

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL,
GÉOLOGIQUE ET MINES

**UTILISATION STRUCTURALE DES BFUP
POUR LES PARAPETS PRÉFABRIQUÉS**

PAR

JEAN-PHILIPPE CHARRON, ING., PH.D., PROFESSEUR TITULAIRE

RAJNISH DAMRY, M.SC., ÉTUDIANT GRADUÉ

CLÉLIA DESMETTRE, ING. JR., PH.D., ASSOCIÉ DE RECHERCHE

BRUNO MASSICOTTE, ING., PH.D., PROFESSEUR TITULAIRE

RAPPORT SR13-05

MAI 2013

RAPPORT DE RECHERCHE

N/R : SR13-05

V/R : R636.1

UTILISATION STRUCTURALE DES BFUP
POUR LES PARAPETS PRÉFABRIQUÉS

- RAPPORT FINAL -

PRÉPARÉ À L'ATTENTION DE

M. DANIEL BOULET, ING., PH.D.

M. LUC LAPOINTE, ING.

DIRECTION DES STRUCTURES
MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC
930, CHEMIN SAINTE-FOY, 5E ÉTAGE
QUÉBEC (QUÉBEC) G1S 4X9

PAR

JEAN-PHILIPPE CHARRON, ING., PH.D., PROFESSEUR TITULAIRE

RAINISH DAMRY, ÉTUDIANT À LA MAÎTRISE

CLÉLIA DESMETTRE, ING. JR., PH.D., ASSOCIÉ DE RECHERCHE

BRUNO MASSICOTTÉ, ING., PH.D., PROFESSEUR TITULAIRE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
C.P. 6079, STATION CENTRE-VILLE
MONTRÉAL (QUÉBEC) H3C 3A7

MONTRÉAL MAI 2013

RAPPORT DE RECHERCHE
N/R : SR13-05
V/R : R686.1

**UTILISATION STRUCTURALE DES BFUP
POUR LES PARAPETS PRÉFABRIQUÉS**

- RAPPORT FINAL -

PRÉPARÉ À L'ATTENTION DE

M. DANIEL BOULET, ING. PH.D.
M. LUC LAPOINTE, ING.

DIRECTION DES STRUCTURES
MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC
930, CHEMIN SAINTE-FOY, 6E ÉTAGE
QUÉBEC (QUÉBEC) G1S 4X9

PAR

JEAN-PHILIPPE CHARRON, ING., PH.D., PROFESSEUR TITULAIRE
RAJNISH DAMRY, ÉTUDIANT À LA MAÎTRISE
CLÉLIA DESMETTRE, ING. JR., PH.D., ASSOCIÉ DE RECHERCHE
BRUNO MASSICOTTE, ING., PH.D., PROFESSEUR TITULAIRE

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

MONTRÉAL, MAI 2013

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	I
LISTE DES TABLEAUX	IV
LISTE DES FIGURES	VI
1 INTRODUCTION	1
1.1 Objectifs	1
1.2 Méthodologie.....	2
1.3 Organisation du rapport	2
2 REVUE DE LA DOCUMENTATION SUR LES PARAPETS PRÉFABRIQUÉS	3
2.1 Normes de conception des parapets	3
2.1.1 Guide specification for bridge railings.....	3
2.1.2 NCHRP report 350 et AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2007	7
2.1.3 Norme Canadienne CSA/CAN S6-06 (2006) et québécoise (MTQ, 2010)	10
2.2 Ancrage des parapets	13
2.2.1 Parapets coulés en place	13
2.2.2 Parapets préfabriqués	16
2.3 Continuité des parapets préfabriqués	20
2.4 Conclusion.....	23
3 CONCEPTION DES PARAPETS HYBRIDES	24
3.1 Exigences pour la conception d'un parapet de catégorie PL-3	24
3.1.1 Charges de conception	24
3.1.2 Géométrie.....	25
3.1.3 Modifications admissibles	26
3.2 Considérations pour la conception.....	26
3.2.1 Logiciel et hypothèse.....	26
3.2.2 Matériaux utilisés.....	26
3.3 Parapet de référence MTQ 301.....	27

3.4	Parapets hybrides à niche fermée.....	29
3.5	Parapet hybride à niche ouverte.....	31
3.6	Conclusion.....	33
4	PROGRAMME EXPÉRIMENTAL.....	34
4.1	Campagne d'essais.....	34
4.1.1	Essais statiques sur parapets.....	34
4.1.2	Essais de caractérisation sur les matériaux.....	36
4.2	Production des parapets.....	37
5	RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.....	45
5.1	Propriétés mécaniques des matériaux.....	45
5.1.1	Bétons.....	45
5.1.2	Acier.....	49
5.2	Parapets MTQ 301.....	49
5.3	Parapet hybride niche fermée.....	54
5.4	Parapet hybride niche ouverte.....	58
5.5	Comparaison des résultats.....	62
5.6	Conclusion.....	63
6	RÉSULTATS MODÉLISATIONS NUMÉRIQUES.....	65
6.1	Modèles numériques.....	65
6.1.1	Logiciel et modèle constitutif du béton.....	65
6.1.2	Propriétés des matériaux.....	67
6.1.3	Éléments finis, maillage et méthode de résolution.....	71
6.1.4	Conditions limites et chargement.....	74
6.2	Parapet MTQ 301.....	74
6.3	Parapet hybride à niche fermée.....	79
6.4	Parapet hybride à niche ouverte.....	80
6.5	Conclusion.....	86
7	ÉTUDE ÉCONOMIQUE.....	87
7.1	Potentiel de durabilité des matériaux et des parapets.....	87
7.2	Coûts de construction et de remplacement des parapets.....	88

7.3 Conclusion.....91

8 CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATION93

9 RÉFÉRENCES96

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Sélection du niveau de performance (AASHTO, 1989)	4
Tableau 2 - Vitesse et accélération des passagers suite à l'impact	5
Tableau 3 - Critères pour les essais d'impact en fonction du niveau de performance (AASHTO, 1989)	5
Tableau 4 - Charges de conception pour les parapets (AASHTO, 1989)	6
Tableau 5 - Résultats des essais d'impact pour le niveau PL2 (Jian & al., 2004)	6
Tableau 6 - Équivalence entre les niveaux de performance et les essais (State of Louisiana, 2006)	7
Tableau 7 - Propriété des véhicules légers pour les essais d'impact (NCHRP (1993)	8
Tableau 8 - Niveau d'essais d'impact pour les parapets (AASHTO 2007)	9
Tableau 9 - Charges de conception pour les parapets (AASHTO, 2007)	9
Tableau 10 - Sélection du niveau de performance (article 12.4.3.2.4 CSA-S6 2006)	11
Tableau 11 - Charges sur les dispositifs de retenue (article 3.8.8.1 CSA-S6 2006).....	12
Tableau 12 - Charges de conception statiques et dynamiques pour les parapets PL-3	12
Tableau 13 - Charges de conception.....	24
Tableau 14 - Propriétés des matériaux cimentaires utilisés dans le modèle numérique	27
Tableau 15 - Conditions expérimentales.....	34
Tableau 16 - Essais de caractérisation réalisés sur les matériaux	37
Tableau 17 - Résistance à la compression des bétons.....	46
Tableau 18 - Module élastique des bétons	46
Tableau 19 - Résistance à la traction des bétons	47
Tableau 20 - Résistance à la traction de l'interface cœur-coque dans les parapets hybrides	48
Tableau 21 - Résistance à la traction et module élastique des barres d'armature	49
Tableau 22 - Comportement mécanique des parapets PL-3.....	62

Tableau 23 - Contrainte dans les armatures d’ancrage des parapets PL-3	62
Tableau 24 - Propriétés des bétons composant le parapet de référence MTQ 301	68
Tableau 25 - Propriétés des bétons composant le parapet hybride à niche fermée	69
Tableau 26 - Propriétés des bétons composant le parapet hybride à niche ouverte.....	70
Tableau 27 - Dimension des maillages (en mm) des éléments des parapets à l’étude	73
Tableau 28 - Comparaison des propriétés des bétons	88
Tableau 29 - Variables considérées dans l’analyse économique.....	89
Tableau 30 - Caractéristiques des parapets servant à l’analyse économique (/m linéaire de parapet)	89
Tableau 31 - Coûts de construction et de remplacement des parapets (/m linéaire de parapet).....	90
Tableau 32 - Coûts des parapets sur le cycle de vie d’un pont (/m linéaire de parapet) et le temps de construction (pont de 30 m)	91

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Design standard de parapet PL2/TL4 (MTQ, 2010)	14
Figure 2 - Design standard du parapet type TXDOT T501 (Williams, Butch, & Menges, 2007)	14
Figure 3 - Mode de rupture pour les parapets coulés en place (Williams, Butch, & Menges, 2007)	15
Figure 4 - Ancrage pour la réparation d'un parapet TxDoT501 (Williams, Butch, & Menges, 2007)	16
Figure 5 - Ancrage par post-tension avec barres à 35 degrés (Mitchell & al., 2006).....	17
Figure 6 - Ancrage par post-tension et tirant dans le parapet (Niamba, 2009)	17
Figure 7 - Ancrage par boulons (Lai Yung Ngan, 2008)	19
Figure 8 - Ancrage type béton armé (Duchesneau et al., 2011).....	20
Figure 9 - Montage expérimental (Namy 2012)	21
Figure 10 - Comportement mécanique des dalles avec parapets, parapets préfabriqués de 2 m de longueur (Namy 2012)	21
Figure 11 - Comportement mécanique des dalles avec parapets, parapets préfabriqués de 4 m de longueur (Namy 2012)	22
Figure 12 - Comportement mécanique des dalles avec parapets, parapets préfabriqués de 4 m de longueur avec charge excentrée (Namy 2012)	22
Figure 13 - Points d'application des charges sur un parapet (CSA-S6 2006).....	25
Figure 14 - Loi de comportement en traction des matériaux cimentaires pour la conception, a) comportement pré-pic, b) comportement post-pic	27
Figure 15 - Plan du parapet PL-3 MTQ 301	28
Figure 16 - Courbe force-déplacement par éléments finis du parapet de référence MTQ PL-3 301	28
Figure 17 - Plan du parapet PL-3 hybride à niche fermée.....	30
Figure 18 - Comportement mécanique du parapet PL-3 hybride à niche fermée.....	30
Figure 19 - Plan du parapet PL-3 hybride à niche ouverte.....	32

Figure 20 - Comportement mécanique du parapet PL-3 hybride à niche ouverte.....	32
Figure 21 - Montage expérimental	35
Figure 22 - Position des principaux capteurs sur le parapet	35
Figure 23 - Montage avec les principaux capteurs sur le parapet.....	36
Figure 24 - Essais de traction directe	37
Figure 25 - Coffrage des dalles	38
Figure 26 - Coffrage des dalles avec cage d'armature	39
Figure 27 - Mise en place du béton dans les dalles	39
Figure 28 - Enlèvement d'une mince couche de la dalle pour obtenir une surface en granulats exposés	40
Figure 29 - Coffrage et mise en place du béton dans les parapets MTQ 301	41
Figure 30 - Coffrage du cœur du parapet à niche fermée	41
Figure 31 - Cœur du parapet à niche ouverte avec une surface à granulats exposés	41
Figure 32 - Coffrage et mise en place de la coque des parapets à niche fermée et ouverte.....	42
Figure 33 - Mise en place du coulis et installation des parapets hybrides	43
Figure 34 - Pompage de la niche du parapet à niche fermée.....	43
Figure 35 - Remplissage de la niche du parapet à niche ouverte.....	44
Figure 36 - Comportement en traction directe du BFUP dans les parapets à niche fermée, a) comportement pré-pic, b) comportement post-pic	48
Figure 37 - Comportement en traction directe du BFUP dans les parapets à niche ouverte, a) comportement pré-pic, b) comportement post-pic	48
Figure 38 - Comportement en traction directe des armatures	49
Figure 39 - Évolution de la charge en fonction de la flèche du parapet MTQ 301	50
Figure 40 - Fissures notées sur la dalle du parapet MTQ 301-1	51
Figure 41 - Évolution de la charge en fonction du soulèvement du parapet MTQ 301.....	51

Figure 42 - Évolution de la charge en fonction de la déformation dans les armatures d’ancrage du parapet MTQ 301	52
Figure 43 - Fissuration à l’ultime du parapet MTQ 301 n°2 (vue de côté).....	52
Figure 44 - Fissuration à l’ultime du parapet MTQ 301 n°2 (vue de face)	53
Figure 45 - Évolution de la charge en fonction de la flèche du parapet hybride niche fermée	55
Figure 46 - Évolution de la charge en fonction du soulèvement du parapet hybride niche fermée.....	55
Figure 47 - Évolution de la charge en fonction de la déformation dans les armatures d’ancrage du parapet hybride niche fermée.....	56
Figure 48 - Fissuration à l’ultime du parapet hybride niche fermée n°1 (vue de côté)	56
Figure 49 - Fissuration à l’ultime du parapet niche fermée n°1 (vue de face)	57
Figure 50 - Évolution de la charge en fonction de la flèche du parapet hybride niche ouverte	59
Figure 51 - Évolution de la charge en fonction du soulèvement du parapet hybride niche ouverte	59
Figure 52 - Évolution de la charge en fonction de la déformation dans les armatures d’ancrage du parapet hybride niche fermée.....	60
Figure 53 - Fissuration à l’ultime du parapet hybride niche ouverte n°1 (vue de côté)	60
Figure 54 - Fissuration à l’ultime du parapet hybride niche ouverte n°1 (vue de face)	61
Figure 55 – Exemple d’une loi constitutive en traction définie par l’utilisateur du matériau <i>CC3DNonLinCementitious2User</i> (Cervenka et al., 2012).....	66
Figure 56 - Largeur de bande de fissuration L_f (Cervenka et al., 2012)	66
Figure 57 - Comportement en traction des bétons du parapet de référence MTQ 301	68
Figure 58 - Comportement en traction des bétons du parapet hybride avec niche fermée	69
Figure 59 - Comportement en traction des bétons du parapet hybride à niche ouverte.....	70
Figure 60 - Comportement en traction des aciers d’armature	71
Figure 61 - Géométrie et maillage du parapet de référence MTQ 301	72
Figure 62 - Géométrie et maillage du parapet hybride à niche fermée	72

Figure 63 – Géométrie et maillage du parapet hybride à niche ouverte	73
Figure 64 - Éléments utilisés pour le maillage des modèles de parapets (Cervenka et al., 2012)	73
Figure 65 - Évolution de la charge en fonction de la flèche du parapet MTQ 301	75
Figure 66 - Patrons de fissuration expérimentaux des parapets MTQ 301	76
Figure 67 - Patron de fissuration du modèle numérique du parapet MTQ 301.....	77
Figure 68 - Position des jauges de déformations sur les aciers d’armatures dans le parapet MTQ 301	78
Figure 69 - Contraintes de traction dans les armatures du modèle numérique du parapet MTQ 301	78
Figure 70 - Évolution de la charge en fonction de la flèche du parapet hybride à niche fermée	79
Figure 71 - Évolution de la charge en fonction de la flèche du parapet hybride à niche ouverte	80
Figure 72 - Patron de fissuration expérimental typique du parapet hybride à niche ouverte	81
Figure 73 - Patron de fissuration du modèle numérique du parapet hybride à niche ouverte	82
Figure 74 - Position des jauges de déformations sur les aciers d’armatures dans le parapet hybride à niche ouverte	83
Figure 75 - Contraintes de traction dans les armatures du modèle numérique du parapet hybride à niche ouverte juste avant la chute marquée de la force	84
Figure 76 - Effet de confinement de la niche en BFUP créé par la rainure dans la dalle (F = 531 kN, d = 7.5 mm, déformée x 25)	85
Figure 77 - Réduction de 20% des armatures d’ancrage dans le modèle numérique du parapet hybride à niche ouverte.....	86

1 INTRODUCTION

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, une réhabilitation partielle ou une reconstruction complète peuvent être envisagées à court ou moyen terme. Dans certaines situations, il importe que ces interventions soient réalisées dans 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 performant (BFUP). En comparaison au béton conventionnel, les BFUP présentent des résistances remarquablement élevées, une grande capacité de déformation et une durabilité exceptionnelle. L'un de ces bétons a été mis au point à l'École Polytechnique de Montréal. Le comportement mécanique et déformationnel, de même que la durabilité de ce matériau ont été caractérisés en détail depuis 6 ans (Braïke 2006). De plus, ce BFUP a été utilisé avec succès pour la conception de pré-dalles et de parapets préfabriqués pour les ponts (Lessard et al. 2008, Charron et al. 2011).

Le présent projet a pour but d'étudier la performance du BFUP dans les parapets préfabriqués pour répondre à une problématique concrète du MTQ. Le MTQ s'intéresse actuellement à l'utilisation d'éléments préfabriqués afin d'accélérer la construction des nouveaux ouvrages et la réparation des ouvrages existants. L'utilisation de parapets coulés en place allonge le temps de construction et conduit parfois à une fissuration précoce pouvant être pénalisante pour la durabilité des parapets. Le projet consistera à comparer la performance mécanique de parapets préfabriqués à celle de parapets coulés en place, et à incorporer du BFUP aux parapets préfabriqués pour supprimer une partie de leurs armatures et prolonger leur durabilité.

1.1 OBJECTIFS

Le projet de recherche impliquant l'École Polytechnique de Montréal et le Ministère des Transports comporte quatre objectifs :

- Concevoir un parapet préfabriqué hybride de type PL-3 incorporant du BFUP;
- Étudier numériquement la distribution des efforts entre les parapets et la dalle de pont lors d'un impact;
- Évaluer expérimentalement le comportement mécanique des parapets préfabriqués développés et du parapet coulé en place;
- Comparer la performance des parapets préfabriqués et du parapet coulé en place.

1.2 MÉTHODOLOGIE

Ce projet de recherche consiste d'abord à optimiser, à l'aide d'un logiciel par éléments finis, le dimensionnement de parapets préfabriqués PL-3 incorporant du BFUP. L'utilisation d'un parapet hybride, comprenant un noyau en béton à haute performance et une coque mince en BFUP, est étudiée pour ce projet. La distribution des efforts dans les parapets et la dalle de pont est évaluée numériquement pour déterminer les détails de connexion des parapets et les détails de renforcement de la dalle. Ensuite, le comportement mécanique des parapets préfabriqués développés dans le projet et du parapet coulé en place est déterminé à l'aide d'essais au Laboratoire de Structures de l'École Polytechnique. Enfin, une validation des modèles numériques est complétée en comparant les résultats expérimentaux et numériques.

Un premier rapport a été soumis au MTQ en mars 2011, il détaille les normes de conception utilisées pour les parapets de pont et présente une revue sur la conception de parapets préfabriqués. Un deuxième rapport soumis au MTQ en février 2012 décrit les travaux préliminaires de conception des parapets préfabriqués hybrides PL-3. Un troisième rapport soumis en mars 2013 présente le dimensionnement final des parapets hybrides PL-3 et leur comportement mécanique obtenu en laboratoire. Le présent document constitue le rapport final soumis au MTQ en mai 2013. Il reprend les principales informations des rapports précédents et les complète avec la validation des modèles numériques à l'aide des résultats expérimentaux et une étude économique sommaire.

1.3 ORGANISATION DU RAPPORT

Suite au **Chapitre 1** introduisant les objectifs du projet de recherche et la méthodologie adoptée, le **Chapitre 2** présente la revue de la documentation sur les normes de conception s'appliquant aux parapets et sur les parapets préfabriqués développés récemment. Le **Chapitre 3** détaille le dimensionnement des parapets hybrides. Le **Chapitre 4** décrit le programme expérimental réalisé pour le projet. Le **Chapitre 5** résume les résultats expérimentaux obtenus lors de l'application d'un chargement quasi-statique sur les parapets. Le **Chapitre 6** présente les modélisations numériques réalisées pour reproduire les résultats expérimentaux. Le **Chapitre 7** détaille une étude économique sur l'utilisation de parapets hybrides. Enfin, le **Chapitre 8** présente la conclusion générale et la recommandation du rapport.

2 REVUE DE LA DOCUMENTATION SUR LES PARAPETS PRÉFABRIQUÉS

Au cours des années, de nombreuses normes ont été élaborées pour baliser la conception des parapets qui assurent la sécurité des utilisateurs de la route. Ces normes s'intéressent à plusieurs aspects de la conception, entre autre la capacité à rediriger les véhicules, les essais d'impact (crash test) et la résistance structurale des parapets. Dans le cadre de cette revue de la documentation, l'évolution de la norme américaine sera étudiée en plus des normes canadiennes et québécoises actuellement en vigueur. L'emphase sera mise sur la résistance des parapets à l'impact de véhicules légers (voitures et camionnettes).

La résistance des parapets étant grandement liée à la résistance de leur ancrage, ce détail de construction est très important. Avec l'arrivée récente de parapets préfabriqués permanents pour les ponts, des nouvelles techniques d'ancrage des parapets à la dalle de pont ont été proposées. Une revue des techniques d'ancrage pour les parapets coulés en place, puis pour les parapets préfabriqués sera également effectuée.

La revue de la documentation est en partie extraite des travaux de recherche de Duchesneau (2011).

2.1 NORMES DE CONCEPTION DES PARAPETS

2.1.1 Guide specification for bridge railings

Le Guide de spécification AASHTO (1989) pour les parapets a été publié en 1989 comme alternative au chapitre sur les parapets de la 14^e Édition du *AASHTO Standard Specifications for Highway Bridge* (1988). Deux nouveautés majeures sont incluses dans ce rapport, soit l'apparition d'un système de classification des parapets en fonction du site (types de véhicules, débit journalier, etc.) et l'exigence que les systèmes de retenue subissent des essais d'impact pour confirmer leur comportement structural.

2.1.1.1 Classification des parapets

Dans AASHTO (1989), les parapets sont classés en trois niveaux de performance (PL-1 à PL-3). La sélection du niveau de performance est effectuée à partir d'une liste de tableaux, comme le **Tableau 1**, qui regroupe plusieurs critères, soit la vitesse de conception de la route, le pourcentage de camions lourds circulant sur la route et le type d'autoroute. La valeur du débit journalier moyen (*Average daily traffic* - ADT) est déterminée par l'**Équation 1** avec K_c un coefficient de courbure, K_g un coefficient de pente et K_s un coefficient de hauteur du tablier. Dans tous les cas, la sélection du niveau de performance à l'aide de tableaux est limitée aux ponts avec un débit journalier de moins de 10 000 véhicules par voie de circulation.

$$\text{Adjusted ADT} = K_C K_g K_S * (\text{estimated construction year ADT})$$

Équation 1

Tableau 1 - Sélection du niveau de performance (AASHTO, 1989)

Site Characteristics			Adjusted ADT Ranges for Bridge Railing Performance Levels (10 ³ vpd)								
			Highway Type								
DESIGN SPEED (mph)	PERCENT TRUCKS	BRIDGE RAIL OFFSET (ft)	Divided (or Undivided with 5 or more Lanes)			Undivided with 4 Lanes or Less			One Way		
			PERFORMANCE LEVEL PL-1	PL-2	PL-3	PERFORMANCE LEVEL PL-1	PL-2	PL-3	PERFORMANCE LEVEL PL-1	PL-2	PL-3
30	0	0-3	0 to 151.0	to	∞	0 to 144.3	to	∞	0 to 75.5	to	∞
30	0	3-7	0 to 283.2	to	∞	0 to 265.2	to	∞	0 to 141.6	to	∞
30	0	7-12	0 to ∞			0 to ∞			0 to 316.1	to	∞
30	0	>12	0 to ∞			0 to ∞			0 to ∞		
30	5	0-3	0 to 56.6	to	∞	0 to 48.0	to	∞	0 to 28.3	to	357.1 to ∞
30	5	3-7	0 to 90.4	to	∞	0 to 74.6	to	∞	0 to 45.2	to	∞
30	5	7-12	0 to 148.3	to	∞	0 to 128.9	to	∞	0 to 74.2	to	∞
30	5	>12	0 to 316.0	to	∞	0 to 277.9	to	∞	0 to 158.0	to	∞
30	10	0-3	0 to 23.9	to	179.8 to ∞	0 to 19.3	to	147.9 to ∞	0 to 12.0	to	89.9 to ∞
30	10	3-7	0 to 36.5	to	258.3 to ∞	0 to 28.8	to	228.7 to ∞	0 to 18.3	to	129.2 to ∞
30	10	7-12	0 to 55.9	to	404.4 to ∞	0 to 46.5	to	364.6 to ∞	0 to 28.0	to	202.2 to ∞
30	10	>12	0 to 100.7	to	∞	0 to 84.6	to	∞	0 to 50.4	to	417.1 to ∞
30	15	0-3	0 to 15.1	to	102.9 to ∞	0 to 12.1	to	84.5 to ∞	0 to 7.6	to	51.5 to ∞
30	15	3-7	0 to 22.8	to	146.6 to ∞	0 to 17.9	to	129.2 to ∞	0 to 11.4	to	73.3 to ∞
30	15	7-12	0 to 34.4	to	228.5 to ∞	0 to 28.3	to	205.3 to ∞	0 to 17.2	to	114.3 to ∞
30	15	>12	0 to 59.9	to	472.0 to ∞	0 to 49.9	to	466.5 to ∞	0 to 30.0	to	236.0 to ∞
30	20	0-3	0 to 11.1	to	72.0 to ∞	0 to 8.8	to	59.1 to ∞	0 to 5.6	to	36.0 to ∞
30	20	3-7	0 to 16.6	to	102.4 to ∞	0 to 13.0	to	90.0 to ∞	0 to 8.3	to	51.2 to ∞
30	20	7-12	0 to 24.9	to	159.2 to ∞	0 to 20.4	to	142.9 to ∞	0 to 12.5	to	79.6 to ∞
30	20	>12	0 to 42.6	to	329.1 to ∞	0 to 35.4	to	325.2 to ∞	0 to 21.3	to	164.6 to ∞
30	25	0-3	0 to 8.7	to	55.4 to ∞	0 to 6.9	to	45.4 to ∞	0 to 4.4	to	27.7 to ∞
30	25	3-7	0 to 13.1	to	78.6 to ∞	0 to 10.2	to	69.1 to ∞	0 to 6.6	to	39.3 to ∞
30	25	7-12	0 to 19.5	to	122.2 to ∞	0 to 15.9	to	109.6 to ∞	0 to 9.8	to	61.1 to ∞
30	25	>12	0 to 33.1	to	252.6 to ∞	0 to 27.4	to	249.6 to ∞	0 to 16.6	to	126.3 to ∞
30	30	0-3	0 to 7.2	to	45.0 to ∞	0 to 5.7	to	36.9 to ∞	0 to 3.6	to	22.5 to ∞
30	30	3-7	0 to 10.8	to	63.8 to ∞	0 to 8.4	to	56.1 to ∞	0 to 5.4	to	31.9 to ∞
30	30	7-12	0 to 16.0	to	99.1 to ∞	0 to 13.1	to	88.8 to ∞	0 to 8.0	to	49.6 to ∞
30	30	>12	0 to 27.0	to	205.0 to ∞	0 to 22.4	to	202.5 to ∞	0 to 13.5	to	102.5 to ∞
30	35	0-3	0 to 6.1	to	37.9 to ∞	0 to 4.8	to	31.1 to ∞	0 to 3.1	to	19.0 to ∞
30	35	3-7	0 to 9.2	to	53.7 to ∞	0 to 7.1	to	47.2 to ∞	0 to 4.6	to	26.9 to ∞
30	35	7-12	0 to 13.6	to	83.4 to ∞	0 to 11.1	to	74.7 to ∞	0 to 6.8	to	41.7 to ∞
30	35	>12	0 to 22.8	to	172.5 to ∞	0 to 18.9	to	170.4 to ∞	0 to 11.4	to	86.3 to ∞
30	40	0-3	0 to 5.3	to	32.8 to ∞	0 to 4.2	to	26.8 to ∞	0 to 2.7	to	16.4 to ∞
30	40	3-7	0 to 8.0	to	46.4 to ∞	0 to 6.2	to	40.7 to ∞	0 to 4.0	to	23.2 to ∞
30	40	7-12	0 to 11.8	to	72.0 to ∞	0 to 9.6	to	64.5 to ∞	0 to 5.9	to	36.0 to ∞
30	40	>12	0 to 19.8	to	148.9 to ∞	0 to 16.3	to	147.1 to ∞	0 to 9.9	to	74.5 to ∞

See Notes at the end of the Table.

