères de

performance de la norme. Dans ce cas, ce sont des parapets de 4 m qui ont été soumis, numériquement, 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 des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué de 4 m surpasse, de 43 et 37 % respectivement, l'exigence de la norme CSA-S6 (476 kN) lorsque soumis à un chargement excentré et de 69 et 40 % respectivement sous chargement centré;
- Le déplacement des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué de 4 m est inférieur à 4 mm pour des charges de services (357 kN). Cela assure que le profil de redirection des véhicules demeurera continu en cas d'impact, sans nécessiter de connexion longitudinale;
- La contribution d'une connexion longitudinale sur la capacité maximale des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué de 4 m chargé via une plaque de 2400 mm est très faible avec une augmentation de seulement 5 %. Puisque la capacité maximale des parapets préfabriqués non-connectés est largement suffisante, une connexion longitudinale ne semble pas requise.

## 8.3 RECOMMANDATIONS

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

Dans l'éventualité où le MTQ souhaiterait utiliser ces parapets, certaines recommandations peuvent être formulées :

- Il a été montré numériquement que les parapets hybride et MTQ301 préfabriqué de 4 m de longueur ont une résistance nettement supérieure (de 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 ou sans continuité). En ce sens, leur utilisation dans un contexte réel peut être recommandée. 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 (projet R686.1) (Charron et al., 2013a) avaient effectivement montré que l'utilisation d'un parapet hybride était une solution économique pour une durée de vie de 75 ans en comparaison aux parapets MTQ301 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 apparait 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 que le MTQ puisse faire un choix éclairé du parapet le plus économique sur la durée de vie d'un ouvrage;
- 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 lois de comportement en cisaillement plus exactes et d'améliorer la précision des modèles numériques pour les parapets préfabriqués;
- Les essais de chargement quasi-statiques réalisés ont permis 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. Même si les essais de chargement statique sont plus critiques, des essais de chargement dynamiques ou des essais d'impact tels que définis dans la norme pourraient permettre d'observer des phénomènes qui ne peuvent pas être observés lors d'essais quasi-statiques;
- Pour le parapet hybride, il est recommandé d'inclure 4 % vol. de fibres dans le BFUP pour une performance et une durabilité maximale;
- Pour les niches de connexion des parapets hybride et MTQ301 préfabriqué, un BFUP à 3 % de fibres est recommandé. Il est également recommandé de conserver l'espacement des barres dans la niche de connexion à 100 mm, comme pour les spécimens d'essai construits dans le cadre de ce projet. Un tel espacement permet plus facilement de placer une série de parapets côtes-àcôtes. Avec cet espacement, les deux modèles de parapets développés ont montré une surcapacité importante par rapport aux exigences de la norme CSA-S6;
- Aucune connexion longitudinale n'est nécessaire pour respecter les exigences de la norme CSA-S6. Les parapets hybride et MTQ301 préfabriqué atteignent facilement la capacité requise sans nécessiter l'apport de cette connexion. De plus, les deux modèles de parapets sont assez rigides pour assurer un profil continu de redirection des véhicules en cas d'impact.

#### 9 **BIBLIOGRAPHIE**

AASHTO. (2017). LRFD Bridge Design Specifications. Norme LRFDUS-6.

- 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.
- 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 <u>https://search.proquest.com/docview/853730387?accountid=40695</u>
- 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
- Bleitgen, K., & Stiemer, S. F. (2006). *Developing and Testing of Precast Concrete Bridge Barrier Anchorages* to meet the Requirements for PL-2 Barrier Systems of the Canadian Highway Bridge Design Code. University of British Columbia.
- 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.
- Charron, J.-P., Damry, R., Desmettre, C., & Massicotte, B. (2013a). *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., & Desmettre, C. (2013). *Potential use of fiber reinforced concretes for constructions of durable civil engineering infrastructures*. Canada: Polytechnique Montréal.
- Charron, J. P., Braike, S., & Androuet, C. (2011a). *Béton Fibré à Ultra-hautes Performances de Polytechnique Montréal, Déclaration d'invention DIV-446B.* Polytechnique 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 Collogue L'innovation au service des infrastructures de transport, Montréal, QC.
- Charron, J. P., Namy, M., & Massicotte, B. (2013b). *Comportement des parapets de ponts coulés en place et préfabriqués.* Communication présentée à Colloque des ponts 2013, Québec, Qc.
- Charron, J. P., Niamba, E., & Massicotte, B. (2011b). Static and Dynamic Behavior of High- and Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concrete Precast Bridge Parapets. *Journal of Bridge Engineering*, 16(3), 413-421. doi:10.1061/(asce)be.1943-5592.0000159
- 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.
- Dagenais, M.-A., & Massicotte, B. (2013). *Renforcement sismique de piles rectangulaires par gainage en BFUP.* Communication présentée à Colloque des ponts 2013, Québec, QC.

- 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 <u>https://search.proquest.com/docview/1080816850?accountid=40695</u>
- 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
- Duchesneau, F., Charron, J. P., & Massicotte, B. (2011). Monolithic and hybrid precast bridge parapets in high and ultra-high performance fibre reinforced concretes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *38*(8), 859-869. doi:10.1139/l11-054
- 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/l04-006
- 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).
- Gendron, F. (2019). Conception et analyse du comportement mécanique de parapets préfabriqués pour les ponts avec joints de connexion en bétons fibrés ultra performants. (Mémoire de Maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC).
- Habel, K. (2004). Structural behaviour of elements combining ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC) and reinforced concrete. 222. doi:10.5075/epfl-thesis-3036
- 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
- Lachance, F., Charron, J. P., Massicotte, B., Thibault, M., & caza, D. (2008). Behavior of precast.
- 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
- Lessard, M.-C., Charron, J. P., Massicotte, B., Thibault, M., & Caza, D. (2008, 2-3 Décembre 2008). *Behavior* of precast pre-slab panels for bridge. Communication présentée à Conference ACI-Quebec, Boucherville, QC.
- MTQ. (2017). Manuel de conception des structures Québec, QC.
- 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 <u>https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0063082</u>
- 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
- Noshiravani, T. (2012). Structural Response of R-UHPFRC RC Composite Members Subjected to Combined Bending and Shear. 532. doi:10.5075/epfl-thesis-5246
- 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 <u>http://digital.library.ryerson.ca/islandora/object/RULA:1612</u>
- 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.
- Toutlemonde, F., & Resplendino, J. (2011). *UHPFRC Bridges in Japan*. Communication présentée à Desining and Building with UHPFRC: State of the Art and Development, Marseille, France.
- Wipf, T., Ecklund, A., & Sritharan, S. (2018). *Precast Concrete Bridge Barriers for Accelerated Bridge Construction*. Ames, IA: Tiré de <u>https://abc-utc.fiu.edu/research-projects/isu-research-projects/isu-research-projects/development-of-prefabricated-bridge-railings/</u>