2.1.1.2 Essais d'impact

Les essais d'impact ont pour but d'évaluer le comportement structural des parapets. Les aspects considérés sont la pénétration du véhicule dans le parapet, la présence de débris suite à l'impact, l'intégrité de l'habitacle des véhicules, la possibilité de renversement du véhicule et la capacité de redirection du véhicule par le parapet. De plus, la vitesse d'impact des passagers contre l'habitacle du véhicule et leur accélération dans les 10 millisecondes suivant le choc doivent être limitées aux valeurs du [Tableau 2](#).

Tableau 2 - Vitesse et accélération des passagers suite à l'impact

Direction	Vitesse (m/s)	Accélération (g)
Longitudinal	9.09	15
Latéral	7.57	15

En fonction du niveau de performance du parapet évalué, il est possible de déterminer quel véhicule doit être utilisé et dans quelles conditions doivent s'effectuer les essais d'impact. Le **Tableau 3** indique les propriétés des véhicules (masse, hauteur du centre de masse, etc.), les vitesses et l'angle d'impact à utiliser lors des essais pour les niveaux de performance PL-1 à PL-3. Par exemple, pour un parapet de type PL-2, il est nécessaire de faire un test d'impact avec une petite voiture et une camionnette de masses respectives de 816 kg et 2248 kg à une vitesse de 96 km/h et un angle de 20 degrés. Pour un niveau PL-3, il est également nécessaire d'effectuer un essai d'impact avec un camion d'une masse de 8160 kg avec un angle de 15 degrés et une vitesse de 80 km/h. Les essais d'impact doivent être effectués selon les recommandations données dans le *National Cooperative Highway Research Program Report 230* (année). Les critères sont résumés au **Tableau 3**.

Tableau 3 - Critères pour les essais d'impact en fonction du niveau de performance (AASHTO, 1989)

SPECIFICATIONS						3
TABLE G2.7.1.3A Bridge Railing Performance Levels and Crash Test Criteria						
TEST SPEEDS—mph ^{1,2}						
TEST VEHICLE DESCRIPTIONS AND IMPACT ANGLES						
PERFORMANCE LEVELS		Small Automobile	Pickup Truck	Medium Single-Unit Truck	Van-Type Tractor-Trailer ⁴	
		W = 1.8 Kips A = 5.4' ± 0.1' B = 5.5' H _{cg} = 20" ± 1" θ = 20 deg.	W = 5.4 Kips A = 8.5' ± 0.1' B = 6.5' H _{cg} = 27" ± 1" θ = 20 deg.	W = 18.0 Kips A = 12.8' ± 0.2' B = 7.5' H _{cg} = 49" ± 1" θ = 15 deg.	W = 50.0 Kips A = 12.5' ± 0.5' B = 8.0' H _{cg} = See Note 4 R = 0.61 ± 0.01 θ = 15 deg.	
PL-1		50	45			
PL-2		60	60	50		
PL-3		60	60		50	
CRASH TEST EVALUATION CRITERIA ³	Required	a, b, c, d, g	a, b, c, d	a, b, c	a, b, c	
	Desirable ⁵	e, f, h	e, f, g, h	d, e, f, h	d, e, f, h	

2.1.1.3 Conception des parapets

Le Guide de conception de l'AASHTO (1989) inclut une annexe sur la conception de parapets en considérant des charges statiques. Les charges et leur surface d'application sont indiquées au **Tableau 4**.

Tableau 4 - Charges de conception pour les parapets (AASHTO, 1989)

Force et position	PL-1	PL-2	PL-3	PL-4 opt.	PL-4 opt. T
Chargement appliqué au parapet					
$F_{\text{transversale}}$ (kN)	133	356	623	890	890
$F_{\text{longitudianale}}$ (kN)	+/-40	+/-107	+/-187	+/-267	+/-267
$F_{\text{vertical,bas}}$ (kN)	53	67	80	80	80
$F_{\text{vertical,haut}}$ (kN)	-18	-22	-27	-27	-27
Surface et hauteur d'application de la charge					
Longueur (mm)	610	720	830	940	940
Largeur (mm)	305	360	415	470	470
Hauteur (mm)	410	430	460	480	480

Le **Tableau 5** présente les charges maximales d'essais d'impact obtenues pour des véhicules ayant à la fois un poids, un angle d'incidence et une vitesse similaire aux valeurs indiquées au **Tableau 4** pour le niveau de performance de parapet PL-2. La valeur maximale d'impact est de 234 kN pour la camionnette. Tel que prescrit dans AASHTO (2007), la charge de conception statique de 356 kN d'un parapet PL-2 (**Tableau 4**) inclut l'amplification dynamique des contraintes de 1.4. Il est donc possible de comparer la charge de conception statique de l'AASHTO et les charges dynamiques mesurées lors d'impact. La comparaison des valeurs indique que les impacts de petites voitures représentent 40% de la charge de conception, tandis que l'impact d'une camionnette correspond à 65% de la charge de conception. Les charges de conception de l'AASHTO 1989 sont donc très conservatrices.

Tableau 5 - Résultats des essais d'impact pour le niveau PL2 (Jian & al., 2004)

Véhicule	Poids (kg)	Vitesse (km/h)	Charge (kN)	% $F_{\text{conception}}^1$
Honda Civic 1981	892	97.3	139	39%
Honda Civic 1979	871	98.6	143	40%
Honda Civic 1980	817	97.7	133	37%
Honda Civic 1980	893	96.7	130	36%
Chevrolet Pickup 1981	2599	92.8	234	66 %

¹ : Charge divisée par la charge statique de conception du parapet PL-2 de 356 kN qui inclut le coefficient d'amplification dynamique des contraintes (**Tableau 4**)

2.1.2 NCHRP report 350 et AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2007

La norme actuellement en vigueur aux États-Unis est la *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 14th Edition 2007* (AASHTO, 2007). Cette norme est basée en grande partie sur les travaux du *National Cooperative Highway Research Program NCHRP report 350* (NCHRP, 1993). La norme AASHTO (2007) reprend l'essentiel des recommandations et du système de classification des parapets retenu dans NCHRP (1993). Les principaux changements entre les normes AASHTO 1989 et AASHTO 2007 sont la procédure d'essais d'impact, la classification des parapets et les charges statiques de conception.

2.1.2.1 Classification des parapets

Alors que dans la norme AASHTO de 1989, un guide était suggéré pour déterminer le niveau de performance pour un ouvrage (*performance level*, PL-x), l'approche préconisée dans l'édition 2007 est différente et basée sur le NCHRP (1993). Au lieu de catégoriser les parapets en fonction du niveau de performance souhaité, les parapets sont catégorisés en fonction du type de véhicules auxquels ils devront résister (*test level*, TL-x). Le responsable de l'ouvrage devra ensuite déterminer à l'aide des données disponibles sur la route quels sont les véhicules susceptibles d'entrer en collision avec les parapets et à quelle vitesse.

L'équivalence entre les niveaux de performance (PL-x) et les niveaux d'essais (TL-x) n'est pas explicitée dans l'AASHTO 2007 ou dans le NCHRP (1993). Cependant, il est possible de trouver une correspondance entre les deux systèmes de classification en consultant les guides de conception des états américains (**Tableau 6**).

Tableau 6 - Équivalence entre les niveaux de performance et les essais (State of Louisiana, 2006)

Normes		Équivalence				
NCHRP report 350 et AASHTO 2007	TL-1	TL-2	TL-3	TL-4	TL-5	TL-6
AASHTO 1989	-	PL-1	-	PL-2	PL-3	-

2.1.2.2 Essais d'impact

Le NCHRP (1993) a standardisé trois types de véhicules légers ainsi que 3 types de camions avec différentes configurations de remorque. Le **Tableau 7** présente les propriétés des différents véhicules légers standardisés. La masse des véhicules dans le NCHRP (1993) a changé comparativement à AASHTO 1989. Premièrement, pour la catégorie des petites voitures, un second véhicule d'une masse de 700 kg (700 C), a été ajouté. Par contre, le second véhicule de la catégorie des petites voitures, le véhicule de type 820 C, reprend les caractéristiques de la petite voiture de l'AASHTO 1989. Deuxième changement caractéristique des véhicules, la masse pour la camionnette a été diminuée de 23 % pour atteindre 2000 kg.

Ces diminutions de poids ont été effectuées pour refléter l'évolution du parc automobile américain. En effet, la plupart des essais d'impact effectués pour l'édition 1989 de l'AASHTO 1989 ont été réalisés avant 1980, alors que la masse moyenne des véhicules était plus élevée qu'en 1990. Par exemple, le poids moyen du parc automobile a diminué de près de 20 % entre 1970 et 1990 (National Highway Traffic Safety Administration, 2010).

Tableau 7 - Propriété des véhicules légers pour les essais d'impact (NCHRP (1993))

Property	700C (Small Car)	820C (Small Car)	2000P (Pickup Truck)
MASS (kg)			
Test Inertial	700 ± 25	820 ± 25	2000 ± 45
Dummy	75	75	---
Max. Ballast	70	80	200
Gross Static	775 ± 25	895 ± 25	2000 ± 45
DIMENSIONS (cm)			
Wheelbase	230 ± 10	230 ± 10	335 ± 25
Front Overhang	75 ± 10	75 ± 10	80 ± 10
Overall Length	370 ± 20	370 ± 20	535 ± 25
Track Width ^b	135 ± 10	135 ± 10	165 ± 15
CENTER OF MASS LOCATION^a (cm)			
Aft of Front Axle	80 ± 15	80 ± 15	140 ± 15
Above Ground	55 ± 5	55 ± 5	70 ± 5
LOCATION OF ENGINE	Front	Front	Front
LOCATION OF DRIVE AXLE	Front	Front	Rear
TYPE OF TRANSMISSION	Manual or Automatic	Manual or Automatic	Manual or Automatic

^a For "test inertial" mass

^b Average of front and rear axles

Selon la catégorie du parapet considéré, un groupe d'essais d'impact doit être effectué avec différents types de véhicules, vitesses d'impact et angles d'incidence. Les exigences du NCHRP 1993 et adopté dans l'AASHTO 2007 sont résumées au [Tableau 7](#). Outre la variation dans le poids et le type de véhicule, mentionné préalablement, la vitesse d'impact de certains véhicules est légèrement plus grande (100 km/h comparativement à 97.6 km/h). Cela est principalement dû à l'adoption du système d'unités international. Enfin, pour un parapet de niveau TL-4, l'angle d'impact pour les petites voitures n'est pas modifié comparativement au PL-2. Par contre, l'angle d'impact pour une camionnette passe de 20 à 25 degrés.

Tableau 8 - Niveau d'essais d'impact pour les parapets (AASHTO 2007)

Vehicle Characteristics	Small Automobiles		Pickup Truck	Single-Unit Van Truck	Van-Type Tractor-Trailer		Tractor-Tanker Trailer
	W (N)	7000	8000	20 000	80 000	220 000	355 000
B (mm)	1700	1700	2000	2300	2450	2450	2450
G (mm)	550	550	700	1250	1630	1850	2050
Crash angle, θ	20°	20°	25°	15°	15°	15°	15°
Test Level	Test Speeds (km/h)						
TL-1	50	50	50	N/A	N/A	N/A	N/A
TL-2	70	70	70	N/A	N/A	N/A	N/A
TL-3	100	100	100	N/A	N/A	N/A	N/A
TL-4	100	100	100	80	N/A	N/A	N/A
TL-5	100	100	100	N/A	N/A	80	N/A
TL-6	100	100	100	N/A	N/A	N/A	80

2.1.2.3 Conception des parapets

L'Édition 2007 de l'AASHTO recommande, comme l'édition 1989, des charges de conception ainsi que des dimensions minimales pour les parapets (Tableau 9). En utilisant les correspondances de catégories de parapets détaillées au Tableau 6, on remarque que la force transversale de conception pour un niveau PL-2/TL-4 est réduite de 356 kN à 240 kN et que la force longitudinale diminue de 107 kN à 80 kN. La valeur de 240 kN est presque identique à la charge maximale d'essais d'impact rapportée au Tableau 5 pour une camionnette. Par contre, cet essai d'impact a été réalisé avec un angle de 20.6 degrés, tel que spécifié au niveau PL-2. L'impact de cette camionnette de 2076 kg avec un angle de 25.5 degrés tel que spécifié pour le niveau TL-4 donne plutôt une charge dynamique de 307.2 kN (Jian & al., 2004).

Tableau 9 - Charges de conception pour les parapets (AASHTO, 2007)

Design Forces and Designations	Railing Test Levels					
	TL-1	TL-2	TL-3	TL-4	TL-5	TL-6
F_t Transverse (N)	60 000	120 000	240 000	240 000	550 000	780 000
F_l Longitudinal (N)	20 000	40 000	80 000	80 000	183 000	260 000
F_v Vertical (N) Down	20 000	20 000	20 000	80 000	355 000	355 000
L_t and L_l (mm)	1220	1220	1220	1070	2440	2440
L_v (mm)	5500	5500	5500	5500	12 200	12 200
H_c (min) (mm)	460	510	610	810	1070	1420
Minimum H_c Height of Rail (mm)	685	685	685	810	1070	2290

Il est évident que les concepteurs de la norme AASHTO 2007 ne se sont pas uniquement basés sur un seul essai d'impact pour déterminer la charge de conception. Il reste qu'en l'absence des données brutes utilisées pour développer les critères de conception de chaque catégorie de parapet, il est difficile d'évaluer la justesse des charges de conception proposées. Par contre, la documentation ne rapporte

pas d'incident avec les charges de conception proposées. Il importe de mentionner que les charges de conception exigées en 2007 semblent comporter un facteur de sécurité moins élevé que les charges recommandées en 1989 quand elles sont comparées avec les résultats rapportés dans Jian et al. (2004).

2.1.3 Norme Canadienne CSA/CAN S6-06 (2006) et québécoise (MTQ, 2010)

La norme Canadienne CSA-S6 (2006) qui règlemente la construction des ponts au Canada inclut un chapitre sur la conception des parapets. Ce chapitre est basé principalement sur l'édition 1989 de la norme AASHTO, tout en faisant référence aux normes AASHTO plus récentes. Les recommandations pour les parapets mis en place au Québec sont regroupées dans le guide de conception des ouvrages d'art (MTQ, 2010). Ce guide réfère à la norme CSA-S6 (2006) et propose des plans de parapets standardisés. Comparativement aux autres normes, le guide de conception du MTQ exige une continuité du dispositif de retenue. Cette recommandation limite donc l'utilisation de parapets préfabriqués en section sans système de connexion latérale.

2.1.3.1 Classification des parapets

La classification utilisée dans la norme canadienne est basée sur l'édition 1989 de la norme AASHTO. Les niveaux de performance PL-1 à PL-3 sont repris dans la norme canadienne tout comme la méthode de sélection du niveau de performance. L'Équation 1 est réutilisée dans la norme canadienne sous la forme de l'Équation 2.

$$B_e = \frac{(DJMA_1)K_hK_cK_gK_s}{1000} \quad \text{Équation 2}$$

Dans cette équation, $DJMA$ représente le débit journalier moyen l'année suivant l'ouverture de l'ouvrage, K_h est un coefficient relatif au type de route, K_c un coefficient de courbure, K_g un coefficient de pente et K_s un coefficient de hauteur du tablier. Tout comme dans l'AASHTO 1989, le débit journalier moyen est limité à 10 000 véhicules par voie de circulation. Une fois le coefficient d'exposition calculé, le concepteur se réfère à trois tableaux de classification produits pour trois hauteurs de dégagement différentes. Chaque tableau met en relation la vitesse de conception, le pourcentage de véhicules lourds et le degré d'exposition du parapet. Le **Tableau 10** donne un exemple d'un tableau de sélection du niveau de performance dans CSA-S6 (2006).

Tout en utilisant les niveaux de performance PL-1 à PL-3, la norme canadienne reconnaît l'équivalence avec la classification du type TL-1 à TL-6 du NCHRP (1993), adoptée dans l'AASHTO 2007 et présentée au **Tableau 6**.

Tableau 10 - Sélection du niveau de performance (article 12.4.3.2.4 CSA-S6 2006)

Vitesse de conception, km/h	Véhicules lourds, %	Indice d'exposition du dispositif de retenue		
		PL-1	PL-2	PL-3
50	0	—	—	—
	5	< 121,5	≥ 121,5	—
	10	< 48,2	48,2 à 350,1	> 350,1
	15	< 30,3	30,3 à 198,8	> 198,8
	20	< 22,2	22,2 à 138,8	> 138,8
	25	< 17,5	17,5 à 106,6	> 106,6
	40	< 10,7	10,7 à 62,9	> 62,9
60	0	< 76,6	≥ 76,6	—
	5	< 39,5	≥ 39,5	—
	10	< 22,6	22,6 à 171,3	> 171,3
	15	< 16,3	16,3 à 99,7	> 99,7
	20	< 12,7	12,7 à 70,3	> 70,3
	25	< 10,6	10,6 à 54,2	> 54,2
	40	< 6,9	6,9 à 32,3	> 32,3
80	0	< 9,9	≥ 9,9	—
	5	< 8,4	8,4 à 247,3	> 247,3
	10	< 7,2	7,2 à 70,6	> 70,6
	15	< 6,3	6,3 à 41,2	> 41,2
	20	< 5,6	5,6 à 29,1	> 29,1
	25	< 5,0	5,0 à 22,5	> 22,5
	40	< 3,8	3,8 à 13,4	> 13,4
100	0	< 3,6	≥ 3,6	—
	5	< 3,5	3,5 à 140,4	> 140,4
	10	< 3,4	3,4 à 49,8	> 49,8
	15	< 3,3	3,3 à 30,3	> 30,3
	20	< 3,2	3,2 à 21,8	> 21,8
	25	< 3,0	3,0 à 16,9	> 16,9
	40	< 2,7	2,7 à 10,2	> 10,2
110	0	< 2,8	≥ 2,8	—
	5	< 2,7	2,7 à 102,7	> 102,7
	10	< 2,7	2,7 à 43,2	> 43,2
	15	< 2,6	2,6 à 27,4	> 27,4
	20	< 2,6	2,6 à 20,1	> 20,1
	25	< 2,5	2,5 à 15,8	> 15,8
	40	< 2,4	2,4 à 9,6	> 9,6

2.1.3.2 Essais d'impact

La norme canadienne demande que tous nouveaux types de parapets soient soumis à des essais d'impact. Les essais d'impact exigés sont identiques à ceux recommandés par l'édition 1989 de l'AASHTO. Les essais d'impact effectués selon le NCHRP (1993) sont également acceptés, en suivant les équivalences spécifiées au [Tableau 6](#).

2.1.3.3 Conception des parapets

Alors que la norme canadienne utilise essentiellement l'AASHTO 1989 pour la classification des parapets et les essais d'impact, les charges de conception proposées sont plutôt équivalentes à celles de la norme AASHTO 2007. En effet, la charge longitudinale statique prescrite dans le code canadien pour un parapet

PL-3 est de 210 kN (**Tableau 11**) alors que la charge statique dans l'AASHTO 1989 est de 623 kN. Par contre, comparativement aux charges données dans les normes américaines, la charge transversale donnée dans la norme canadienne n'inclut aucun facteur de pondération ou de coefficient d'amplification dynamique des contraintes. Le **Tableau 11** indique les charges de conception non-pondérées prescrites par la norme canadienne.

Tableau 11 - Charges sur les dispositifs de retenue (article 3.8.8.1 CSA-S6 2006)

Niveau de performance	Charge transversale, kN	Charge longitudinale, kN	Charge verticale, kN
PL-1	50	20	10
PL-2	100	30	30
PL-3	210	70	90

Pour obtenir les charges de conception pondérées pour une conception à l'état limite ultime, il est nécessaire d'appliquer les facteurs de pondération des charges et de tenue des matériaux. Premièrement, les charges de conception sont multipliées par le coefficient de pondération pour les charges vives de 1.7 de CSA-S6 (2006). Deuxièmement, on applique le facteur de tenue des matériaux, égal à 0.75, soit le coefficient de tenue du béton dans CSA-S6 (2006). Le coefficient de tenue du béton est choisi étant donné que la rupture des parapets se produit dans ce matériau. Pour la charge transversale d'un parapet PL-3, on obtient une charge transversale statique de dimensionnement de 357 kN. Le **Tableau 12** résume les charges de conception statiques (pondérées, non-pondérées) de CSA-S6 et les charges dynamiques (pondérées) de AASHTO 2007.

Tableau 12 - Charges de conception statiques et dynamiques pour les parapets PL-3

Type de charge	Statique ¹		Dynamique ²
	Non-Pondéré (kN)	Pondéré (kN)	Pondéré (kN)
Transversale	210	357	550
Longitudinale	70	119	183
Verticale	90	153	355

¹ CSA-S6-06, ² AASHTO 2007

La différence entre les valeurs de conception transversale de CSA et AASHTO, s'explique par le fait que dans la norme canadienne, la résistance statique des ouvrages est utilisée, alors que la résistance dynamique est utilisée dans AASHTO (2007). Il est reconnu que la résistance dynamique des matériaux est d'environ 40 % supérieure à la résistance statique. En majorant par 40 % la charge statique de 357 kN, soit la charge statique de CSA-S6 incluant le facteur de pondération pour les charges vives, une

valeur de conception de 500 kN équivalente en résistance dynamique est obtenue. Cette valeur de 500 kN est très similaire à la valeur de 550 kN prescrite par l'AASHTO 2007.

2.2 ANCRAGE DES PARAPETS

Un ancrage de qualité est primordial pour assurer un bon comportement structural des parapets à l'impact d'un véhicule. L'ancrage permet de transférer la charge du parapet vers la dalle. Les différents codes de conception étudiés (AASHTO, 1989; AASHTO, 2007; CSA-S6, 2006) recommandent que seul le parapet soit endommagé lors d'un impact. Comme la maintenance et la réhabilitation de la dalle sont beaucoup plus complexes que le remplacement d'un élément de parapet, la dalle et l'ancrage doivent donc être conçus pour résister aux efforts de traction et de flexion induits par l'impact d'un véhicule. Une revue de la documentation des différents types d'ancrages pour les parapets coulés en place et pour les parapets préfabriqués est présentée dans les sections suivantes.

2.2.1 Parapets coulés en place

La méthode traditionnelle de construction de parapets consiste à couler les parapets en chantier après avoir installé les coffrages. Un très grand nombre de détails d'armatures pour l'ancrage peut être sélectionné en fonction de la géométrie du parapet, de l'épaisseur de la dalle et des besoins en termes de résistance. De plus, le type d'ancrage choisi pour un parapet coulé en place variera pour une nouvelle construction ou le remplacement de parapet existant.

2.2.1.1 Nouvelle construction

Lorsque les parapets sont coulés en place durant la construction d'un nouveau pont, l'ancrage est assuré par une série d'armatures positionnées à intervalles réguliers. Au Québec, l'ancrage entre le parapet et la dalle est assuré par la prolongation des cadres du parapet dans la dalle (**Figure 1**). Les armatures N°15, espacées de 200 mm, sont prolongées jusqu'au rang inférieur d'armature de la dalle. Un système différent est proposé dans les plans normalisés de la norme CSA-S6 (2006) et par le département des transports du Texas (Williams et al., 2007), le système est illustré à la **Figure 2**. L'ancrage proposé utilise une barre d'armature uniquement dédiée à l'ancrage du parapet. Dans le cas du détail d'armature texan, une barre d'ancrage en forme de « U » est installée lors de la coulée de la dalle au niveau du rang inférieur d'armature. Cette barre d'armature remonte jusqu'à 250 mm au-dessus du niveau de la dalle.

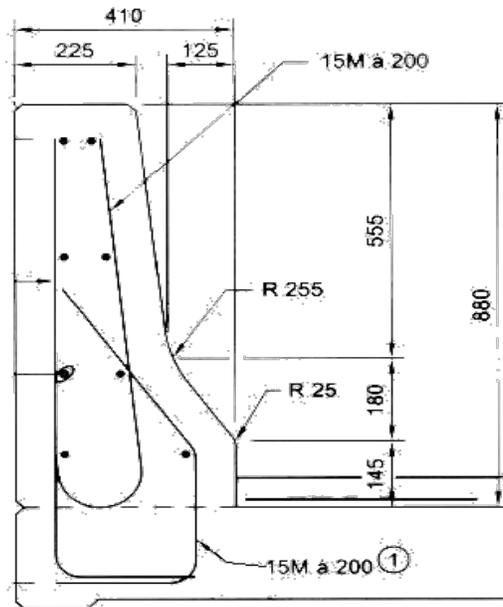


Figure 1 - Design standard de parapet PL2/TL4 (MTQ, 2010)

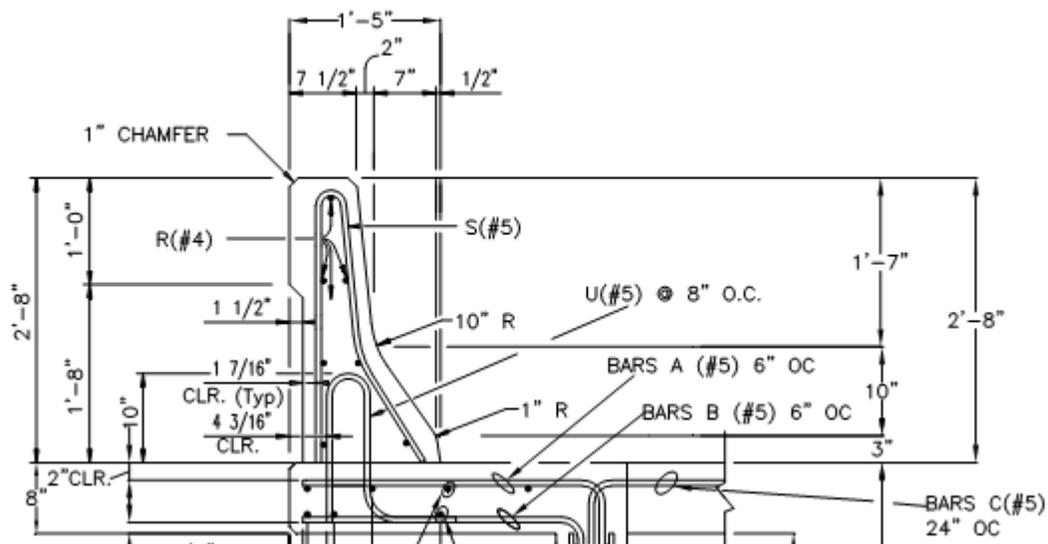


Figure 2 - Design standard du parapet type TXDOT T501 (Williams, Butch, & Menges, 2007)

Les deux détails d'armatures présentés répondent aux exigences des parapets PL-2/TL-4. Dans le cas de parapets continus, le mode de rupture en poinçonnement attendu est présenté à la [Figure 3](#). Étant donné la longueur de l'ancrage participant à la résistance du parapet, la rupture ne devrait pas se produire dans l'ancrage, mais plutôt dans la zone d'impact.



Figure 3 - Mode de rupture pour les parapets coulés en place (Williams, Butch, & Menges, 2007)

Le principal désavantage de la technique d'ancrage des parapets coulés en place est l'apparition fréquente d'une fissuration précoce dans les jours suivant la coulée du béton. En effet, la contraction du béton dû au retrait endogène et de séchage est empêchée par la rigidité de l'armature et de la dalle de pont. Des contraintes de traction sont alors engendrées par le retrait partiellement restreint du béton. Les contraintes de traction causées par le retrait restreint sont en général supérieures à la résistance du béton en traction au jeune âge, il en résulte alors l'apparition de fissures verticales. Cette fissuration précoce entraîne une diminution de la durabilité des parapets en permettant la pénétration de l'eau et des sels déglaçants qui favorisent à leur tour la corrosion des armatures et amplifient l'effet des cycles gel-dégel (Cusson & Repette, 2000; Haluk & Attanayaka, 2004).

2.2.1.2 Réparation

Dans le cas de la réparation d'un parapet suite à un impact ou une dégradation environnementale, un système d'ancrage avec une série de goujons peut être utilisé (**Figure 4**). Les goujons sont ancrés à la dalle à l'aide d'un coulis à base d'époxy. La profondeur d'ancrage recommandée dans la dalle varie selon le design retenu. Une fois l'ancrage terminé, les coffrages sont installés et le nouveau parapet peut-être coulé en chantier.

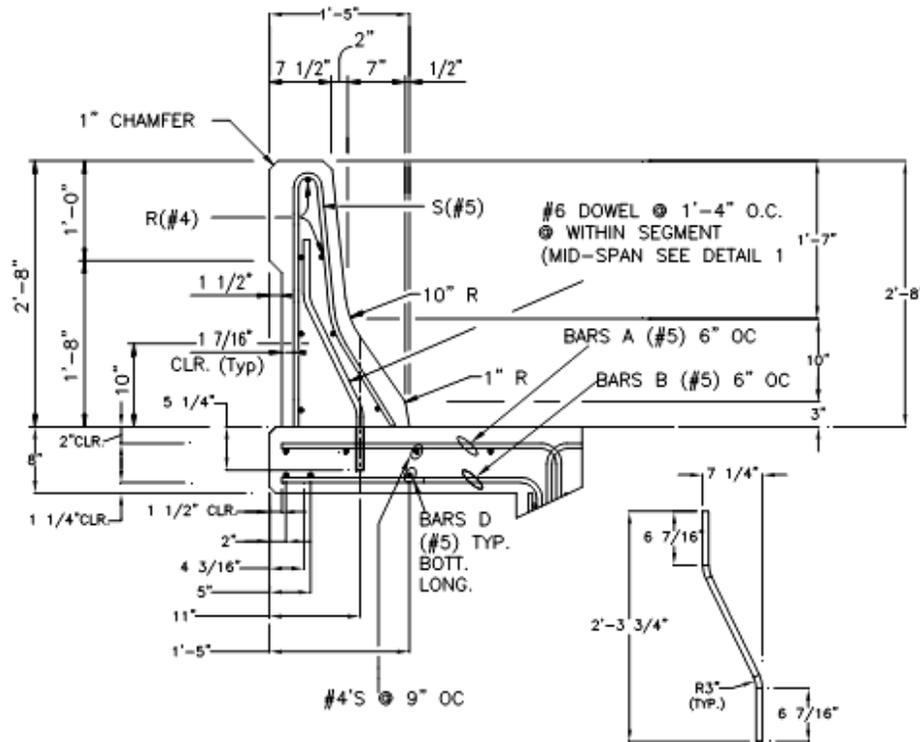


Figure 4 - Ancrage pour la réparation d'un parapet TxDoT501 (Williams, Butch, & Menges, 2007)

2.2.2 Parapets préfabriqués

Les ancrages des parapets préfabriqués développés utilisent diverses approches de conception. Il existe trois catégories de connexions : les ancrages par post-tension, les ancrages par connexion mécanique passive, et les ancrages type béton armé. Les ancrages doivent respecter les mêmes critères de conceptions que les parapets continus, soit permettre le transfert des charges à la dalle sans qu'il y ait d'endommagement de la dalle ou de l'ancrage lors de l'impact d'un véhicule.

2.2.2.1 Ancrage par post-tension

Deux ancrages relativement différents par post-tension ont été développés et testés récemment. Dans le cas de l'ancrage développé au Texas (Mitchell & al., 2006) (Figure 5), des barres de post-tension sont utilisées à tous les 200 mm et les plaques de post-tension sont situées à l'extérieur du parapet. Un angle de 35 degrés est donné aux barres qui sont précontraintes chacune à 89 kN. Cet angle a été choisi pour reprendre le détail d'armature du parapet Tx501 d'origine (Figure 2). L'ancrage dans la dalle est assuré par un système de retenue mécanique. Les estimations numériques effectuées pour déterminer la résistance du parapet ancré à l'aide de post-tension démontrent que la résistance devrait être semblable à celle d'un parapet coulé en place en utilisant un système assurant la continuité du parapet.

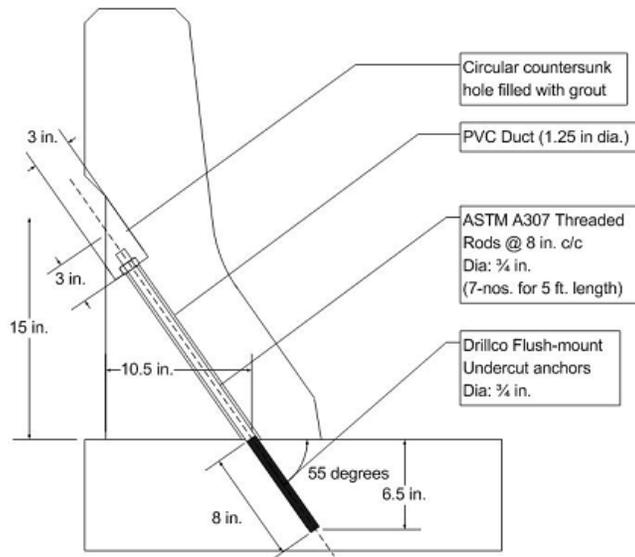


Figure 5 - Ancrage par post-tension avec barres à 35 degrés (Mitchell & al., 2006)

Le second système d'ancrage utilisant la post-tension a été développé à l'École Polytechnique de Montréal par Niamba (2009) (Figure 6). Lors de la fabrication des parapets préfabriqués, un manchon soudé à une plaque d'acier est installé dans le parapet. Au cours de la pose du parapet au chantier, les manchons sont alignés avec les trous forés dans la dalle et une barre de post-tension filetée à chaque manchon. Pour ce design, le nombre d'ancrage est grandement diminué comparativement au précédent système. En effet, les ancrages sont espacés de 1.5 m, par contre la précontrainte dans les barres de post-tension passe de 89 kN à 240 kN pour le design de Niamba (2009). Bien qu'aucune comparaison directe n'ait été faite avec un parapet coulé en place, les résultats de Niamba démontrent que ce type d'ancrage est efficace pour reprendre les charges statiques et dynamiques prescrites par les normes canadiennes et américaines. La rupture se produit dans le parapet et une grande section du parapet participe à la résistance.

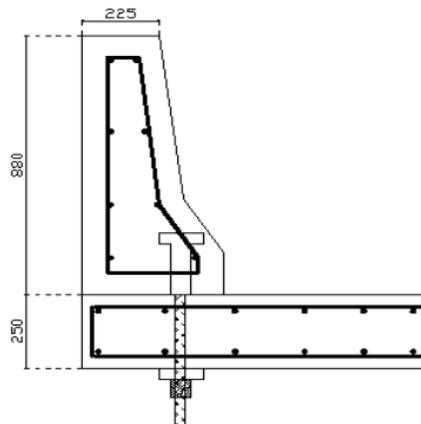


Figure 6 - Ancrage par post-tension et tirant dans le parapet (Niamba, 2009)

Les méthodes d'ancrage par post-tension démontrent une bonne résistance mécanique lors d'essais en laboratoire. Il est possible de réduire grandement le nombre de points d'ancrage à la dalle, facilitant la mise en place au chantier. De plus, en utilisant la post-tension, la résistance en traction du béton est augmentée en fonction de la précontrainte appliquée aux barres.

L'ancrage par post-tension présente tout de même certains désavantages. Dans un premier temps, cette technique d'ancrage demande le forage de la dalle du pont en de multiples endroits. Plus le nombre de forage est élevé tel qu'illustré à la **Figure 5**, plus les chances sont grandes que des barres d'armatures soient sectionnées. D'un point de vue mécanique, cela cause une réduction de la capacité portante de la dalle à son extrémité. Cela a aussi pour effet d'allonger la longueur d'adhérence des barres d'armature de la dalle et de diminuer la résistance de la dalle dans une zone cruciale pour la reprise des efforts de cisaillement et de flexion causés par l'impact d'un véhicule. De plus, les ancrages par post-tension demandent une grande précision pour le positionnement des manchons lors de la fabrication en usine. Cette précision est également exigée en chantier pour le forage des trous dans la dalle. Finalement, advenant une infiltration d'eau sous les parapets, la possibilité de pénétration de l'eau et des sels déglaçants dans la dalle est à considérer.

2.2.2.2 Ancrage mécanique passif

Une technique d'ancrage des parapets utilisant des boulons haute-résistance a été validée par Ngan (2008) (**Figure 7**). Cette technique d'ancrage qui est déjà utilisée en Colombie-Britannique consiste à prévoir des niches verticales dans le parapet préfabriqué, à partir desquelles une série de boulons fixent le parapet à la dalle. Le design présenté par Ngan (2008) évalue uniquement l'ancrage dans le parapet, le détail de l'ancrage dans la dalle n'est pas explicité. Néanmoins, il est possible de supposer que l'ancrage dans la dalle peut être assuré par un dispositif mécanique par friction ou noyé dans la dalle et comportant un filetage. Les essais effectués dans le cadre de l'étude par Ngan (2008) indiquent une résistance appropriée du parapet avec une rupture se produisant dans le parapet et non dans l'ancrage.

Les mêmes réserves que pour les ancrages par post-tension concernant le besoin de percer la dalle s'appliquent pour l'ancrage par boulon. Le degré de précision demandé pour l'installation d'un tel système peut également s'avérer problématique dans des conditions de chantier. De plus, l'exposition directe des boulons de fixation du parapet à l'eau et aux chlorures pourrait porter préjudice à la durabilité de l'ancrage dans les environnements Canadiens et Québécois rigoureux.

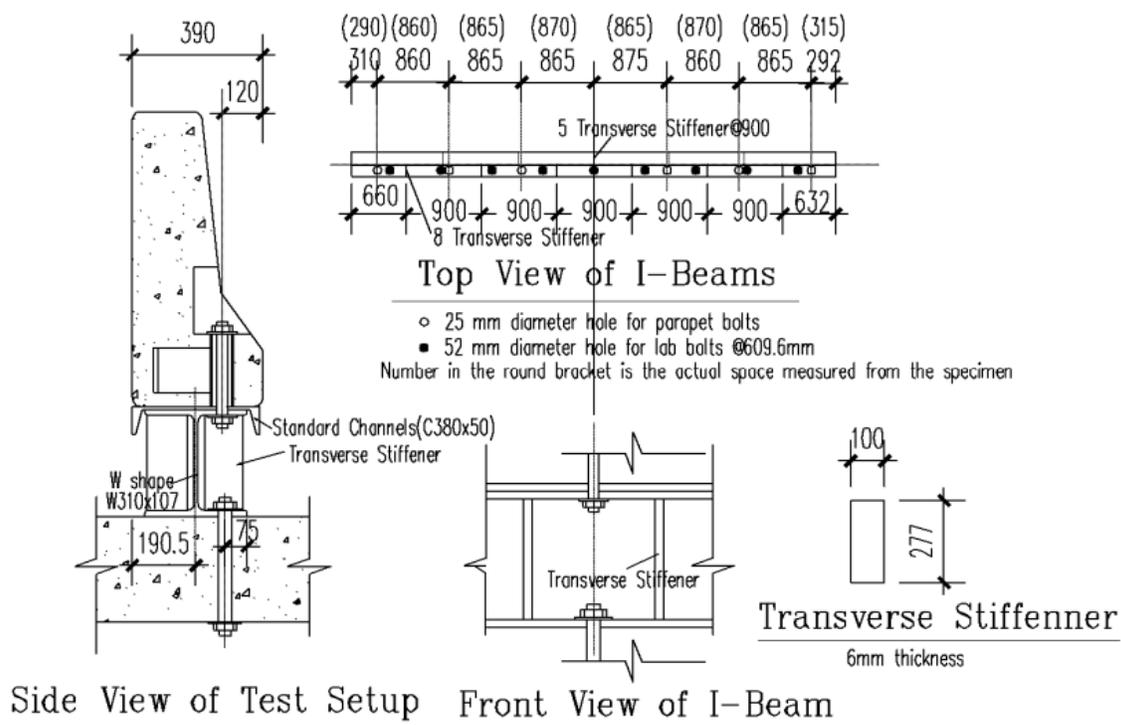


Figure 7 - Ancrage par boulons (Lai Yung Ngan, 2008)

2.2.2.3 Ancrages de type béton armé

Des ancrages de parapet préfabriqué de type béton armé ont été développés récemment par Duchesneau et al. (2011). L'objectif était de proposer des ancrages applicables pour l'installation de parapets préfabriqués sur des dalles de pont neuves et des dalles de pont existantes. Les deux systèmes d'ancrages type béton armé sont illustrés à la **Figure 8**. Ces systèmes sont simples d'installation, requièrent une moins grande précision sur le positionnement des ancrages, et évite le forage sur la profondeur complète de la dalle dans le cas d'une réparation. Enfin, l'utilisation d'ancrage type béton armé ne requiert pas la participation d'un corps de métier supplémentaire sur le chantier comme l'impose l'usage de la précontrainte.

Ces systèmes d'ancrage de type béton armé ont d'abord été testés en laboratoire sous un chargement quasi-statique, ils ont permis d'atteindre une résistance ultime surpassant par plus de 43% la force pondérée de conception du Code des Ponts (CSA-S6, 2006). Ensuite, le parapet préfabriqué fixé à l'aide des ancrages de type béton armé a présenté d'excellents résultats lorsque soumis à des chargements dynamiques représentant l'impact de petits véhicules. Aucun endommagement n'a pu être relevé visuellement sur le parapet préfabriqué et les systèmes d'ancrages de type béton armé après les chargements dynamiques. Un chargement quasi-statique a donc été appliqué suite aux impacts pour évaluer la résistance résiduelle du parapet. La résistance résiduelle s'est avérée nettement supérieure à

la force pondérée de conception du code et légèrement réduite (réduction maximale de 8%) par rapport à la résistance obtenue sans impact (Duchesneau, 2010).

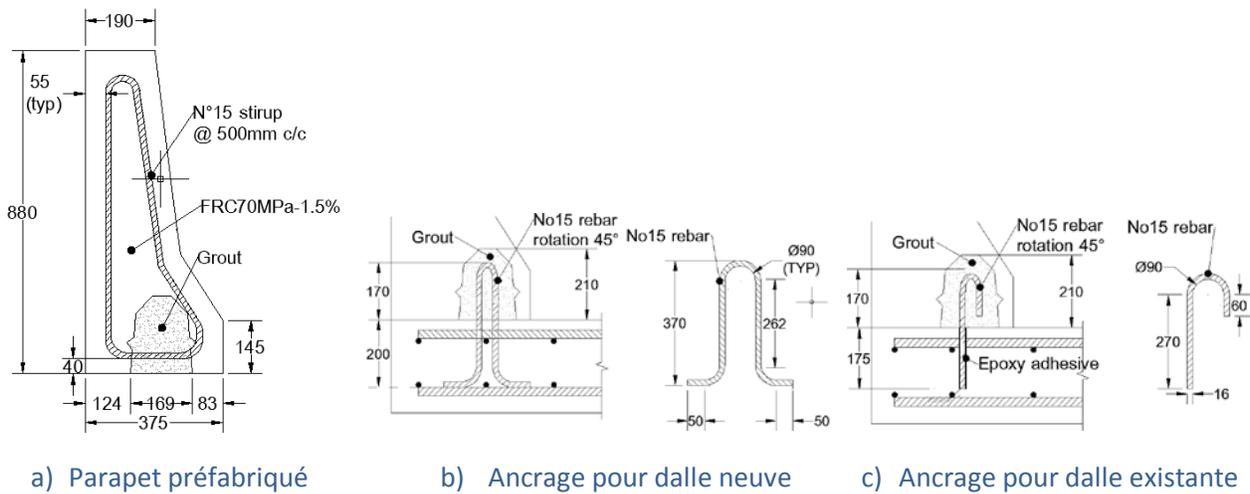


Figure 8 - Ancrage type béton armé (Duchesneau et al., 2011)

2.3 CONTINUITÉ DES PARAPETS PRÉFABRIQUÉS

L'utilisation de parapets préfabriqués sur une dalle de pont peut se faire en établissant ou non une continuité longitudinale entre les parapets, tel que retrouvée avec les parapets coulés en place. Cet aspect a été étudié dans le projet de maîtrise de Namy (2012) à l'École Polytechnique. Le projet avait pour objectif d'évaluer la performance structurale et la durabilité de dalles de pont avec parapets préfabriqués, avec et sans continuité longitudinale. Trois configurations de dalles de pont de 6 m de longueur à l'échelle réelle ont été fabriquées et testées en laboratoire, la première dalle avait un parapet coulé en place de 6 m, la deuxième dalle comprenait 3 parapets préfabriqués de 2 m, et la troisième dalle avait 3 parapets préfabriqués de 2 m avec continuité longitudinale. Il importe de mentionner que la longueur envisagée pour les parapets préfabriqués installés en chantier est de 4 m, cependant des parapets de 2 m ont été étudiés dans ce projet pour limiter le poids des spécimens d'essais qui atteignait 15 tonnes.

Un chargement transversal quasi-statique a été appliqué sur le parapet au centre de la dalle, la **Figure 9** illustre le montage utilisé. Les résultats expérimentaux obtenus pour les 3 configurations d'essais sont présentés à la **Figure 10**. La résistance ultime des trois configurations de dalles avec parapets coulés en place et préfabriqués a dépassé largement le critère de conception du Code des Ponts Routiers du Canada (CSA 2006) pour les parapets PL-2 ($F_{\text{pondérée de conception}} = 227 \text{ kN}$ considérant les facteurs de tenue), et ce même si les parapets préfabriqués avaient une longueur de 2 m au lieu d'une longueur prévue de 4 m sur les ponts. Les dalles comprenant des parapets préfabriqués avec et sans continuité latérale ont présenté un comportement très ductile, tandis que la dalle avec parapet coulé en place a eu une rupture fragile.

La création d'une continuité longitudinale entre les parapets préfabriqués, par exemple en utilisant une clé de cisaillement entre les parapets, a amélioré le transfert d'effort parapet-dalle et maximisé la performance mécanique du tablier. De plus, l'utilisation de parapets préfabriqués incorporant des clés de cisaillement n'a pas modifié pas la fissuration de la dalle et de l'interface parapet-dalle, la dalle devrait ainsi présenter une durabilité similaire à l'option utilisant le parapet coulé en place. La durabilité des parapets préfabriqués devrait quant à elle être supérieure à celle du parapet coulé en place.

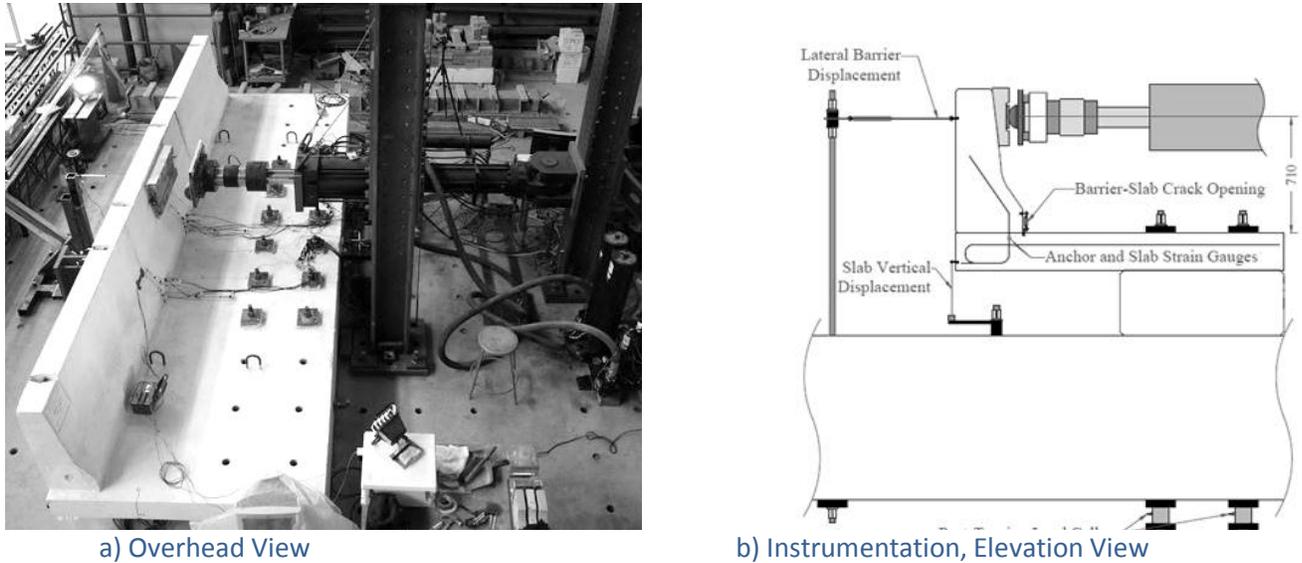


Figure 9 - Montage expérimental (Namy 2012)

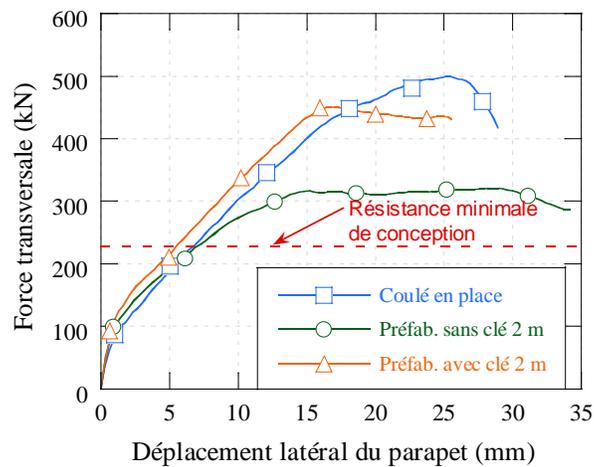


Figure 10 - Comportement mécanique des dalles avec parapets, parapets préfabriqués de 2 m de longueur (Namy 2012)

Des modélisations numériques ont permis d'établir la performance des spécimens d'essais avec la longueur prévue des parapets préfabriqués en chantier, soit 4 m de longueur. La **Figure 11** montre que le comportement mécanique de la dalle de pont avec parapets préfabriqués avec et sans clé de cisaillement est équivalent au système de référence coulés en place en termes de rigidité et de résistance ultime. Enfin, la **Figure 12** illustre la performance de la dalle lorsqu'une charge excentrée à l'extrémité des parapets préfabriqués est appliquée. La résistance des parapets préfabriqués est réduite par le chargement excentré, cette réduction est logiquement plus importante pour le parapet sans clé de cisaillement, puisque les efforts ne sont pas transmis au parapet suivant. Cependant, il importe de souligner que la résistance ultime atteinte par les parapets préfabriqués de 4 m soumis à un chargement excentré dépasse à nouveau largement le critère de conception du Code des ponts.

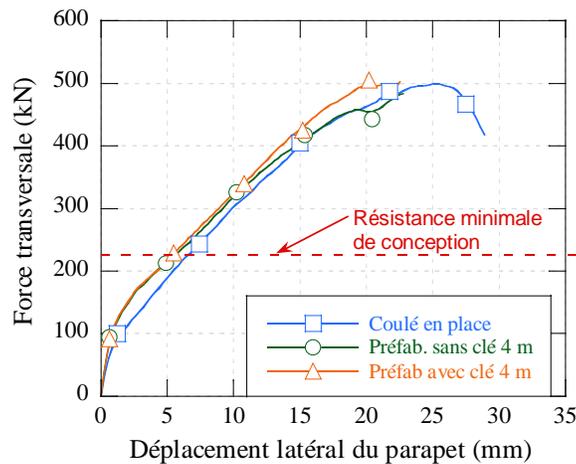


Figure 11 - Comportement mécanique des dalles avec parapets, parapets préfabriqués de 4 m de longueur (Namy 2012)

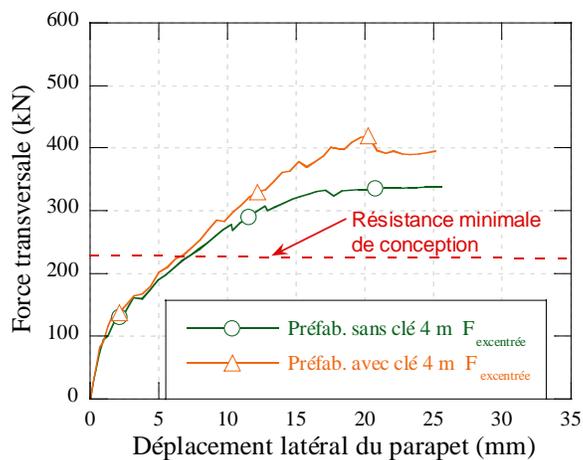


Figure 12 - Comportement mécanique des dalles avec parapets, parapets préfabriqués de 4 m de longueur avec charge excentrée (Namy 2012)

2.4 CONCLUSION

Cette revue de littérature a mis en évidence les différentes normes existantes en Amérique du Nord pour la conception de parapets en béton. Les différents critères de classification des parapets, les exigences des essais d'impact et les critères de conception ont été identifiés pour chacune des normes étudiées. Dans le cadre de ce projet, la norme canadienne sera utilisée pour la conception et l'évaluation de la performance des parapets.

Un survol des différents systèmes d'ancrage a permis de définir les différentes options possibles pour l'ancrage de parapets coulés en place ou préfabriqués. Les techniques d'ancrage pour les parapets coulés en place sont très nombreuses, mais se résument à la mise en place d'armatures lors de la coulée de la dalle puis à l'installation de coffrages pour procéder à la coulée sur chantier. Pour l'ancrage de parapets préfabriqués, trois familles d'ancrages sont à noter, soit l'ancrage par post-tension, l'ancrage par boulons, et l'ancrage de type béton armé. L'ancrage de type béton armé s'avère plus simple étant donné le degré moindre de précision requis pour l'installation des parapets, semble moins critique concernant la durabilité de la dalle, et n'exige pas un deuxième corps de métier en chantier.

Ensuite, il a été démontré qu'une dalle avec parapets préfabriqués de 4 m avec et sans continuité longitudinale présente une rigidité et une résistance maximale équivalente à une dalle avec parapet coulé en place lorsque soumise à un chargement centré. Lors d'un chargement excentré, la résistance maximale de la dalle avec parapets préfabriqués est réduite, cependant elle demeure nettement supérieure aux exigences du Code des Ponts. Bien que la continuité longitudinale entre les parapets préfabriqués ne soit pas requise, elle permet de mieux répartir les forces d'impacts dans la dalle de pont.

Considérant les informations recueillies dans la revue de la documentation, des parapets préfabriqués avec un ancrage de type béton armé seront privilégiés dans le cadre de ce projet de recherche. Les effets de la continuité longitudinale et d'un chargement excentré sur les parapets préfabriqués ayant été déterminés respectivement par le projet de Namy (2012) à l'École Polytechnique, ils ne seront pas étudiés dans ce projet.

3 CONCEPTION DES PARAPETS HYBRIDES

Ce chapitre présente d’abord les principaux critères de conception des parapets de type PL-3, conformément au Code canadien des ponts routiers (CSA S6 2006). Ensuite, certaines considérations importantes utilisées pour le dimensionnement des parapets sont décrites. Enfin, les plans et le comportement mécanique attendu du parapet MTQ 301 et les parapets hybrides sont présentés.

3.1 EXIGENCES POUR LA CONCEPTION D’UN PARAPET DE CATÉGORIE PL-3

Les parapets doivent permettre de reprendre les forces et les moments causés par les collisions de véhicules, rediriger les véhicules vers l’intérieur du pont sans causer de capotage et de décélération trop vive pour les usagers, et constituer l’élément faible du tablier de pont lors d’un chargement exceptionnel menant à un endommagement important.

3.1.1 Charges de conception

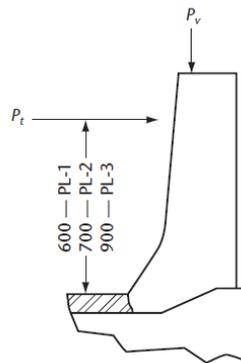
Le parapet et son ancrage à la dalle doivent résister à une surcharge transversale P_t , une surcharge longitudinale P_l et une surcharge verticale P_v . Pour des fins de conception, ces surcharges routières doivent être pondérées par un facteur de 1.7. De plus, pour tenir compte de la variabilité des propriétés des matériaux utilisés pour la fabrication de parapet, des coefficients de tenue de 0.75 et 0.9 doivent être appliqués aux résistances du béton et de l’acier respectivement. Afin d’obtenir la résistance minimale de conception à considérer pour le dimensionnement, les coefficients de tenues ont été remplacés par l’application d’un facteur de majoration global conservateur de 1.33 (1/0.75) aux surcharges pondérées. Le **Tableau 13** présente les surcharges à considérer lors de la phase de conception.

Tableau 13 - Charges de conception

Identification (Figure 13)	Surcharges non pondérées	Surcharges pondérées	Surcharges pondérées de conception*
P_t	210 kN	357 kN	476 kN
P_l	70 kN	119 kN	159 kN
P_v	90 kN	153 kN	204 kN

* : Majoration de 1.33 pour tenir compte de la variabilité des matériaux

La position et l'application de ces surcharges sont illustrées à la **Figure 13**. Une étude antérieure a permis de déterminer que la conception du parapet peut être réalisée en tenant compte uniquement de la surcharge transversale (Namy 2012). De fait, la surcharge verticale diminue les efforts générés à l'ancrage du parapet et la surcharge longitudinale a peu d'effet sur le comportement du parapet. Enfin, la présence de surcharges routières sur le tablier cause principalement des efforts dans la dalle supportant le parapet, à proximité du support. Ainsi, la surcharge transversale de 476 kN qui sera considérée dans la conception du parapet doit être appliquée sur une longueur de 2400 mm et à une hauteur de 900 mm par rapport à la surface supérieure de la dalle de pont.



Notes :

- 1) Ces dispositifs de retenue ne sont présentés qu'à titre indicatif. D'autres types peuvent être utilisés.
- 2) La surcharge transversale P_t doit être appliquée sur une longueur de dispositif de retenue équivalant à 1200 mm dans le cas des dispositifs PL-1, à 1050 mm pour les dispositifs PL-2, et à 2400 mm pour les dispositifs PL-3.
- 3) La surcharge longitudinale P_ℓ doit être appliquée aux mêmes endroits et sur les mêmes longueurs de dispositifs de retenue que P_t . Dans le cas des dispositifs de retenue à poteaux et rails, on ne doit pas répartir la surcharge longitudinale sur plus de trois poteaux.
- 4) La surcharge verticale P_v doit être appliquée sur une longueur de dispositif de retenue équivalant à 5500 mm dans le cas des dispositifs PL-1 et PL-2, et sur une longueur de 12 000 mm pour les dispositifs PL-3.
- 5) Ces surcharges ne doivent servir que pour la conception des ancrages de dispositifs de retenue et des tabliers.

Figure 13 - Points d'application des charges sur un parapet (CSA-S6 2006)

3.1.2 Géométrie

Les parapets utilisés sur le réseau routier du Québec présentent principalement les profils de type New-Jersey et de type F-Shape. La géométrie du parapet de référence MTQ 301 correspond au profil F-Shape. Ainsi la conception du parapet préfabriqué sera réalisée à partir de ce profil.

3.1.3 Modifications admissibles

Une modification sur un parapet existant ayant obtenu la certification de performance pour des essais d'impact de véhicules peut être acceptée. Pour ce faire, il doit être démontré que la résistance du parapet modifié est égale ou augmentée, et que les nouveaux matériaux utilisés ont des propriétés équivalentes ou améliorées par rapport aux matériaux utilisés couramment (CSA-S6 2006). De plus, la modification du parapet ne doit pas changer significativement sa rigidité en service pour conserver le mode de redirection des véhicules qui a été établi lors d'impacts.

3.2 CONSIDÉRATIONS POUR LA CONCEPTION

3.2.1 Logiciel et hypothèse

La conception des parapets hybrides a été réalisée avec le logiciel ATENA (Analysis of Concrete and Reinforced Concrete Structures) de Cervenka Consulting (Cervenka 2012). Toutes les caractéristiques concernant les modèles constitutifs, les maillages, les conditions limites et la méthode de résolution seront décrites en détail au [Chapitre 6](#).

Le comportement mécanique du parapet a été étudié sous un chargement transversal statique. Le chargement a été appliqué à l'aide d'une plaque de 700 mm de largeur et 350 mm de hauteur, soit la dimension de la plaque de chargement disponible au laboratoire et utilisée dans le cadre de projets antérieurs (Duchesneau et al. 2011, Charron et al. 2010). ***Il s'agit d'une configuration de chargement plus sévère que celle préconisée par la norme (Section 2.1.1), puisqu'elle concentre les efforts dans la zone centrale du parapet.***

Cette étude numérique a été réalisée sur des parapets de 2 m de longueur pour simplifier les essais à compléter au laboratoire. Avec cette configuration, la surcharge de conception aurait donc pu être réduite à $476 \times (2.0/2.4) = 397$ kN. ***La surcharge de conception de 476 kN a plutôt été conservée pour obtenir une réserve de résistance pouvant compenser une éventuelle variation du bras de levier de la surcharge transversale.***

3.2.2 Matériaux utilisés

Les propriétés des matériaux cimentaires utilisées pour les modélisations par éléments finis préliminaires sont résumées au [Tableau 14](#). La gamme de matériaux considérée est large, elle comprend un béton ordinaire avec une résistance à la compression de 40 MPa (BO), un béton à haute performance de 50 MPa (BHP), un béton fibré de 70 MPa avec 1.5% de fibres (BRF), et un béton fibré à ultra-haute performance de 120 MPa avec 4% de fibres (BFUP). La [Figure 14](#) complète ce tableau en présentant les

lois de comportement en traction de ces matériaux, elle illustre le comportement écouissant du BFUP avant d'atteindre la résistance maximale.

Les armatures considérées dans les analyses sont d'une nuance d'acier standard offrant une limite élastique de 400 MPa et un module élastique de 200 GPa.

Tableau 14 - Propriétés des matériaux cimentaires utilisés dans le modèle numérique

	BO 40MPa	BHP 50MPa	BRF 70MPa	BFUP 120MPa
f_c (MPa)	42.0	50.0	70.0	148.0
f_t (MPa)	2.1	3.0	4.4	9.0
E_c (GPa)	27.5	31.8	35.9	41.4

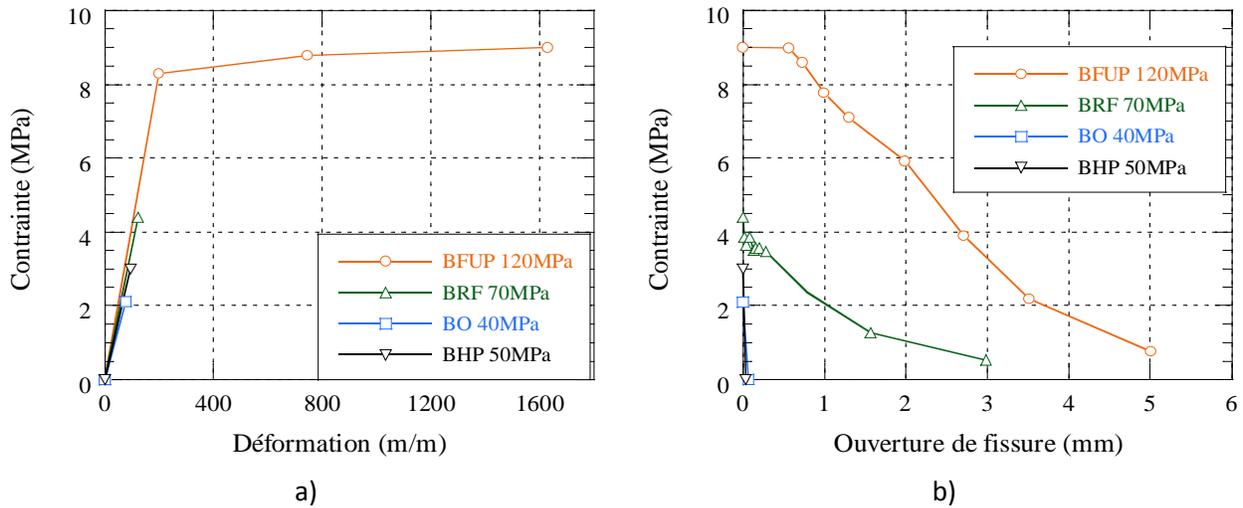


Figure 14 - Loi de comportement en traction des matériaux cimentaires pour la conception, a) comportement pré-pic, b) comportement post-pic

3.3 PARAPET DE RÉFÉRENCE MTQ 301

Un parapet de pont de type PL-3 301 du MTQ présente une largeur de 435 mm à la base et une hauteur de 1140 mm (Figure 15). Le parapet est fabriqué avec un BHP de 50 MPa et comprend des armatures transversales (cadres) M15 et M20 espacés à 200 mm, et des armatures longitudinales M15 espacées à 200 mm. L'ancrage du parapet est assuré par la prolongation des cadres du parapet jusqu'au rang inférieur d'armature de la dalle.

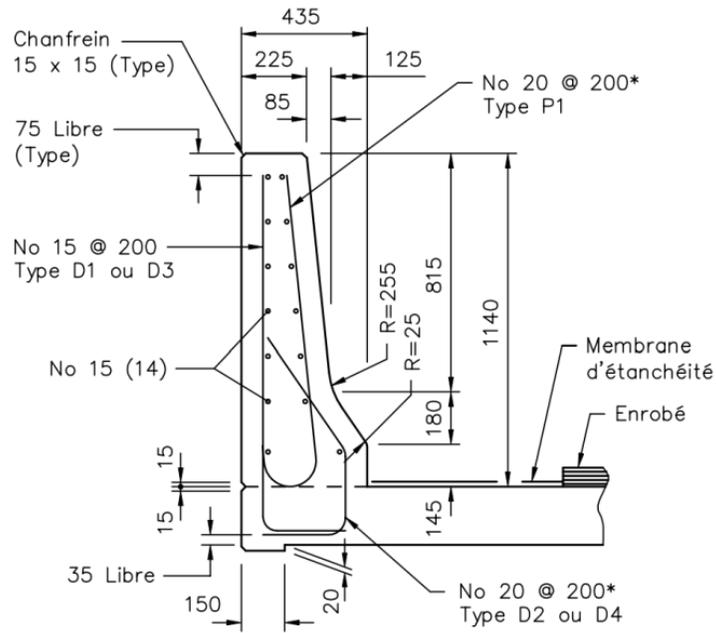


Figure 15 - Plan du parapet PL-3 MTQ 301

La **Figure 16** présente le résultat du modèle numérique par éléments finis appliqué au parapet MTQ 301. La résistance maximale attendue du parapet de référence est donc de 522 kN. Cette résistance surpasse nettement la surcharge transversale pondérée de 357 kN exigée par le code CSA-S6, ou la force minimale de conception de 476 kN fixée précédemment pour tenir compte de la variabilité des propriétés des matériaux.

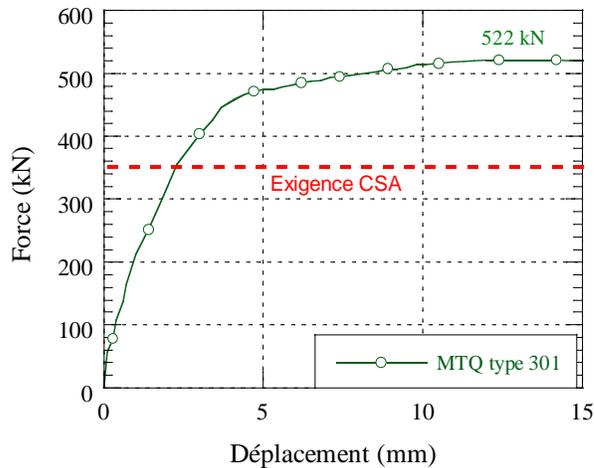


Figure 16 - Courbe force-déplacement par éléments finis du parapet de référence MTQ PL-3 301

3.4 PARAPETS HYBRIDES À NICHE FERMÉE

Deux types de parapets hybrides ont été développés à la demande du MTQ. Le premier concept devait conserver en grande partie le renforcement du parapet de référence et utiliser la méthode d'ancrage à niche fermée proposée par Duchesneau et al. (2011). Ce concept a été nommé *parapet hybride à niche fermée*. Le deuxième concept devait innover au niveau du renforcement interne et de la méthode d'ancrage du parapet. Ce concept a été nommé *parapet hybride à niche ouverte*.

Le parapet hybride à niche fermée est composé d'un noyau intérieur en BO et d'une coque en BFUP à épaisseur variable (**Figure 17**). La coque s'épaissit de manière proportionnelle à l'intensité des efforts, soit avec une épaisseur minimale à la crête du parapet (30 mm) et une épaisseur maximale à la base (64 mm). Le détail d'armature de ce parapet hybride est comparable au parapet de référence, les barres transversales et les barres d'ancrage sont des M20 espacées aux 200 mm. La niche fermée est fabriquée en BFUP, elle doit être pompée après l'installation du parapet. La niche fermée présente l'avantage de ne pas être exposée aux intempéries, cependant la vérification de son remplissage peut s'avérer complexe.

Étant donné que les armatures de ce parapet hybride ne sont pas localisées dans le BFUP, ce sont davantage les propriétés de durabilité du BFUP qui sont exploitées dans ce concept. Le volume total de béton du parapet à niche fermée est équivalent au parapet coulé en place, cependant une réduction de 50 % de la quantité d'armature est obtenue.

La **Figure 18** présente le comportement mécanique attendu du parapet hybride à niche fermée. La résistance maximale de 502 kN est équivalente à la résistance du parapet de référence et est légèrement supérieure à la résistance de conception fixée à 476 kN. La résistance maximale surpasse largement la surcharge transversale pondérée de 357 kN exigée par le Code S6-2006. Le parapet possède un comportement ductile provenant de la plastification des barres d'ancrage. La perte de charge apparaissant à 460 kN est due à un endommagement localisé de la dalle sous la niche du parapet. Cet endommagement survient dans la configuration d'essais numériques considérant une dalle supportée en tout point, cependant il ne surviendra pas pour une dalle de pont en porte-à-faux.

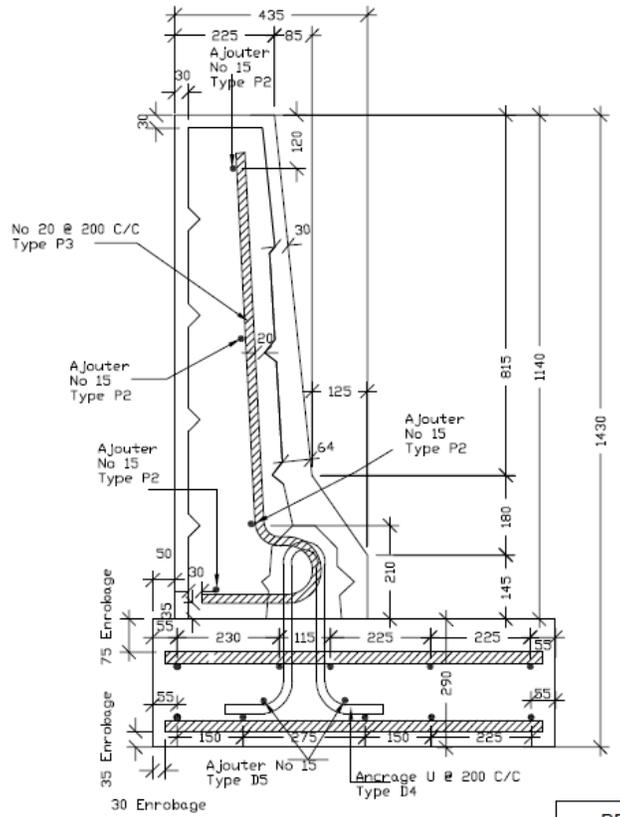


Figure 17 - Plan du parapet PL-3 hybride à niche fermée

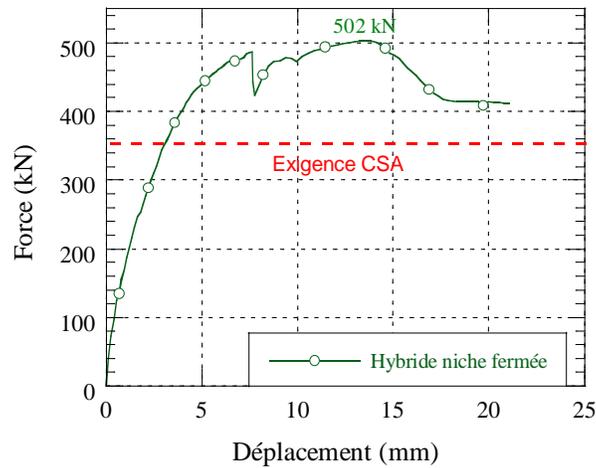


Figure 18 - Comportement mécanique du parapet PL-3 hybride à niche fermée

3.5 PARAPET HYBRIDE À NICHE OUVERTE

Le parapet hybride à niche ouverte est composé d'un noyau intérieur en BO et d'une coque en BFUP à épaisseur variable (**Figure 19**). La coque s'épaissit de manière proportionnelle à l'intensité des efforts, soit avec une épaisseur minimale à la crête du parapet (30 mm) et une épaisseur maximale à la base (85 mm). Le détail d'armature de ce parapet hybride est très différent de celui du parapet de référence. Tout d'abord, les barres transversales M20 espacées aux 175 mm sont localisées dans le BFUP pour maximiser le transfert d'effort dans la coque. Ensuite, le chevauchement des barres transversales vers les barres d'ancrage de la dalle est réalisé en utilisant des manchons de type *Terminator* à l'extrémité des barres. Enfin, le chevauchement des barres s'effectue dans la niche fabriquée en BFUP. La niche est ouverte vers l'extérieur, elle peut être remplie depuis l'extérieur avec un coffrage standard (pompage non requis) après l'installation du parapet. La niche ouverte est cependant exposée aux intempéries. La niche présente un détail particulier, puisqu'elle est légèrement encavée dans la dalle. Ceci offre trois avantages, soit une réduction de la taille 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.

Dans ce concept de parapet hybride, les propriétés mécaniques et de durabilité du BFUP sont mises à profit. Le volume total de béton du parapet à niche ouverte est équivalent au parapet coulé en place, cependant une réduction de 65 % de la quantité d'armature est obtenue.

La **Figure 20** présente le comportement mécanique attendu du parapet hybride à niche ouverte. La résistance maximale de 565 kN est légèrement supérieure à la résistance du parapet de référence et à la résistance de conception fixée à 476 kN. La résistance maximale surpasse largement la surcharge transversale pondérée de 357 kN exigée par le Code S6-2006. Le parapet possède un comportement très ductile procuré par la contribution des barres d'ancrage et du BFUP.

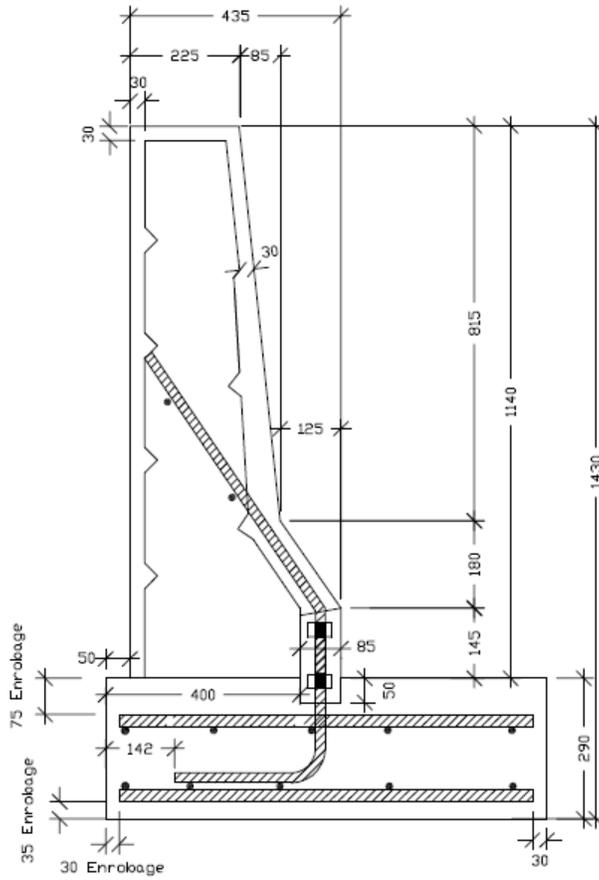


Figure 19 - Plan du parapet PL-3 hybride à niche ouverte

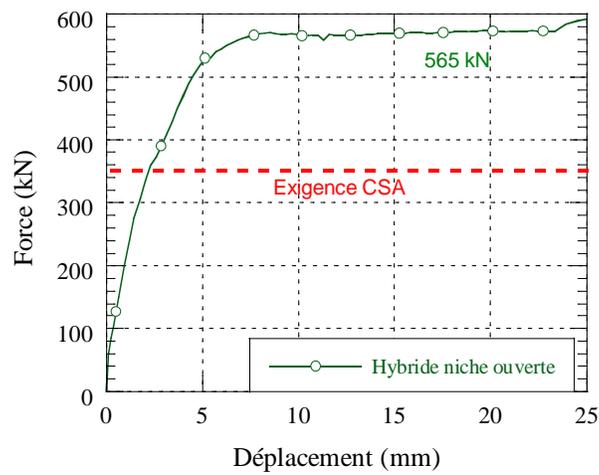


Figure 20 - Comportement mécanique du parapet PL-3 hybride à niche ouverte

3.6 CONCLUSION

Deux concepts de parapets hybrides PL-3 ont été développés. Le premier concept de parapet hybride utilise une niche d'ancrage fermée et le BFUP pour sa capacité de protection principalement (amélioration de la durabilité du parapet). Le deuxième concept de parapet hybride comprend une niche d'ancrage ouverte et utilise le BFUP pour ses apports mécaniques et de durabilité. Le deuxième concept permet de réduire de 65% la quantité d'armature par rapport au parapet MTQ 301 et sa connexion à la dalle s'effectue sans pompage. Pour les deux concepts, les parapets sont composés d'un noyau intérieur en BO et d'une coque en BFUP à épaisseur variable.

Les études numériques basées sur des informations préliminaires concernant la résistance des matériaux ont démontré que la résistance maximale des deux concepts de parapets hybrides atteint au moins 500 kN, ils surpassent donc largement la surcharge transversale pondérée de 357 kN exigée par le Code S6-2006, au même titre que le parapet de référence MTQ 301. Les essais en laboratoire décrits au [Chapitre 5](#) permettront de décrire la performance mécanique réelle de chacun des concepts de parapet hybrides étudiés.

4 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Ce chapitre décrit d'abord la campagne d'essais réalisée sur les matériaux et sur les éléments structuraux pour évaluer le comportement mécanique du parapet MTQ 301 de référence et des parapets hybrides à niche fermée et à niche ouverte. Ensuite la procédure de fabrication des parapets à l'usine Béton Brunet est détaillée. La description des résultats d'essais et leur analyse sont présentées au [Chapitre 5](#).

4.1 CAMPAGNE D'ESSAIS

4.1.1 Essais statiques sur parapets

Les conditions expérimentales étudiées pour le projet de recherche sur les parapets préfabriqués sont résumées au [Tableau 15](#). Les trois types de parapets décrits au [Chapitre 3](#) ont été soumis à un essai quasi-statique jusqu'à la rupture complète, deux spécimens de chaque type ont été testés de manière à vérifier la reproductibilité des résultats. Chaque spécimen comportait une dalle, un parapet et une niche d'ancrage dans le cas des parapets préfabriqués.

Tableau 15 - Conditions expérimentales

Type de parapet	Nombre de spécimens	Éléments pour chaque spécimen	Type d'essais
MTQ 301	2	Dalle, parapet	Statique
Hybride à niche fermée	2	Dalle, parapet, niche fermée	Statique
Hybride à niche ouverte	2	Dalle, parapet, niche ouverte	Statique

Le montage expérimental utilisé pour tester les parapets est illustré à la [Figure 21](#). Chaque parapet est installé sur une dalle d'ancrage qui est précontrainte sur la dalle du laboratoire. Une dalle de retenue, également précontrainte sur la dalle du laboratoire, est disposée à l'arrière de la dalle d'ancrage pour éviter le déplacement transversal du montage. Un vérin d'une capacité de 1000 kN est installé sur une colonne en acier contreventée. Le vérin est disposé de manière à appliquer une force transversale à 965 mm de hauteur sur le parapet. La force est transmise au centre du parapet par une plaque en acier rigide de 700 x 350 mm (l x h).

Plusieurs capteurs de déplacement sont disposés sur le parapet et la dalle pour mesurer leur déplacement transversal ou leur soulèvement pendant l'essai, et mesurer les ouvertures de fissures sur les parapets et à l'interface parapet-dalle. Les capteurs sont illustrés sur la [Figure 22](#) et la [Figure 23](#). Un

intérêt particulier est porté au déplacement transversal mesuré au centre du parapet à une hauteur de 965 mm, soit directement à l'arrière de la zone d'application du chargement. Le soulèvement du parapet par rapport à la dalle d'ancrage, mesuré au centre, est aussi d'intérêt. En effet, ces déplacements décrivent bien le comportement global du parapet lorsqu'ils sont analysés en fonction de la force appliquée. Des jauges d'extensométrie ont aussi été collées à la surface de certaines barres d'armatures transversales et barres d'ancrage situées à l'interface de la niche au centre du parapet. Les déformations mesurées permettent de vérifier le niveau de contrainte atteint dans les armatures et de confirmer la validité des calculs numériques.

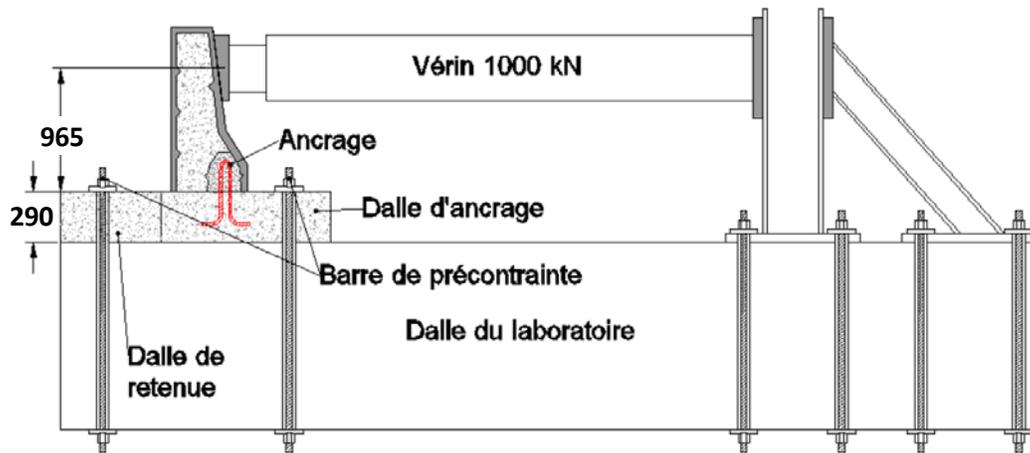


Figure 21 - Montage expérimental

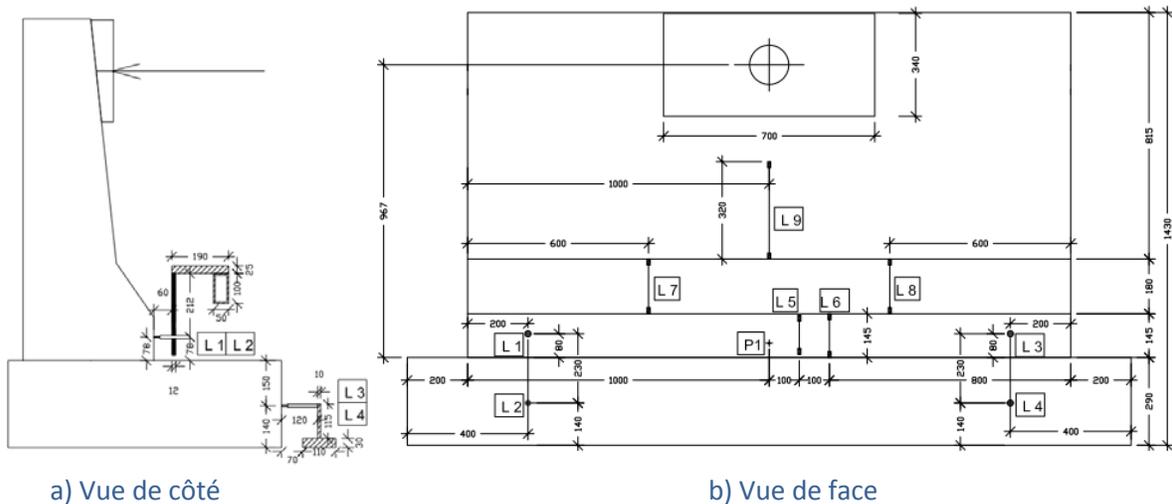


Figure 22 - Position des principaux capteurs sur le parapet



Figure 23 - Montage avec les principaux capteurs sur le parapet

Le déroulement des essais est le suivant. Le chargement appliqué sur le parapet est contrôlé en déplacement du vérin, à une vitesse de 0.02 mm/s. Lorsque la force atteint un palier de 50 kN, le déplacement est maintenu constant pendant quelques minutes. Cette pause permet de tracer la fissuration observée sur le parapet. Ensuite, le chargement se poursuit jusqu'à l'atteinte d'un autre palier ou de la résistance maximale. Lorsque la résistance maximale est atteinte, le chargement est poursuivi pour évaluer la capacité de déformation du parapet.

4.1.2 Essais de caractérisation sur les matériaux

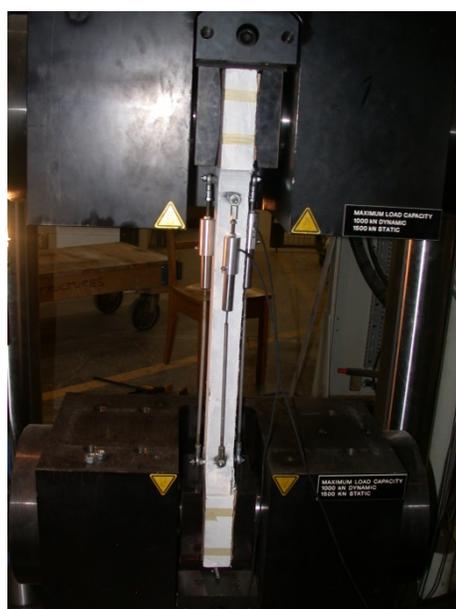
Les matériaux des différents éléments structuraux ont subi une caractérisation complète (**Tableau 16**). La résistance à la compression, le module élastique et la résistance à la traction des bétons ont été déterminés. La résistance à la traction par fendage a été mesurée pour les éléments en BHP. La résistance à la traction directe a été mesurée sur les éléments en BFUP et sur des carottes comportant l'interface BHP-BFUP. La **Figure 24** illustre les montages expérimentaux des essais de traction directe moins courants. Une mesure du coefficient d'orientation des fibres a été réalisée sur le BFUP de la coque de manière à caractériser le comportement en traction réel du BFUP à l'intérieur du parapet. De fait, il est fréquent de noter une différence d'orientation des fibres dans un élément structural par rapport aux spécimens de caractérisation qui sont plus petits et dont la mise en œuvre est faite différemment. Enfin, la limite élastique, la limite de rupture de même que le module élastique ont été mesurés sur les types de barres d'armatures utilisées.

Tableau 16 - Essais de caractérisation réalisés sur les matériaux

Type d'essai	Norme	Bétons testés
Résistance à la compression f'_c	ASTM-C39	BHP et BFUP
Module élastique E_c	ASTM-C469	BHP et BFUP
Résistance à la traction - fendage	ASTM-C496	BHP
Résistance à la traction - directe f'_t	RILEM TC 162-TDF ¹	BFUP et interface BHP-BFUP
Coefficient d'orientation des fibres α	- ²	BFUP
Limite élastique f_y , module élastique E_s et limite de rupture f_u	ASTM-E8	Armature en acier

¹ : Essai basé sur RILEM TC 162-TDF, mais spécimen de forme et taille différentes.

² : Essai développé à l'École Polytechnique par Delsol (2012).



a) Essai de traction directe sur os



b) Essai de traction directe sur carotte

Figure 24 - Essais de traction directe

4.2 PRODUCTION DES PARAPETS

La production des parapets a été réalisée à l'usine de *Béton Brunet* à Valleyfield. L'équipe de Béton Brunet a réalisé les plans de coffrage avec facilité et rapidité puisqu'elle avait une expérience de fabrication de parapet hybride dans le cadre d'un autre projet de recherche avec l'École Polytechnique.

La séquence générale de production pour les spécimens d'essais a été la même pour les trois configurations de spécimens, soit la production des dalles précédant la fabrication des parapets. Cependant, la production des différents parapets a varié selon les concepts sélectionnés.

Tous les coffrages utilisés ont été fabriqués en acier de manière à obtenir une bonne rigidité et éviter une déformation lors du remplissage de béton. Le coffrage des dalles d'ancrage est illustré à la **Figure 25**. Le parapet MTQ-301 devant représenter le mode de fabrication coulé en place, les 2 rangs d'armatures d'ancrage de ce parapet devaient être intégrés à la cage d'armature de la dalle (**Figure 26a**). Similairement, les barres d'ancrage repliées en forme de U requise pour la connexion avec les parapets préfabriqués devaient être intégrées à la cage d'armature de la dalle (**Figure 26b**). La mise en place du BHP pour la fabrication des dalles est présentée à la **Figure 27**, le béton provenait d'un camion-malaxeur de l'entreprise *Béton Brunet*.

Pour les dalles des parapets à niche fermée et à niche ouverte, la surface de contact prévue pour l'installation des parapets a été traitée avec un agent retardateur immédiatement après la mise en place du béton. L'agent a retardé la prise d'une mince couche de béton, celle-ci a été retirée aisément à l'aide d'un jet d'eau sous pression lors du décoffrage le lendemain (**Figure 28**). Cette procédure a permis d'obtenir une surface de dalle à granulats exposés pour favoriser l'adhérence des parapets lors de leur installation.



Figure 25 - Coffrage des dalles



a) Dalle pour parapet MTQ 301



b) Dalle pour parapet hybride à niche fermée

Figure 26 - Coffrage des dalles avec cage d'armature



a) Livraison du béton par camion-malaxeur



b) Mise en place du béton

Figure 27 - Mise en place du béton dans les dalles



Figure 28 - Enlèvement d'une mince couche de la dalle pour obtenir une surface en granulats exposés

Le béton des parapets MTQ 301 a été mis en place sur les dalles dans le coffrage en position verticale (**Figure 29**). Un godet a permis la distribution du béton dans le coffrage. La fabrication des parapets hybrides a été plus complexe. Elle nécessitait l'utilisation de 2 coulées de béton intercalées de quelques jours, l'une pour la préparation du cœur en BHP, l'autre pour la préparation de la coque en BFUP. La mise en place du béton des cœurs a été réalisée avec le coffrage en position horizontale (**Figure 30**), tandis que celle des coques a été effectuée avec le coffrage en position verticale (**Figure 32**). À nouveau, un godet a été utilisé pour la distribution du BHP et BFUP. La surface des cœurs des parapets hybrides a également été traitée avec un agent retardateur (*Euclid Concrete Surface Retarders*), le résultat obtenu après nettoyage au jet d'eau est montré à la **Figure 31**.



Figure 29 - Coffrage et mise en place du béton dans les parapets MTQ 301



a) Coffrage



b) Mise en place du béton

Figure 30 - Coffrage du cœur du parapet à niche fermée



Figure 31 - Cœur du parapet à niche ouverte avec une surface à granulats exposés



a) Coffrage



b) Mise en place du béton

Figure 32 - Coffrage et mise en place de la coque des parapets à niche fermée et ouverte

Lorsque la fabrication des spécimens en béton fut terminée, les parapets et les dalles ont été acheminés à l'École Polytechnique par camion. Les parapets MTQ 301 étant déjà solidaires avec leur dalle, leur fixation par post-tension s'est faite directement.

L'installation des parapets préfabriqués nécessitait quant à elle une phase supplémentaire. Les dalles des parapets hybrides ont été fixées par post-tension à la dalle du laboratoire. Ensuite, une mince couche de mortier (*Euclid High Flow Grout*) a été déposée sur les dalles avant de déposer les parapets préfabriqués pour assurer un bon contact entre les éléments (**Figure 33**).

Par la suite, la niche d'ancrage du parapet à niche fermée a été remplie de BFUP par pompage avec une pompe à béton de petite capacité (*Allentown PowerCreter*, **Figure 34**). Le pompage s'est effectué facilement, car il s'agit d'un béton autoplaçant et visqueux qui présente peu de ségrégation. La niche du parapet à niche ouverte a été remplie de BFUP à l'aide d'un coffrage en bois traditionnel comprenant deux déversoirs (**Figure 35**).



a) Parapet à niche fermée



b) Parapet à niche ouverte

Figure 33 - Mise en place du coulis et installation des parapets hybrides



a) Pompe



b) Remplissage de la niche par pompage

Figure 34 - Pompage de la niche du parapet à niche fermée



a) Coffrage de la niche ouverte



b) Remplissage de la niche

Figure 35 - Remplissage de la niche du parapet à niche ouverte

5 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Ce chapitre présente d'abord les résultats des essais de caractérisation sur les différents bétons et armatures utilisés pour la fabrication des parapets. En deuxième lieu, les résultats des essais statiques sur le parapet MTQ 301, le parapet hybride niche fermée et le parapet hybride niche ouverte sont détaillés. Enfin, une comparaison des résultats des parapets étudiés sera présentée pour identifier les avantages et inconvénients au niveau mécanique des différentes configurations de parapets.

5.1 PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX

5.1.1 Bétons

Trois types de béton ont été utilisés pour la fabrication des parapets. Un béton à haute performance (BHP) de 50 MPa a été demandé pour la construction des dalles supportant les parapets, pour les parapets MTQ 301, ainsi que pour les cœurs des parapets hybrides. Un béton fibré à ultra-haute performance (BFUP) de 120 MPa et 4% de fibres métalliques a été utilisé pour la fabrication des coques des parapets hybrides ainsi que pour les niches d'ancrage de ces parapets. Les bétons des dalles, des parapets MTQ et des parapets hybrides ont été produits à l'usine de Béton Brunet, seuls les BFUP pour réaliser l'ancrage des parapets hybrides ont été produits au laboratoire.

Les résultats des essais de caractérisation pour la résistance à la compression des bétons, leur module élastique et leur résistance à la traction sont résumés au [Tableau 17](#), au [Tableau 18](#) et au [Tableau 19](#) respectivement. Les résultats représentent la moyenne obtenue sur 3 essais. Les résultats sont regroupés par spécimens d'essais, soit pour chacun des 2 spécimens des 3 concepts de parapets étudiés. L'échéance des essais mécaniques est indiquée entre parenthèses. La variation des échéances s'explique par le fait que les essais de caractérisation mécanique des matériaux ont été effectués le jour de l'essai structural sur le spécimen de parapet, de manière à pouvoir introduire ces propriétés dans les modèles numériques par la suite. La réalisation d'essais de caractérisation mécanique à une échéance à 28 jours n'était pas pertinente dans ce projet, d'une part parce que les BHP ont subi une cure thermique pour accélérer la production des dalles et des parapets, d'autre part parce que le BFUP introduit dans les parapets pouvait avoir une maturité très différente lors des essais structuraux (niches fabriquées peu de temps avant les essais structuraux).

Le [Tableau 17](#) indique que la résistance à la compression du BHP a été en moyenne de 50 MPa pour les différents spécimens. La résistance à la compression de la coque en BFUP des parapets hybrides a été d'environ 130 MPa, tandis que celle des niches a été de 100 MPa. Les niches en BFUP ayant une maturité de 2 à 3 semaines lors des essais structuraux, il était attendu que la résistance serait plus faible. Le [Tableau 18](#) présente le module élastique des bétons des différents spécimens. Les valeurs varient entre

30 et 38 GPa pour le BHP et entre 39 et 40 GPa pour le BFUP sont conformes aux attentes pour les échéances considérées.

Tableau 17 - Résistance à la compression des bétons

Spécimen	BHP Dalle *	BHP Parapet *
MTQ 301-1	46.8 MPa (94 j)	45.4 MPa (90 j)
MTQ 301-2	46.8 MPa (94 j)	45.4 MPa (90 j)

Spécimen	BHP Dalle *	BHP Cœur *	BFUP Coque	BFUP Niche
Niche fermée-1	55.5 MPa (98 j)	55.5 MPa (98 j)	134.7 MPa (77 j)	103.6 MPa (23 j)
Niche fermée-2	55.5 MPa (98 j)	51.0 MPa (93 j)	134.7 MPa (77 j)	107.9 MPa (17 j)
Niche ouverte-1	47.7 MPa (90 j)	47.7 MPa (90 j)	128.7 MPa (78 j)	99.6 MPa (21 j)
Niche ouverte-2	47.7 MPa (90 j)	52.8 MPa (85 j)	128.7 MPa (78 j)	100.8 MPa (21 j)

* : Béton ayant subi une cure thermique

Tableau 18 - Module élastique des bétons

Spécimen	BHPDalle*	BHPParapet*
MTQ 301-1	33.4 GPa (94 j)	30.0 GPa (90 j)
MTQ 301-2	33.4 GPa (94 j)	30.0 GPa (90 j)

Spécimen	BHPDalle*	BHPCœur*	BFUPCoque	BFUPNiche
Niche fermée-1	35.2 GPa (98 j)	35.2 GPa (98 j)	39.5 GPa (77 j)	40.9 GPa (23 j)
Niche fermée-2	35.2 GPa (98 j)	32.0 GPa (93 j)	39.5 GPa (77 j)	38.9 GPa (17 j)
Niche ouverte-1	37.4 GPa (90 j)	37.4 GPa (90 j)	40.1 GPa (78 j)	40.4 GPa (21 j)
Niche ouverte-2	37.4 GPa (90 j)	38.1 GPa (85 j)	40.0 GPa (78 j)	40.4 GPa (21 j)

* : Béton ayant subi une cure thermique

La résistance à la traction des bétons des différents spécimens a été mesurée par des essais Brésilien pour le BHP et par des essais de traction directe pour le BFUP. Les résultats sont résumés au **Tableau 19**. Les valeurs variant entre 2.7 et 3.5 MPa pour le BHP et entre 10.6 et 13.3 MPa pour le BFUP sont conformes aux attentes pour les échéances considérées. Les essais de traction directe permettant d'identifier les lois de comportement en traction complètes du BFUP, les courbes moyennes obtenues sont présentées à la **Figure 36** et à la **Figure 37** pour les différents spécimens d'essais. L'écroutissement en

traction des BFUP a ainsi varié entre 0.12 et 0.17 %. Ces courbes de comportement ont été introduites dans les modèles numériques au **Chapitre 6** pour reproduire le comportement mécanique des parapets.

Une mesure du coefficient d'orientation des fibres a été réalisée sur la coque en BFUP des parapets hybrides à niche ouverte de manière à caractériser le comportement en traction réel du BFUP à l'intérieur du parapet. De fait, il est fréquent de noter une différence d'orientation des fibres dans un élément structural par rapport aux spécimens de caractérisation qui sont plus petits et dont la mise en œuvre est faite différemment. La procédure d'évaluation du coefficient d'orientation des fibres est décrite dans Delsol (2011). Elle a consisté d'une part à prélever une carotte au centre des parapets dans le plan horizontal, conserver uniquement la partie de la carotte représentant la coque en BFUP, et scier la carotte dans le plan horizontal. La surface de la carotte a été numérisée et analysée avec un programme d'analyse d'images développé à l'École Polytechnique (Delsol, 2011). Le coefficient d'orientation moyen des fibres obtenu est de $\alpha = 37.6$. Le coefficient d'orientation a enfin été introduit dans un système d'équations pour retrouver la loi de comportement réelle du BFUP dans la coque des parapets hybrides à niche ouverte. Cette loi de comportement, nommée « Coque réelle », est illustrée à la **Figure 37**. Elle est moins favorable que celle mesurée dans les spécimens de caractérisation, et elle sera introduite dans les modèles numériques au **Chapitre 6**.

La résistance à la traction de l'interface cœur-coque dans les parapets hybrides est indiquée au **Tableau 20**. Les essais de résistance à la traction ont été réalisés sur des carottes extraites au centre des parapets et à mi-hauteur après les essais structuraux, il est donc possible que l'interface ait été endommagée pendant les essais structuraux et que des résistances moindres aient été mesurées par les essais de traction. La résistance à l'interface a varié de 2.1 à 2.3 MPa et la rupture est toujours survenue principalement dans le BHP.

Tableau 19 - Résistance à la traction des bétons

Spécimen	BHP Dalle * ¹	BHP Parapet * ¹		
MTQ 301-1	-	2.65MPa (139 j)		
MTQ 301-2	-	2.65MPa (139 j)		

Spécimen	BHP Dalle * ¹	BHP Cœur * ¹	BFUP Coque ²	BFUP Niche ²
Niche fermée-1	2.00 MPa (113 j)	2.00 MPa (113 j)	13.3 MPa (77 j)	12.0 MPa (23 j)
Niche fermée-2	2.00 MPa (113 j)	2.90MPa (87 j)	13.3 MPa (77 j)	11.5 MPa (17 j)
Niche ouverte-1	3.38MPa (91 j)	3.38MPa (91 j)	11.2 MPa (78 j)	10.6 MPa (21 j)
Niche ouverte-2	3.38MPa (91 j)	3.47MPa (86 j)	11.2 MPa (78 j)	11.0 MPa (21 j)

* : Béton ayant subi une cure thermique

¹ : Essai de traction Brésilien, ² : Essai de traction directe

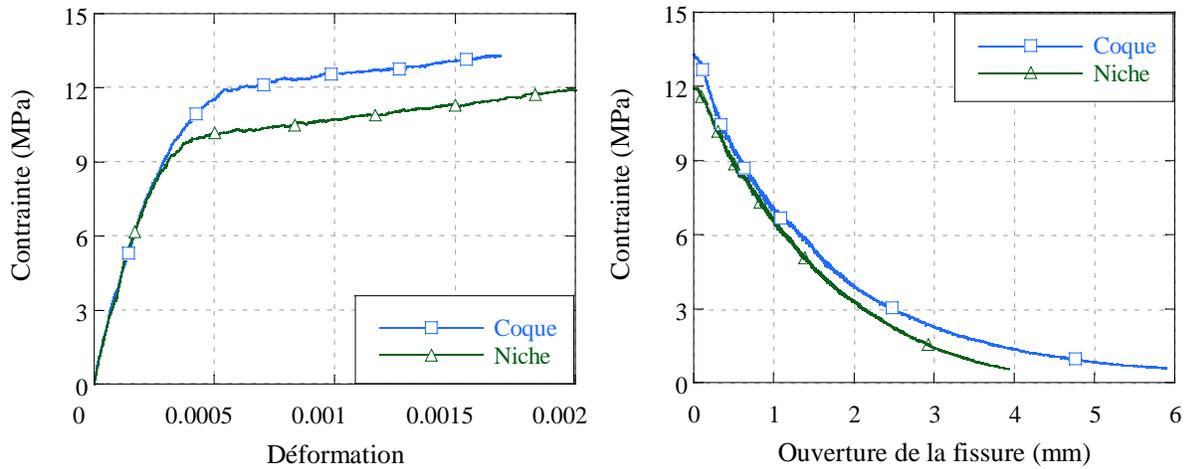


Figure 36 - Comportement en traction directe du BFUP dans les parapets à niche fermée, a) comportement pré-pic, b) comportement post-pic

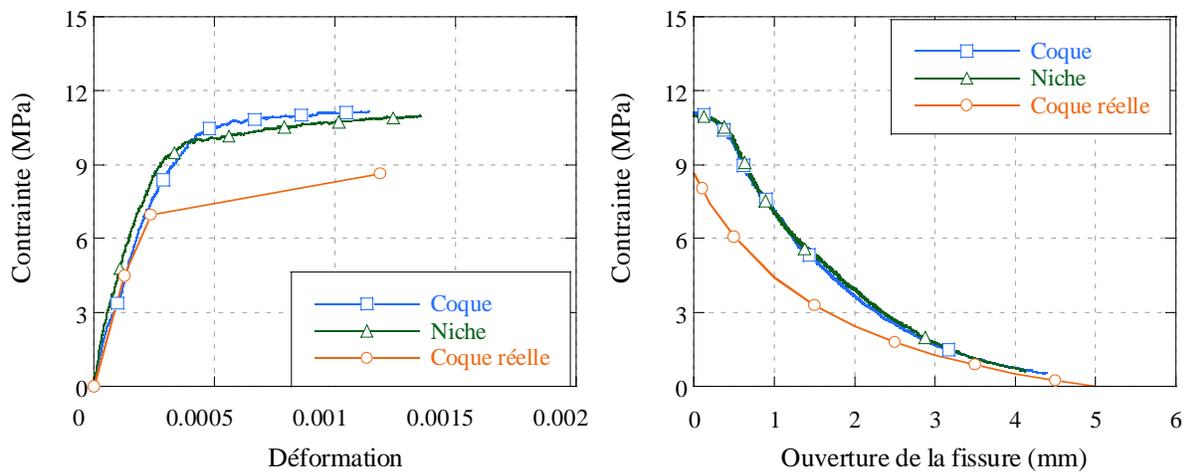


Figure 37 - Comportement en traction directe du BFUP dans les parapets à niche ouverte, a) comportement pré-pic, b) comportement post-pic

Tableau 20 - Résistance à la traction de l'interface cœur-coque dans les parapets hybrides

Spécimen	Résistance de l'interface cœur-coque (BHP-BFUP) ¹
Niche fermée	2.27 MPa
Niche ouverte	2.10 MPa

¹ : Essai de traction directe

5.1.2 Acier

Trois types d'armatures de nuance 400W ont été utilisées dans le cadre de ce projet, soit des barres 15M, 20M et 25M. Il est à noter que les barres d'un même type proviennent toutes du même lot. Ainsi le comportement en traction des barres d'un même type est constant dans tous les parapets. Les caractéristiques mécaniques des barres sont indiquées au **Tableau 21**. Les limites élastiques supérieures à 400 MPa et les modules élastiques équivalents à 200 GPa sont conformes aux attentes. Les courbes de comportement en traction des barres sont présentées à la **Figure 38**, elles ont été introduites dans les modèles numériques au **Chapitre 6** pour reproduire le comportement mécanique des parapets.

Tableau 21 - Résistance à la traction et module élastique des barres d'armature

Armature	f_y	f_u	E
15M	456 MPa	636 MPa	207 GPa
20M	469 MPa	572 MPa	205 GPa
25M	472 MPa	675 MPa	207 GPa

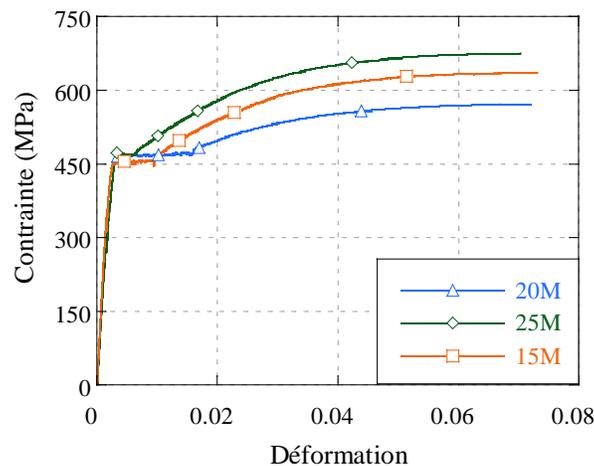


Figure 38 - Comportement en traction directe des armatures

5.2 PARAPETS MTQ 301

Les résultats expérimentaux obtenus sur les deux parapets MTQ type 301 sont résumés de la **Figure 39** à la **Figure 44**. La **Figure 39** présente la force appliquée en fonction du déplacement transversal mesuré dans l'axe du vérin, tandis que la **Figure 41** décrit le soulèvement entre le parapet et la dalle. La **Figure 42**

montre les déformations obtenues dans une armature d’ancrage au centre du parapet, à l’interface avec la niche. Enfin, la **Figure 43** et la **Figure 44** illustrent la fissuration observée en cours d’essai, les chiffres encadrés indiquent la force appliquée lors du recensement des fissures. Il importe de noter que, pour des questions de sécurité, des pauses étaient effectuées à chaque palier de chargement de 50 kN de manière à tracer les fissures. Ainsi, une fissure avec la cote 250 kN signifie qu’elle a été recensée lors de la pause à 250 kN, la fissure est donc apparue entre 200 et 250 kN.

L’analyse du comportement force-flèche des parapets MTQ type 301 montre un comportement linéaire élastique jusqu’à environ 150 kN, ensuite une non-linéarité est observée avec l’apparition de fissures dans les parapets (**Figure 39**). Un changement de régime est observé à 480 kN, car la plastification des barres d’ancrage est atteinte avec une déformation de $2345 \mu\epsilon$ représentant la limite élastique de 469 MPa des barres M20 (**Figure 42**). La résistance maximale mesurée est de 525 à 550 kN selon les parapets, soit une valeur largement supérieure à la force transversale pondérée exigée par le Code S6-2006 (357 kN). La ductilité observée à partir de la plastification des armatures est adéquate. La différence dans la rigidité des deux spécimens peut être expliquée par le fait que la dalle du premier parapet a été davantage endommagée avec l’application d’une post tension plus élevée avant l’essai (**Figure 40**). L’endommagement est principalement relié à la présence de certains points durs (non aplanis) sous la dalle lors de l’application de la précontrainte. Des fissures ont ainsi été notées sur la dalle et, bien qu’elles n’étaient pas visibles ailleurs, elles se sont peut-être propagées dans la face avant du parapet.

Les parapets se sont soulevés de 1.9 mm et 4.8 mm respectivement par rapport à la dalle lors de la plastification des barres d’ancrage et lors de l’atteinte de la résistance maximale (**Figure 41**). Il s’agit de soulèvements assez importants. Enfin, la fissuration observée sur les parapets indique que 2 fissures longitudinales de flexion se sont propagées au quart et à mi-hauteur des parapets à 150 et 250 kN respectivement (**Figure 43** et **Figure 44**). Une dernière fissure longitudinale de flexion-cisaillement est apparue au trois quart de la hauteur des parapets, il s’agit du plan de rupture final observé.

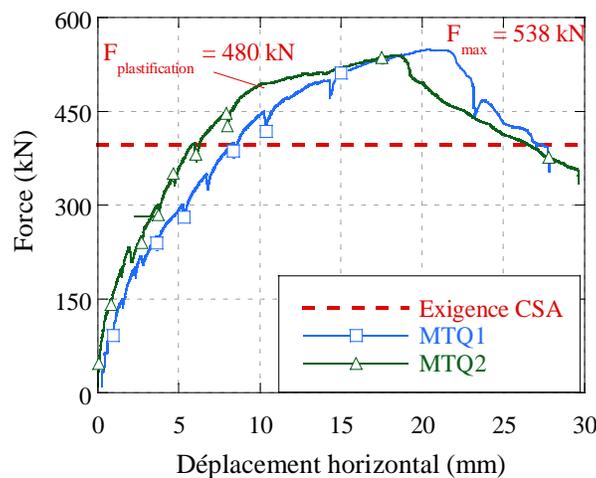


Figure 39 - Évolution de la charge en fonction de la flèche du parapet MTQ 301

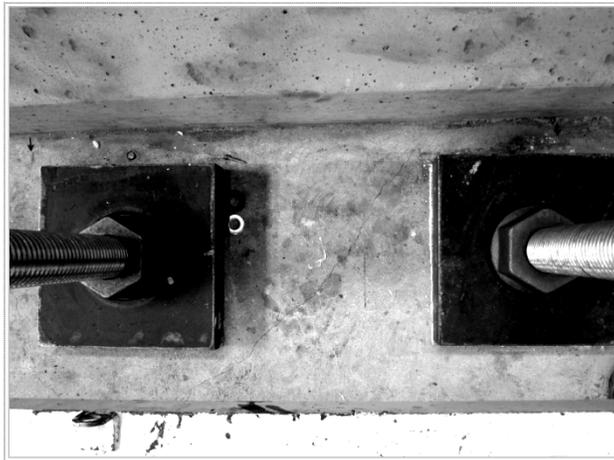


Figure 40 - Fissures notées sur la dalle du parapet MTQ 301-1

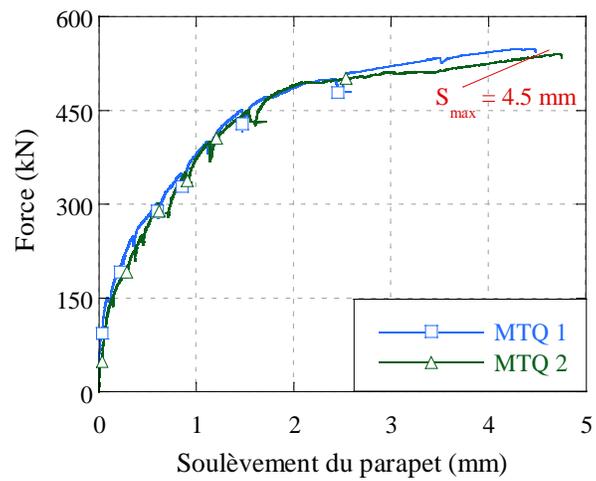


Figure 41 - Évolution de la charge en fonction du soulèvement du parapet MTQ 301

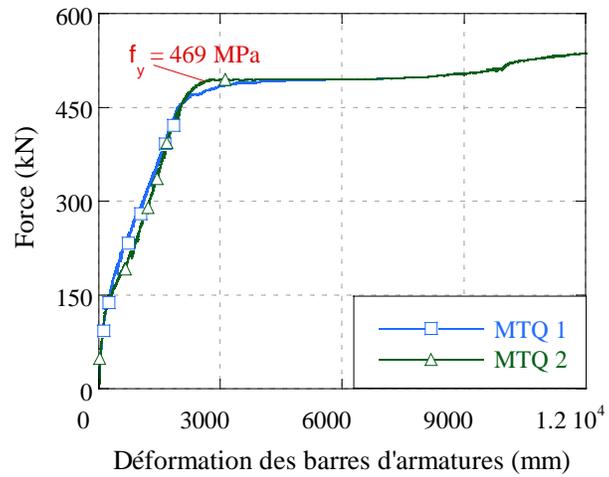


Figure 42 - Évolution de la charge en fonction de la déformation dans les armatures d'ancrage du parapet MTQ 301

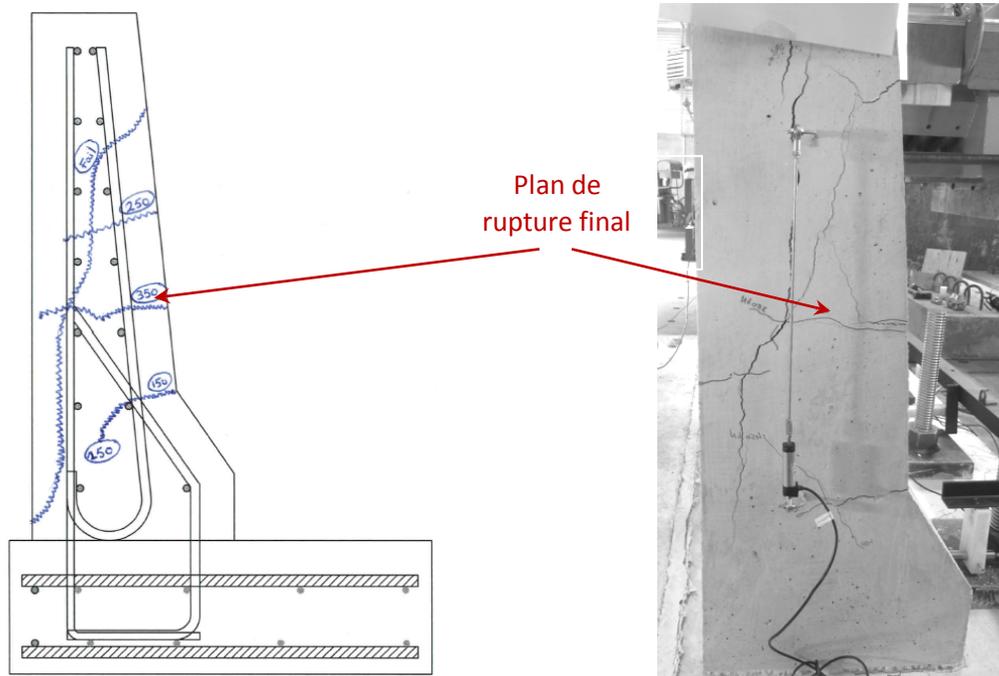
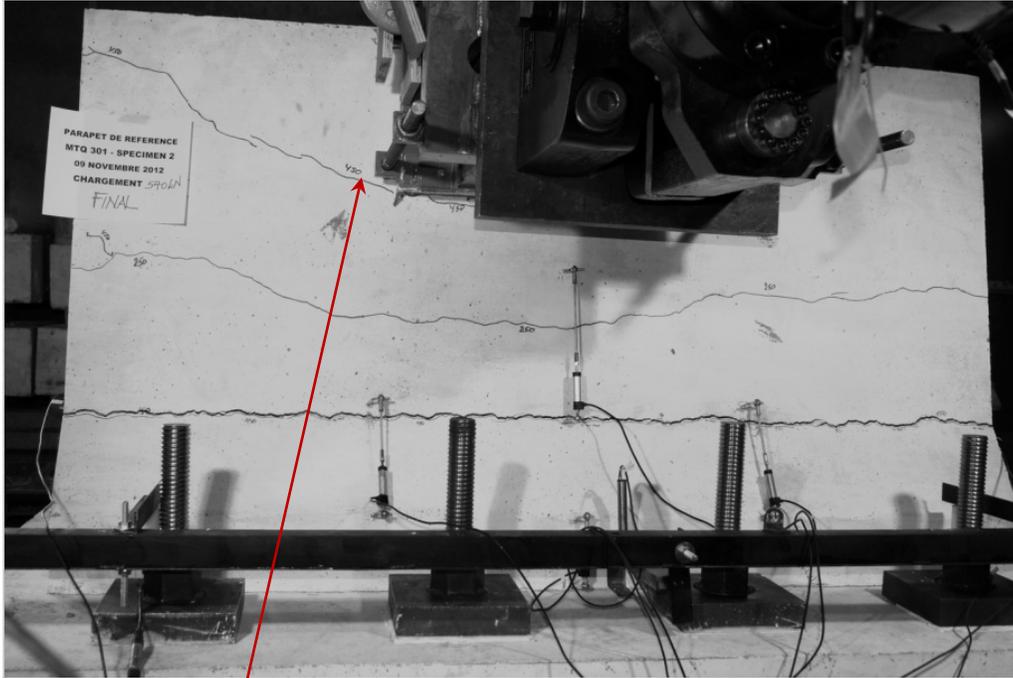


Figure 43 - Fissuration à l'ultime du parapet MTQ 301 n°2 (vue de côté)



Plan de rupture final

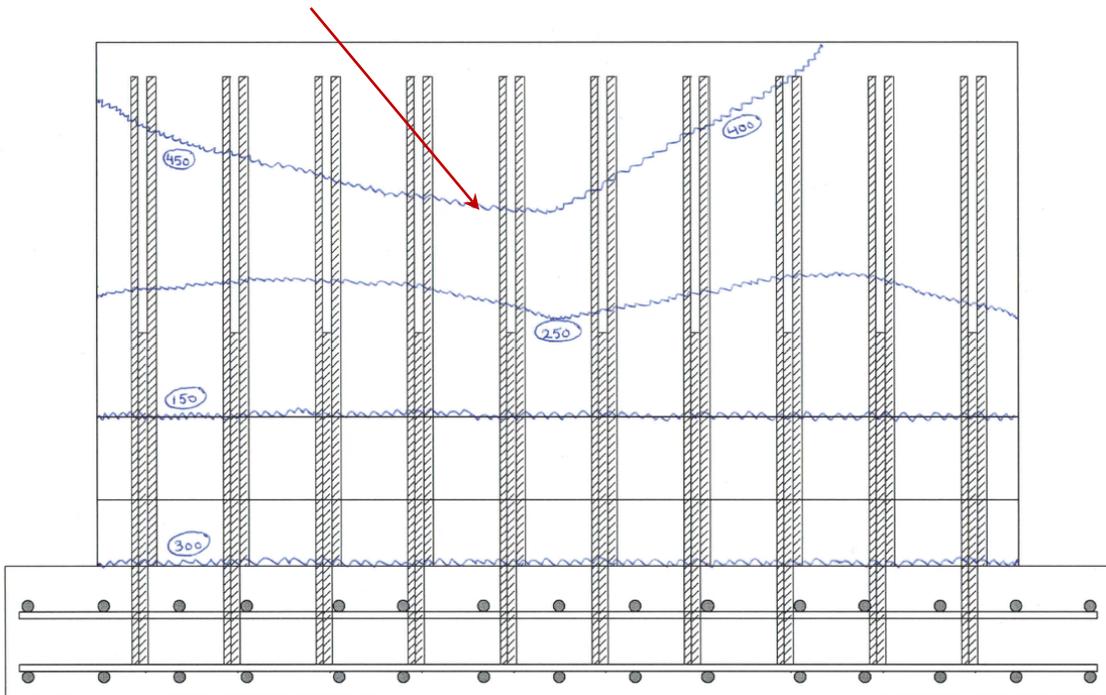


Figure 44 - Fissuration à l'ultime du parapet MTQ 301 n°2 (vue de face)

5.3 PARAPET HYBRIDE NICHE FERMÉE

Les résultats expérimentaux obtenus sur les deux parapets hybrides à niche fermée sont résumés de la **Figure 45** à la **Figure 49**. La **Figure 45** présente la force appliquée en fonction du déplacement transversal mesuré dans l'axe du vérin, tandis que la **Figure 46** décrit le soulèvement entre le parapet et la dalle. La **Figure 47** montre les déformations obtenues dans les armatures d'ancrage du parapet et de la dalle, dans les deux cas les jauges étaient situées à l'interface avec la niche. Enfin, la **Figure 48** et la **Figure 49** illustrent la fissuration observée en cours d'essai, les chiffres encadrés indiquent la force appliquée lors du recensement des fissures.

L'analyse du comportement force-flèche des parapets hybrides à niche fermée montre un comportement linéaire élastique jusqu'à environ 50 à 100 kN, ensuite une non-linéarité est observée sans l'apparition de fissure localisée sur la surface extérieure en BFUP des parapets (**Figure 48** et **Figure 49**). La résistance maximale mesurée est d'environ 260 kN selon les parapets, soit une valeur très inférieure à la force transversale pondérée exigée par le Code S6-2006 (357 kN). Ce résultat inattendu s'explique par le développement vers 190 kN d'une fissuration interne à l'interface des barres transversales dans les parapets (**Figure 48**). Cette fissuration est due aux efforts de traction générés dans le béton par le dépliement des barres transversales sous l'effet de la force transversale, ces efforts ne pouvaient pas être reproduits par les modèles numériques lors de la conception. Cet aspect sera discuté au **Chapitre 6**. Une fois ce mécanisme activé, les déformations dans les armatures transversales cessent de croître (**Figure 47**), et la coque en BFUP débute un mouvement de rotation autour du noyau en BO qui crée le plan de fissuration final au quart de la hauteur du parapet (**Figure 49**). Malgré le fait que les armatures n'étaient pas actives dans le plan de rupture final, la chute de force mesurée sur les parapets est graduelle grâce à la ductilité procurée par la coque en BFUP.

Étant donné la faible résistance maximale obtenue avec le concept de parapet hybride à niche fermée, son utilisation nécessiterait une modification importante, soit l'élimination ou la modification du pliage des barres transversales près de la niche pour éviter le développement d'une fissuration à l'interface de ces barres. La modification du pliage des barres nécessiterait probablement de repenser le concept d'ancrage de ce type de parapet.

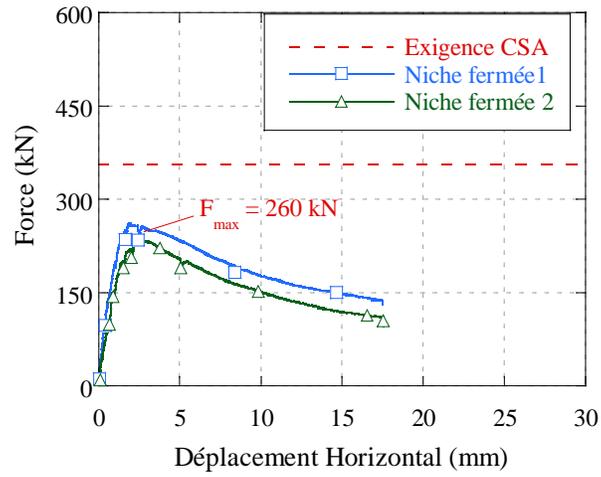


Figure 45 - Évolution de la charge en fonction de la flèche du parapet hybride niche fermée

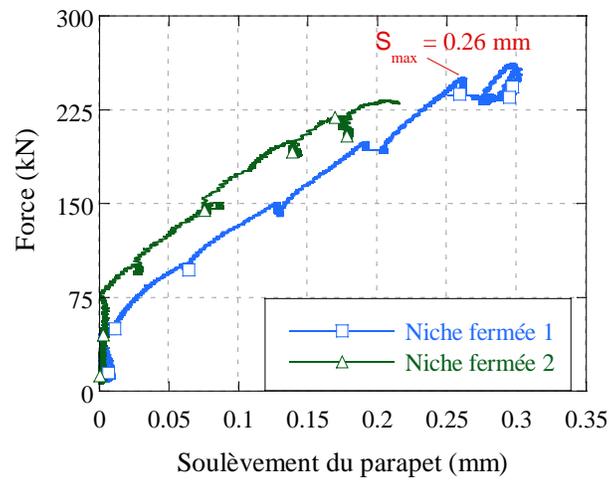


Figure 46 - Évolution de la charge en fonction du soulèvement du parapet hybride niche fermée

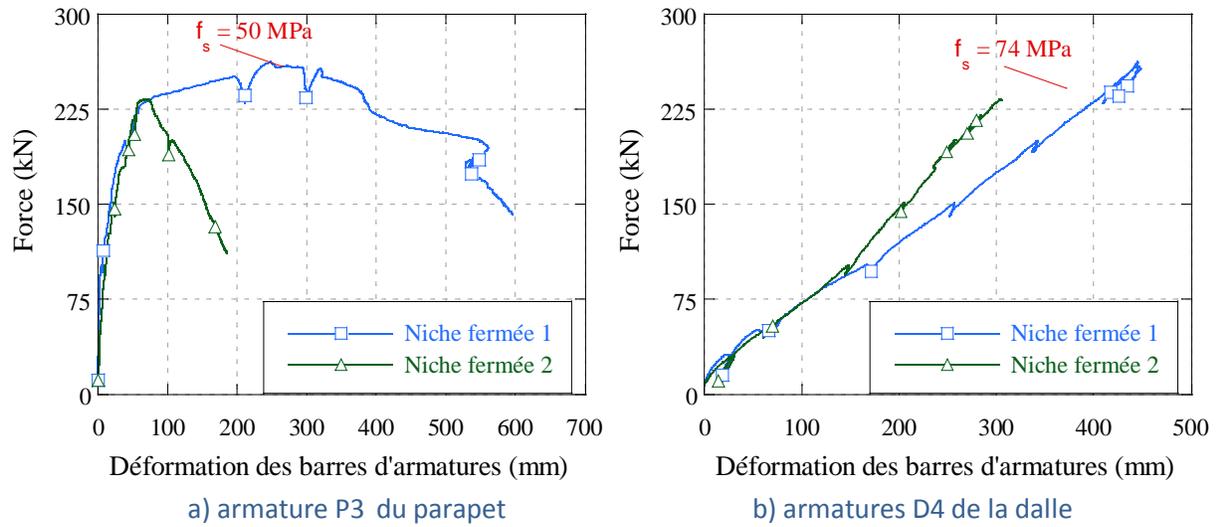


Figure 47 - Évolution de la charge en fonction de la déformation dans les armatures d'ancrage du parapet hybride niche fermée

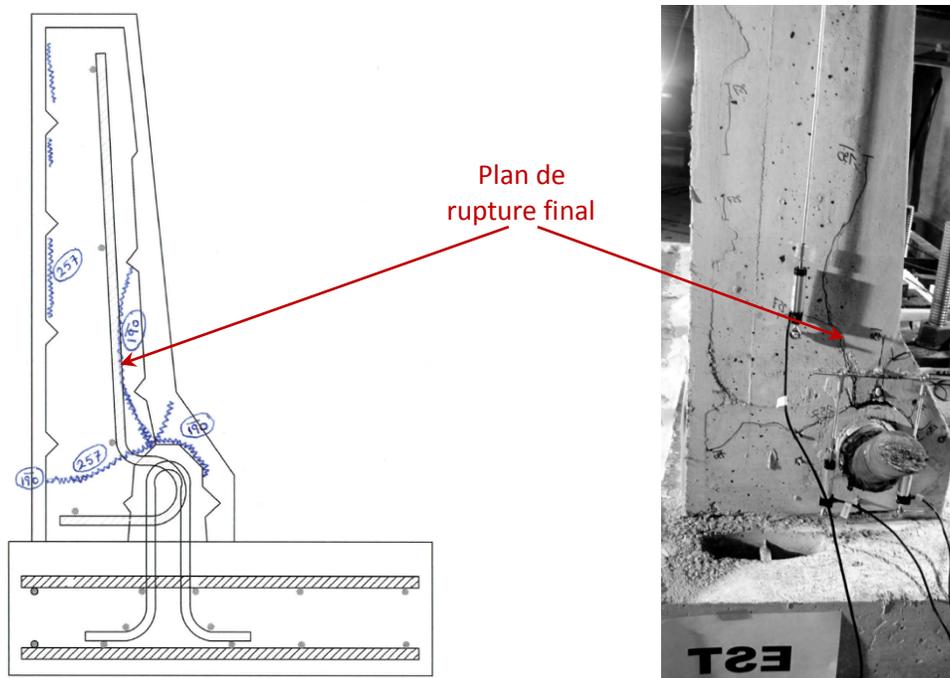
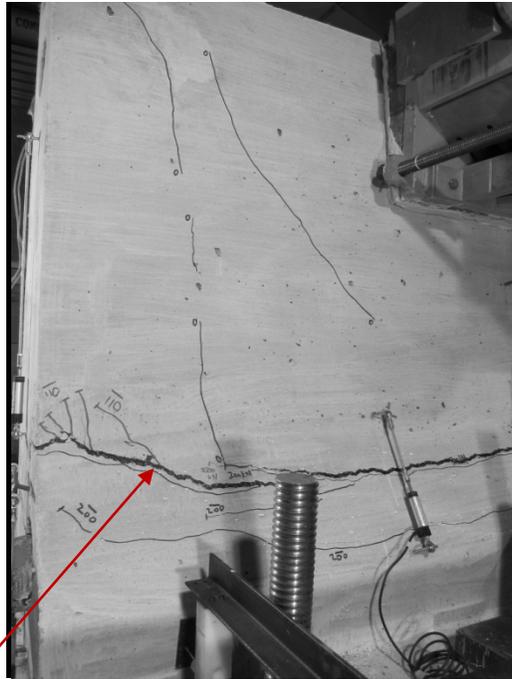


Figure 48 - Fissuration à l'ultime du parapet hybride niche fermée n°1 (vue de côté)



Plan de rupture final

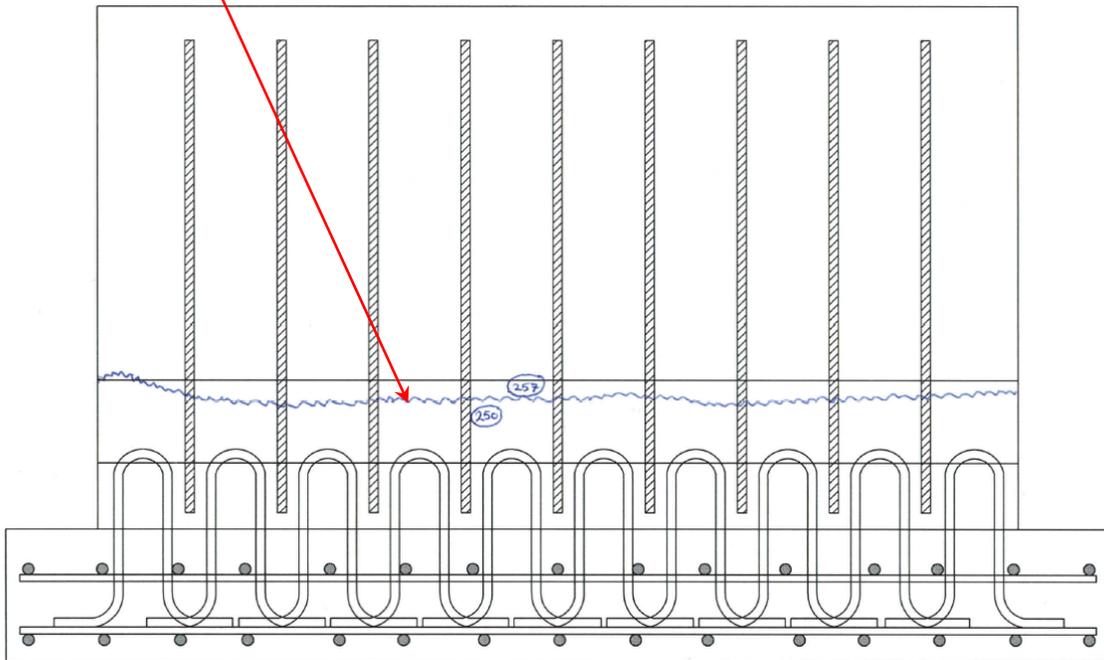


Figure 49 - Fissuration à l'ultime du parapet niche fermée n°1 (vue de face)

5.4 PARAPET HYBRIDE NICHE OUVERTE

Les résultats expérimentaux obtenus sur les deux parapets hybrides à niche ouverte sont résumés de la **Figure 50** à la **Figure 54**. La **Figure 50** présente la force appliquée en fonction du déplacement transversal mesuré dans l'axe du vérin, tandis que la **Figure 51** décrit le soulèvement entre le parapet et la dalle. La **Figure 47** montre les déformations obtenues dans les armatures d'ancrage du parapet et de la dalle, dans les deux cas les jauges étaient situées à l'interface avec la niche. Enfin, la **Figure 53** et la **Figure 54** illustrent la fissuration observée en cours d'essai, les chiffres encadrés indiquent la force appliquée lors du recensement des fissures.

L'analyse du comportement force-flèche des parapets hybrides à niche ouverte montre un comportement linéaire élastique jusqu'à environ 200 kN, ensuite une non-linéarité est observée avec l'apparition de fines fissures dans les parapets à environ 400 kN (**Figure 50**). La résistance maximale mesurée est de 550 à 580 kN selon les parapets, soit une valeur largement supérieure à la force transversale pondérée exigée par le Code S6-2006 (357 kN). La rupture observée présente un peu moins de ductilité que le parapet de référence. Ceci s'explique possiblement par le fait que les armatures d'ancrage du parapet et de la dalle n'ont pas atteint la plastification (déformations inférieures à $2345 \mu\epsilon$ représentant la limite élastique de 469 MPa des barres M20, **Figure 52**). Ce résultat démontre que la niche en BFUP, en partie confinée par la dalle, performe au-delà des attentes et limite le niveau de contrainte développé dans les barres d'ancrage. Puisque la plastification des barres d'ancrage est retardée, le mode de rupture final est déplacé vers le haut du parapet. Cet aspect sera discuté dans le **Chapitre 6** sur les modélisations numériques.

La fissuration observée sur les parapets indique que 2 fissures longitudinales de flexion se sont propagées au quart et à mi-hauteur des parapets à 400 et 550 kN respectivement (**Figure 53** et **Figure 54**). Le plan de rupture final est survenu à mi-hauteur des parapets. Enfin, les parapets se sont soulevés d'au maximum 0.8 mm par rapport à la dalle à la résistance maximale (**Figure 51**). Le soulèvement est faible en comparaison à celui mesuré sur les parapets MTQ 301, ceci s'explique par l'effet de confinement de la dalle sur la niche et l'excellente performance de la niche en BFUP qui n'a présenté aucune fissuration en fin d'essai.

La performance mécanique présentée par le concept de parapet hybride à niche ouverte est très satisfaisante. La rupture un peu moins ductile du parapet hybride à niche ouverte ne pose pas vraiment de problème, puisque que la sur-résistance appréciable du parapet, par rapport à l'exigence du Code de 357 kN, garantit que le parapet ne devrait jamais atteindre la résistance maximale. Dans l'éventualité où une rupture un peu plus ductile est désirée, des modifications simples pourraient être apportée au parapet pour provoquer la plastification des armatures dans la niche; soit épaissir légèrement la paroi supérieure de la coque en BFUP, modifier légèrement la position des armatures dans le haut du parapet, ou enfin réduire la quantité d'armature d'ancrage. La dernière proposition semble plus attrayante puisqu'elle implique une réduction du coût du parapet, elle sera donc vérifiée au **Chapitre 6** à l'aide des modélisations numériques.

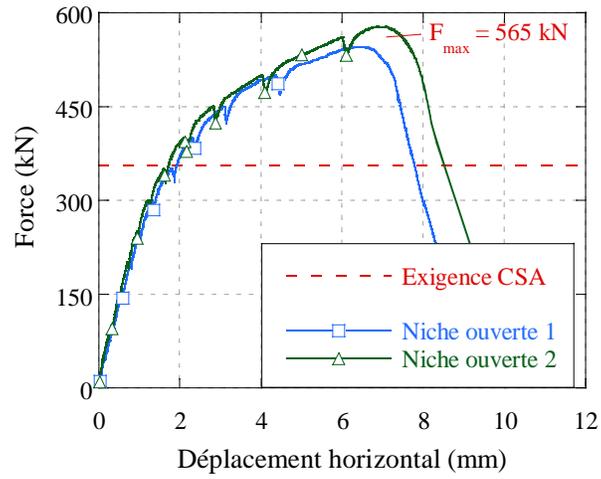


Figure 50 - Évolution de la charge en fonction de la flèche du parapet hybride niche ouverte

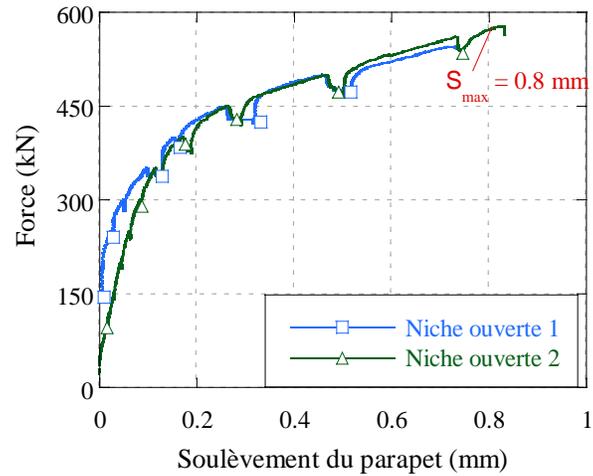


Figure 51 - Évolution de la charge en fonction du soulèvement du parapet hybride niche ouverte

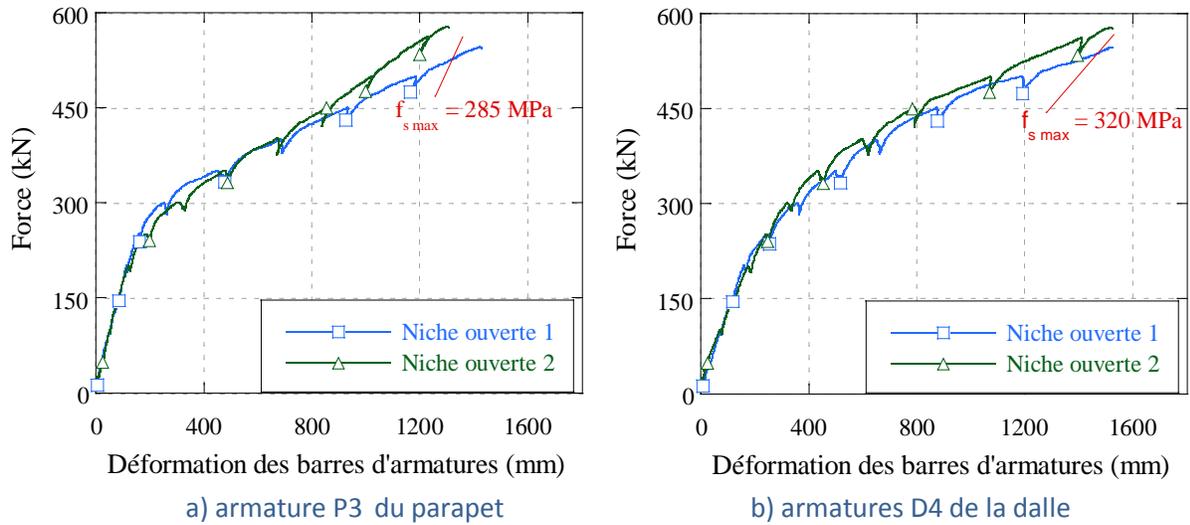


Figure 52 - Évolution de la charge en fonction de la déformation dans les armatures d'ancrage du parapet hybride niche fermée

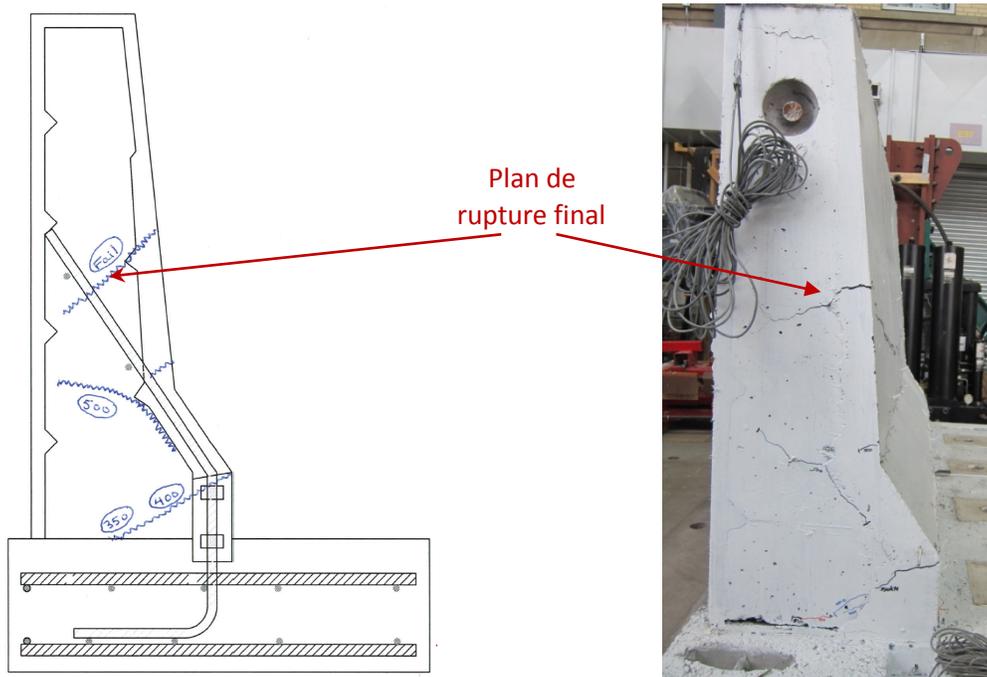
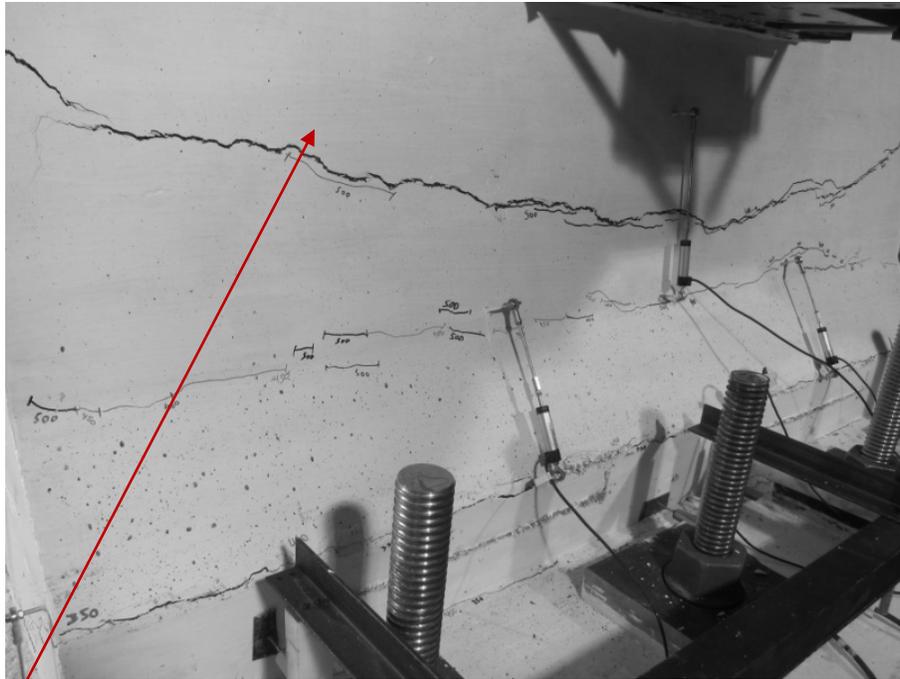


Figure 53 - Fissuration à l'ultime du parapet hybride niche ouverte n°1 (vue de côté)



Plan de rupture final

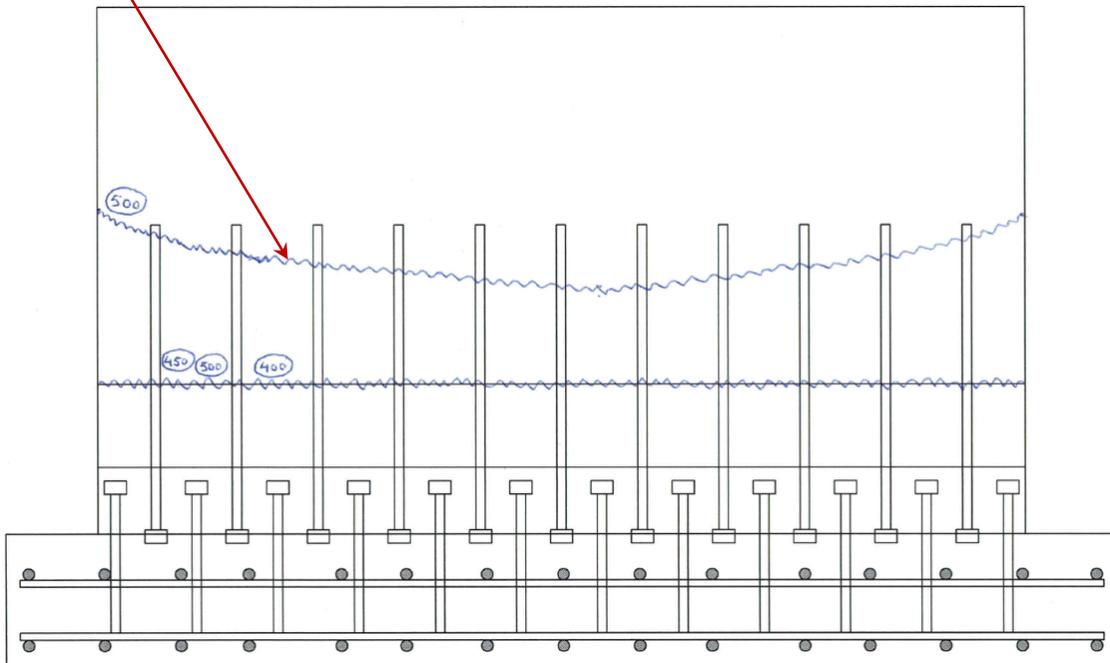


Figure 54 - Fissuration à l'ultime du parapet hybride niche ouverte n°1 (vue de face)

5.5 COMPARAISON DES RÉSULTATS

Afin de comparer la performance mécanique des différents parapets testés en laboratoire, le **Tableau 22** résume les résistances, déplacements et soulèvements maximaux atteints lors des essais. De même, le **Tableau 23** montre les contraintes atteintes dans les armatures d’ancrage pour les différents parapets à des niveaux de force de 250 kN et 550 kN.

Tout d’abord, la résistance maximale atteinte par le parapet MTQ-301 et le parapet hybride à niche ouverte ont présenté une résistance maximale d’environ 45 % supérieur à la force pondérée de conception du code CSA-S6-06. Le surcroît de résistance de ces deux configurations est donc très significatif. IL importe de rappeler que la résistance maximale a aussi été mesurée sur des éléments de 2 m de longueur, alors que cette longueur serait plus grande en chantier (parapet continu pour le parapet MTQ-301, parapet de 4 m avec ou sans clé de cisaillement pour le parapet préfabriqué hybride). Ces deux configurations de parapets sont donc très sécuritaires.

On constate également que pour un niveau de résistance maximal similaire, le parapet hybride à niche ouverte présente un déplacement transversal et un soulèvement significativement plus petits. De plus, le niveau des contraintes mesurées dans les armatures d’ancrage à 550 kN sont inférieures dans le parapet hybride à niche ouverte. Ces observations confirment que le confinement exercé par la dalle sur la niche ouverte est très efficace, et que le comportement mécanique de la niche en BFUP est excellent pour transférer les efforts du parapet à la dalle.

Tableau 22 - Comportement mécanique des parapets PL-3

Paramètre	MTQ type 301	Hybride niche fermée	Hybride niche ouverte
Résistance maximale	538 kN	250 kN	565 kN
Déplacement maximal	20 mm	4 mm	7 mm
Soulèvement maximal	4.5 mm	0.33 mm	0.8 mm

Tableau 23 - Contrainte dans les armatures d’ancrage des parapets PL-3

Niveau de sollicitation	MTQ type 301	Hybride niche fermée		Hybride niche ouverte	
	Dalle	Dalle	Parapet	Dalle	Parapet
Force =250 kN	235 MPa	50 MPa	74 MPa	59 MPa	47 MPa
Force =550 kN	≥ 469 MPa	-	-	320 MPa	285 MPa

La performance mécanique inadéquate des parapets hybrides à niche fermée est reliée aux forces de traction générées par le dépliement des armatures transversales (cadres) M20 qui a mené à une fissuration à leur interface. Cette fissuration a localisé la rupture de ces parapets dans une zone sans armature, d'où le faible niveau de contrainte mesuré dans les barres à la rupture par rapport aux autres types de parapets (**Tableau 23**).

Le comportement en service des parapets PL-3 s'évalue pour un chargement de 210 kN selon le Code S6-2006 (**Tableau 13**). À cette intensité de force, le soulèvement du parapet hybride à niche ouverte serait d'environ 0.04 mm, ce qui signifie une ouverture de fissure à l'interface parapet-dalle de 0.04 mm (**Figure 51**). De plus, aucune fissure localisée n'est visible sur la face avant et arrière du parapet en-deçà de 210 kN (**Figure 54**). Étant donné cet état de fissuration en service négligeable, le concept de parapet hybride à niche ouverte présentera une durabilité en service exceptionnelle contre la pénétration d'eau et d'agents agressifs dans le béton. Pour le parapet MTQ 301, le soulèvement et donc l'ouverture de fissure à l'interface parapet-dalle est de 0.2 à 0.3 mm pour un chargement de 210 kN (**Figure 41**). De plus, une fissure longitudinale localisée de 0.1 à 0.2 mm est observée sur toute la longueur du parapet à 150 kN (**Figure 44**). Le niveau de protection offert par le parapet MTQ sera donc clairement inférieur à celui du parapet hybride à niche ouverte.

5.6 CONCLUSION

Les observations réalisées lors des essais quasi-statiques sur les parapets ont menées aux constatations suivantes. Tout d'abord, le parapet MTQ 301 performe très bien à l'ultime, il présente une résistance maximale de 44 % supérieure à celle exigée par le Code S6-2006 et une rupture ductile. Son comportement en service avec des ouvertures de fissure allant jusqu'à 0.3 mm pourrait accélérer la pénétration d'eau et d'agents agressifs dans le béton et éventuellement une détérioration dans le temps.

Ensuite, le parapet hybride à niche fermée ne performe pas adéquatement, car une fissuration interne se localise à l'interface des barres transversales. Ceci rend les barres transversales inactives pour reprendre des efforts supérieurs à 260 kN, en plus celles-ci n'interviennent pas dans le plan de fissuration final. Pour performer adéquatement, ce concept devrait être modifié de manière à éviter le pliage des barres transversales à proximité de la niche d'ancrage.

Enfin, le parapet hybride à niche ouverte présente une excellente performance à l'ultime et en condition de service. La résistance maximale atteinte surpasse de 47 % les exigences du Code S6-2006, toutefois la rupture finale est peu moins ductile que le parapet MTQ-301. La rupture un peu moins ductile ne pose pas de problème, puisque que la sur-résistance garantit que le parapet n'atteindra jamais la rupture. Dans l'éventualité où une rupture un peu plus ductile est désirée, il est proposé de réduire la quantité d'armature d'ancrage pour favoriser leur plastification dans le processus de rupture. Enfin, la fissuration

négligeable (inférieure à 0.04 mm) présentée par le parapet en conditions de service assurera une durabilité exceptionnelle sous des conditions d'exposition sévères.

6 RÉSULTATS MODÉLISATIONS NUMÉRIQUES

Ce chapitre présente d'abord les caractéristiques des modèles numériques développés pour reproduire le comportement mécanique des parapets étudiés dans ce projet de recherche. Ensuite les résultats des modélisations numériques sont décrits et comparés aux résultats expérimentaux.

6.1 MODÈLES NUMÉRIQUES

6.1.1 Logiciel et modèle constitutif du béton

Les modélisations numériques des parapets ont été réalisées à l'aide de la version 4.3.1 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 écroissant 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 (Cervenka et al. 2012) :

- 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 écroissante avant d'atteindre la résistance à la compression f'_c , 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 E_c obtenues des essais de caractérisation menés 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 (σ_t/f'_t) en fonction des déformations (ε), tel qu'illustré à la **Figure 55**. Lors de la définition de cette loi, une déformation de localisation de la fissuration, ε_t^{loc} peut être spécifiée. Celle-ci permet de séparer le comportement écroissant 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 ε_t^{loc} , la déformation est évaluée à l'aide de l'Équation 3, pour laquelle ε_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 56), et L_t^{ch} la longueur caractéristique (prise égale à la dimension du maillage selon des études précédentes (Beaurivage 2009; Duscheneau 2010; Delsol 2012)).

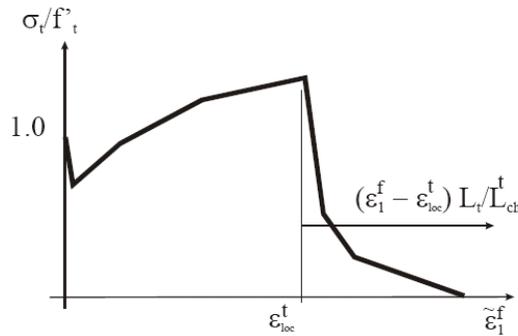


Figure 55 – Exemple d'une loi constitutive en traction définie par l'utilisateur du matériau *CC3DNonLinCementitious2User* (Cervenka et al., 2012)

$$\tilde{\varepsilon}_1^f = \varepsilon_{loc}^f + (\varepsilon_1^f - \varepsilon_{loc}^f) \frac{L_t}{L_{ch}^t}$$

Équation 3

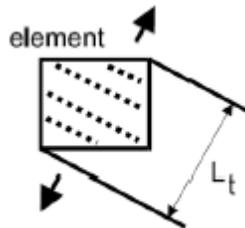


Figure 56 - Largeur de bande de fissuration L_t (Cervenka et al., 2012)

Les parapets sont modélisés avec un modèle à fissures tournantes (rotated crack model), ce qui signifie que la direction des contraintes principales coïncide avec celle des déformations principales.

6.1.2 Propriétés des matériaux

Les **Tableau 24** et **Tableau 25** regroupent les données utilisées dans le modèle constitutif de béton, respectivement pour la modélisation du parapet de référence (MTQ 301), du parapet hybride à niche ouverte ainsi que du parapet hybride à niche fermée. Pour chacun des bétons constituant les parapets (BHP des parapets et dalles, BFUP 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 ε_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 trois types de parapets sont illustrés aux **Figure 57**, **Figure 58** et **Figure 59**, respectivement pour le parapet de référence, le parapet hybride à niche fermée et le parapet hybride à niche ouverte. Ces figures sont subdivisées en deux graphiques, l'un présentant le comportement pré-pic en déformation, l'autre présentant le comportement post-pic en ouverture de fissure. Les propriétés utilisées, en traction et en compression, proviennent des essais de caractérisation effectués sur les différents bétons et dont les résultats sont présentés à la **Section 5.1.1**.

Tel que mentionné à la **Section 5.1.1** du présent rapport, l'analyse d'une partie de carotte extraite dans le plan horizontal des parapets hybrides, et représentant la coque en BFUP, a montré que l'orientation des fibres dans la coque était plus défavorable que l'orientation préférentielle retrouvée dans les spécimens de caractérisation, de par leur différence de taille et de mise en œuvre. Cette orientation plus défavorable dans le BFUP constituant la coque du parapet en réduit les propriétés en traction. La loi réduite, nommée « coque réelle » (**Figure 58** et **Figure 59**) a été utilisée pour les modélisations numériques.

Tableau 24 - Propriétés des bétons composant le parapet de référence MTQ 301

Propriétés	BHP dalle	BHP parapet
Module élastique E_c (MPa)	33400	30 000
Résistance à la traction f_t (MPa)	2.74	2.70
Résistance à la compression f'_c (MPa)	46.8	45.4
Taille caractéristique en traction L'_{ch} (mm)	30	30
Déformation de la localisation $\varepsilon_t^{loc}(-)$	0	0

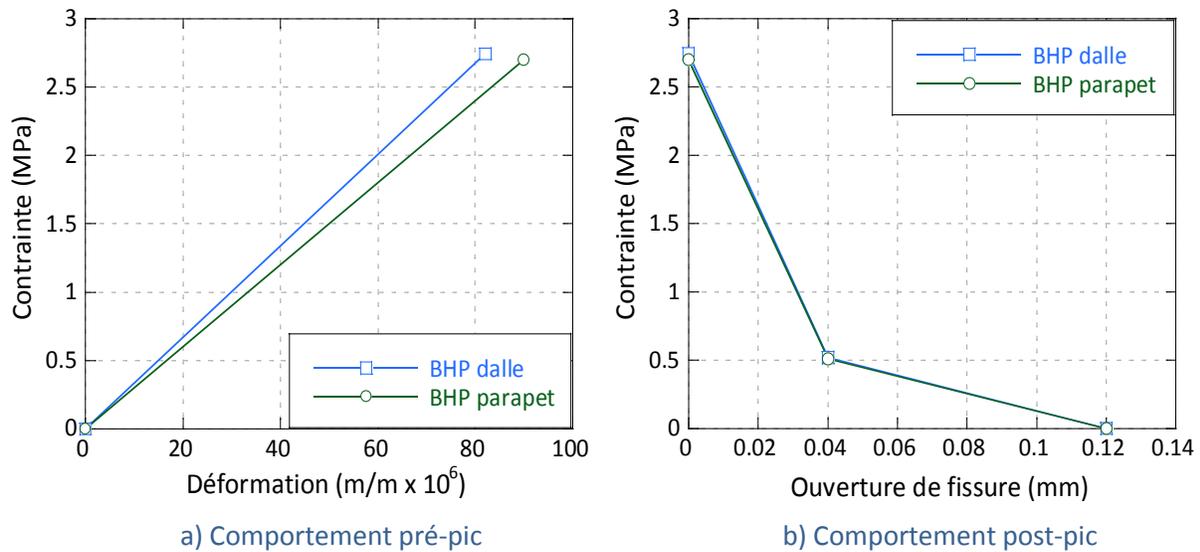


Figure 57 - Comportement en traction des bétons du parapet de référence MTQ 301

Tableau 25 - Propriétés des bétons composant le parapet hybride à niche fermée

Propriétés	BHP dalle	BHP cœur	BFUP coque	BFUP coque réelle	BFUP niche
Module élastique E_c (MPa)	35161	35161	39527	39527	40946
Résistance à la traction f_t (MPa)	2.98	2.98	13.3	8.19	11.33
Résistance à la compression f'_c (MPa)	55.5	55.5	134.7	134.7	103.6
Taille caractéristique en traction L'_{ch} (mm)	30	30	100	100	35
Déformation de la localisation $\varepsilon_t^{loc}(-)$	0	0	1.69E-3	1.04E-3	1.34E-3

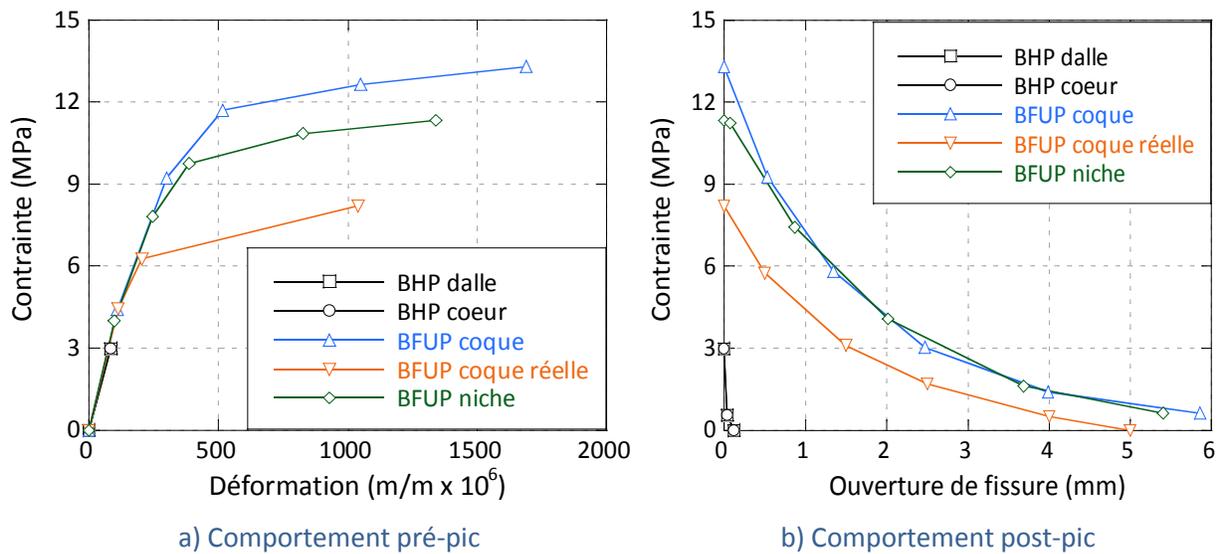


Figure 58 - Comportement en traction des bétons du parapet hybride avec niche fermée

Tableau 26 - Propriétés des bétons composant le parapet hybride à niche ouverte

Propriétés	BHP dalle	BHP cœur	BFUP coque	BFUP coque réelle	BFUP niche
Module élastique E_c (MPa)	37421	38111	40054	40054	40372
Résistance à la traction f_t (MPa)	2.76	2.91	11.14	8.19	11.52
Résistance à la compression f'_c (MPa)	47.7	52.8	128.7	128.7	100.8
Taille caractéristique en traction L_{ch}^t (mm)	30	30	100	100	35
Déformation de la localisation $\varepsilon_t^{loc}(-)$	0	0	1.13E-3	1.04E-3	1.73E-3

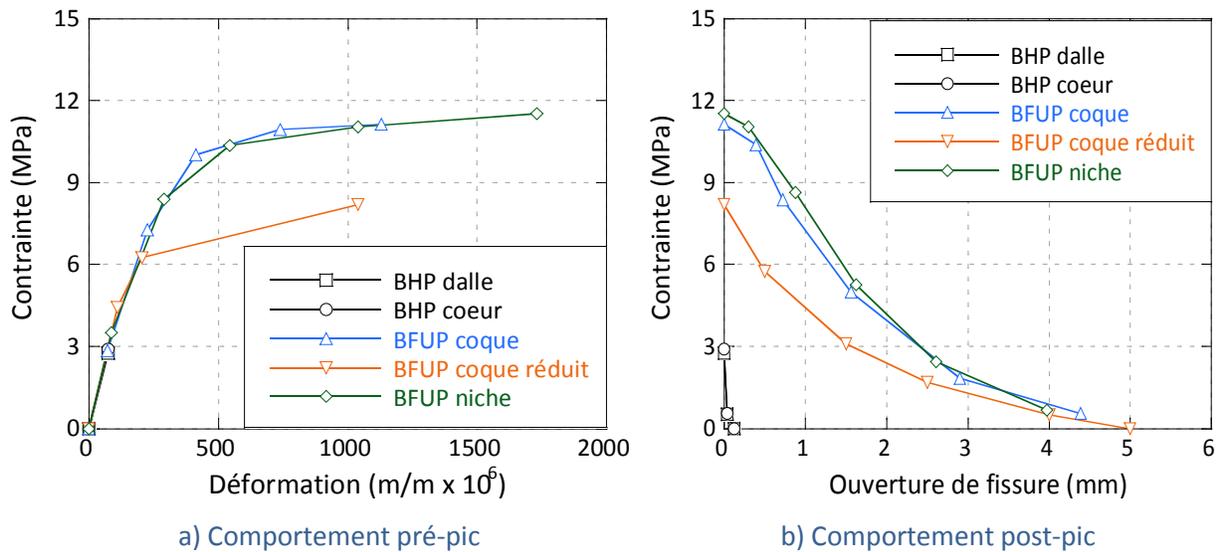


Figure 59 - Comportement en traction des bétons du parapet hybride à niche ouverte

Les aciers d'armature ont été modélisés à l'aide du matériau *Reinforcement*. Leur comportement en traction, illustré à la **Figure 60**, suit un comportement multilinéaire et diffère selon le diamètre de barre. Ces courbes reproduisent fidèlement les courbes expérimentales présentées au **Chapitre 5**.

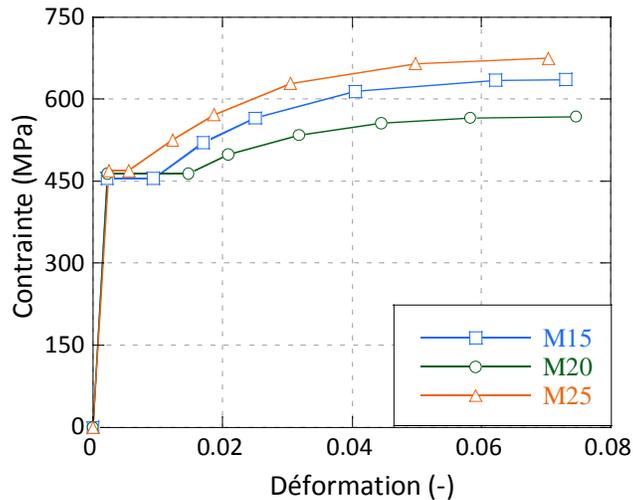
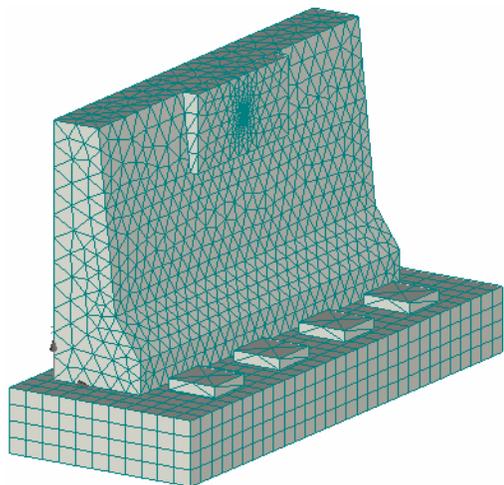


Figure 60 - Comportement en traction des aciers d'armature

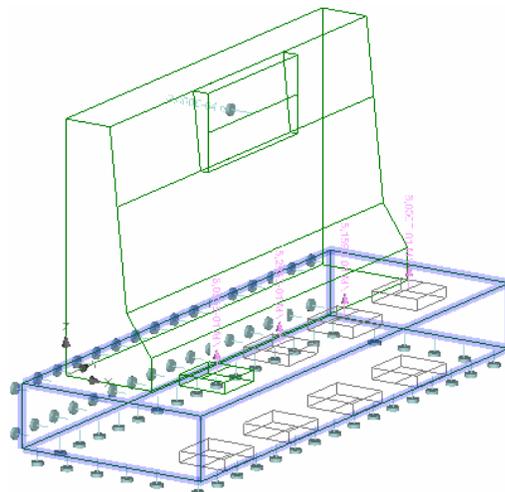
6.1.3 Éléments finis, maillage et méthode de résolution

Les **Figure 61a**, **Figure 62a** et **Figure 63a** illustrent les maillages choisis pour modéliser respectivement le parapet de référence (MTQ 301), le parapet hybride à niche fermée et le parapet hybride à niche ouverte. Les modèles de parapets utilisent majoritairement des éléments solides 3D tétraédriques à un point d'intégration (**Figure 64a**), excepté pour le maillage des dalles du parapet de référence et du parapet hybride à niche fermée pour lesquelles la forme géométrique régulière permet l'utilisation d'éléments solides 3D brick à 8 points d'intégration (**Figure 64b**). Les dimensions de maillage, qui diffèrent selon les parties des parapets (dalle, cœur, coque ou niche), sont résumées au **Tableau 27**. Un raffinement de maillage a été effectué autour du point d'application de la charge ainsi qu'au niveau des surfaces cœur-niche et de la surface extérieure de la niche.

La méthode d'intégration numérique de Gauss est utilisée avec des fonctions d'interpolation linéaires. La méthode de résolution de calculs à longueur d'arc (arc-length) a été utilisée (Cervenka et al., 2012).

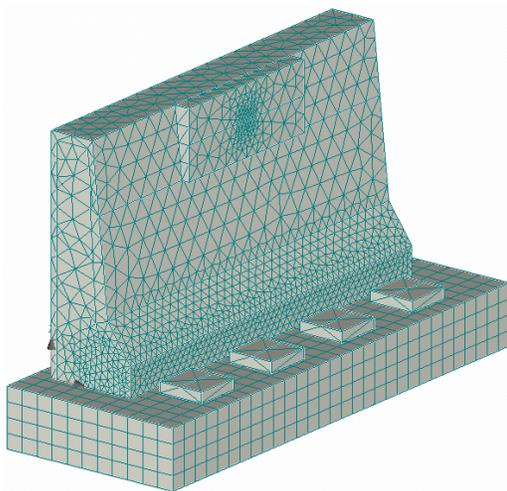


a) Maillage

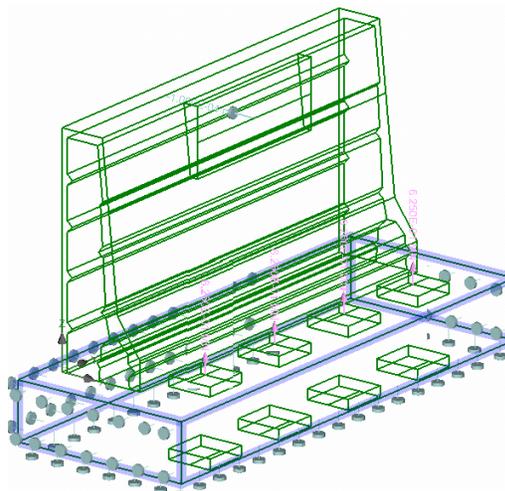


b) Conditions limites et chargement

Figure 61 - Géométrie et maillage du parapet de référence MTQ 301



a) Maillage



b) Conditions limites et chargement

Figure 62 - Géométrie et maillage du parapet hybride à niche fermée

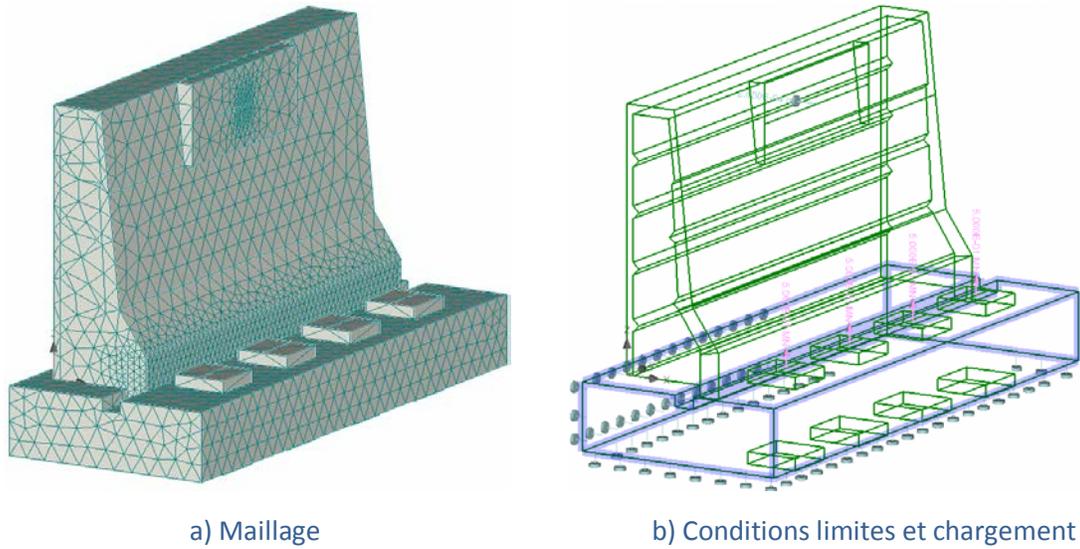


Figure 63 – Géométrie et maillage du parapet hybride à niche ouverte

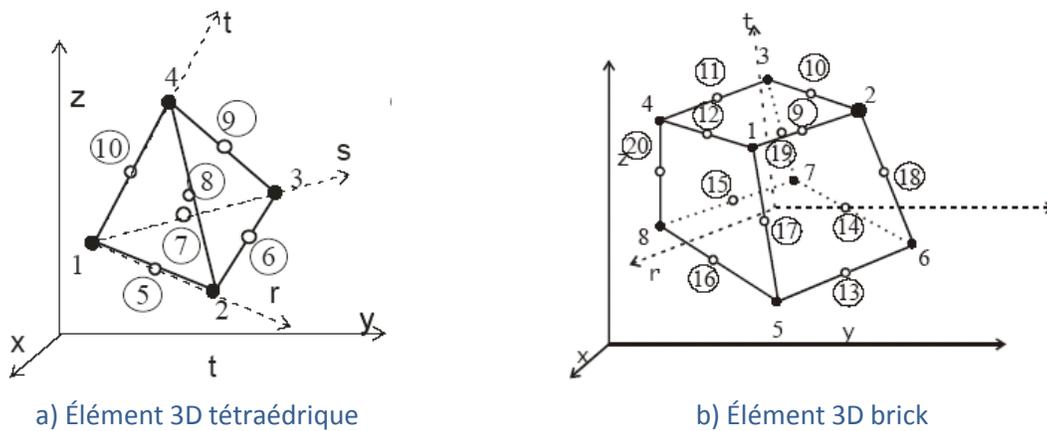


Figure 64 - Éléments utilisés pour le maillage des modèles de parapets (Cervenka et al., 2012)

Tableau 27 - Dimension des maillages (en mm) des éléments des parapets à l'étude

Parapets	Dalle	Cœur	Coque	BFUP niche
MTQ 301 référence	80	100	n.a.	n.a.
Hybride à niche fermée	80	100	100	35
Hybride à niche ouverte	80	100	100	35

6.1.4 Conditions limites et chargement

Les **Figure 61b**, **Figure 62b** et **Figure 63b** 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 quatre câbles tendus (**Figure 61b**, **Figure 63b** et **Figure 62b**). Ces câbles reproduisent l'effet de la précontrainte appliquée sur les dalles avant d'effectuer l'essai.

6.2 PARAPET MTQ 301

Le comportement global force-flèche obtenu numériquement pour le parapet de référence MTQ 301 est représenté à la **Figure 65**, celle-ci présente également les résultats expérimentaux ainsi que l'exigence définie dans la norme CSA. Le comportement global obtenu numériquement montre une rigidité similaire au spécimen MTQ2, jusqu'à environ 210 kN. Par la suite, la rigidité à l'état fissuré du modèle numérique est légèrement supérieure à celle observée expérimentalement. Cette différence est cependant du même ordre de grandeur que celle observée entre les deux essais expérimentaux. Tel qu'indiqué à la **Section 5.2**, les dalles ont été endommagées au laboratoire par la présence de certains points durs (non aplanis) sous la dalle lors de l'application de la précontrainte. Cet artéfact de mesure expérimentale n'est pas reproduit par le modèle et explique probablement la différence de rigidité observée entre les courbes numérique et expérimentales. Une force maximale d'environ 550 kN est atteinte numériquement, ce qui est très similaire aux charges maximales atteintes lors des essais sur les deux parapets testés (525 à 550 kN). Contrairement aux courbes expérimentales, la courbe numérique ne montre pas de chute de charge pour un déplacement horizontal inférieur à 30 mm. Cette chute arrive plus tard numériquement ($d > 35$ mm), ce qui peut être expliqué par le mode de propagation de la fissure qui contrôle la rupture.

Les étapes de fissuration du modèle numérique sont très similaires à ce qui a été observé expérimentalement. En effet, la première fissure à apparaître lors des essais est située au niveau du changement de pente du parapet (*fissure 1* sur la **Figure 66**). Cette fissure est également la première à se former dans le modèle numérique (**Figure 67a**). Tel que mentionné à la **Section 5.2**, des pauses étaient effectuées aux 50 kN durant l'essai, de manière à tracer les fissures sur le parapet de manière sécuritaire. Ainsi, les charges indiquées à la **Figure 66** sont celles auxquelles les fissures ont été recensées pour la première fois. Ainsi, lorsqu'il est par exemple indiqué 150 kN pour la *fissure 1*, ceci signifie que cette fissure est apparue entre les pauses à 100 kN et 150 kN. Par la suite, la *fissure 2* (cf. **Figure 66**) se forme (entre 200 et 250 kN) puis se propage, ce qui est également le cas dans le modèle numérique (**Figure 67b**). Finalement, une nouvelle fissure se crée autour de la plaque de chargement (*fissure 3*) jusqu'à atteindre les extrémités du parapet et conduit à une rupture finale en cisaillement. Cette dernière fissure se forme bien dans le modèle numérique (**Figure 67c**). Cependant, une fois une fissure verticale créée, une nouvelle

fissure se forme à proximité, résultant en une multifissuration verticale (**Figure 67d**) plutôt qu'en une seule fissure qui s'ouvrirait jusqu'à la rupture finale du parapet. Cette multifissuration explique pourquoi la chute de force obtenue expérimentalement n'a pas eu lieu dans le modèle numérique pour un déplacement horizontal inférieur à 30 mm.

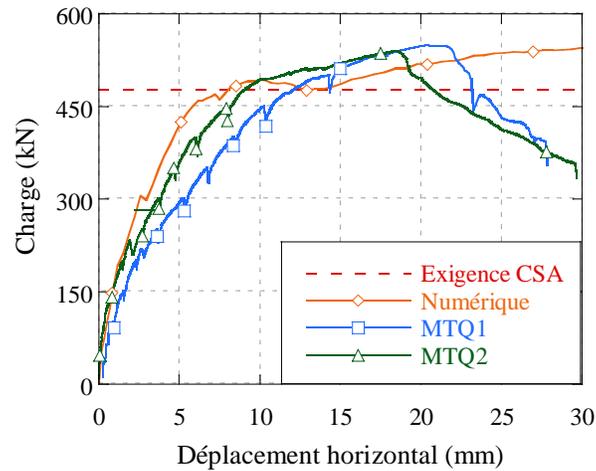
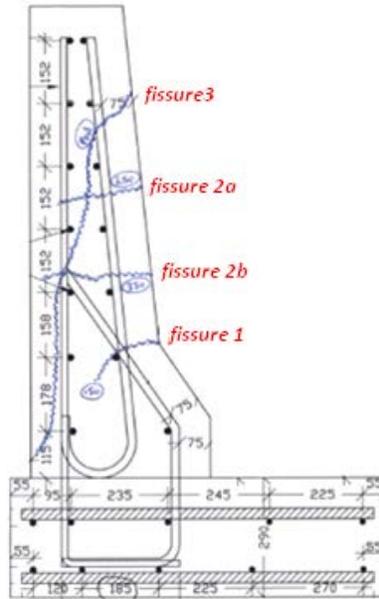
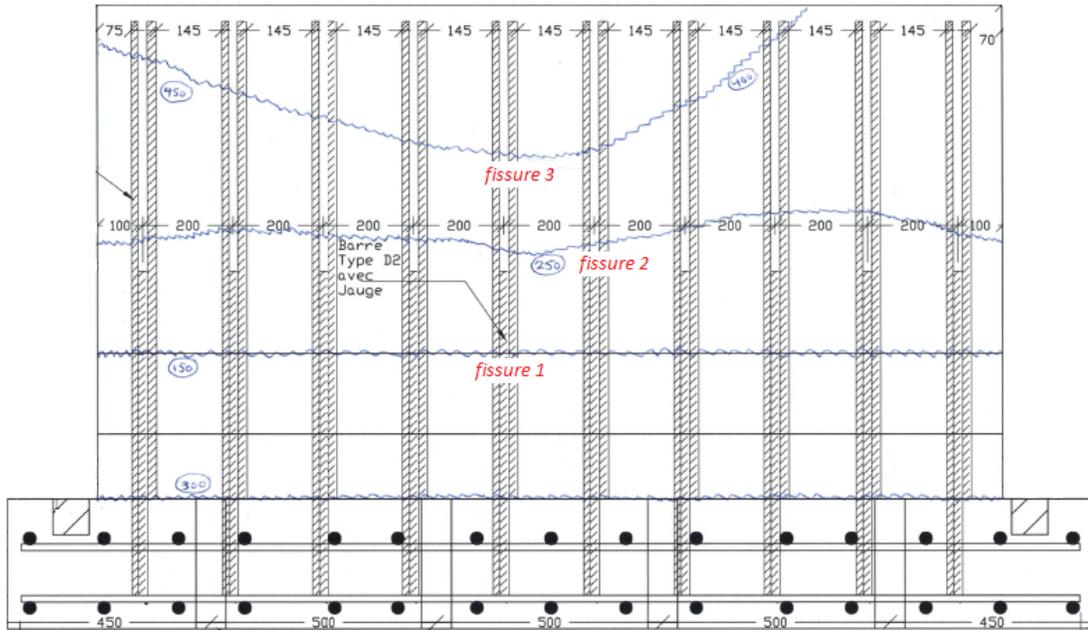


Figure 65 - Évolution de la charge en fonction de la flèche du parapet MTQ 301

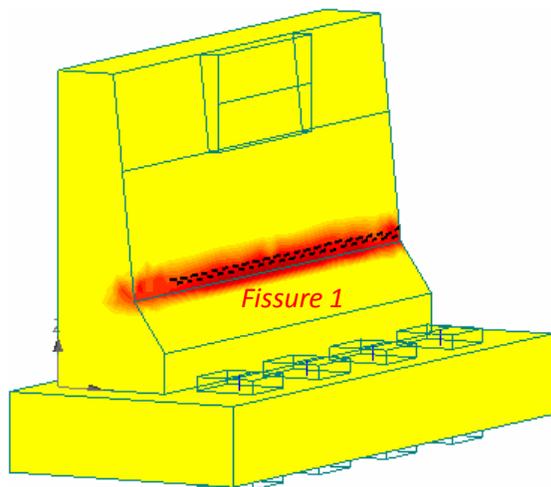


a) Extrémité du parapet MTQ 301 n°1

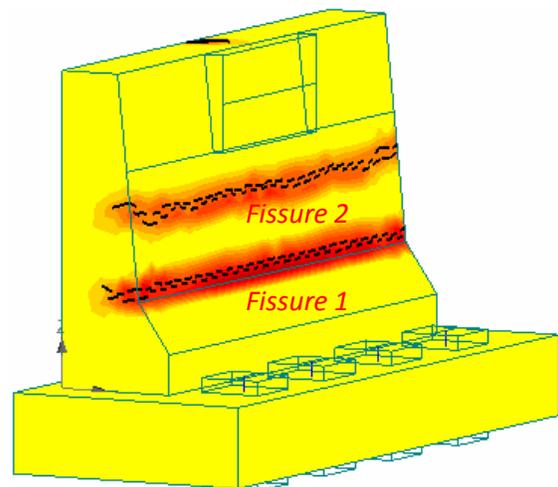


b) Face avant du parapet MTQ 301 n°2

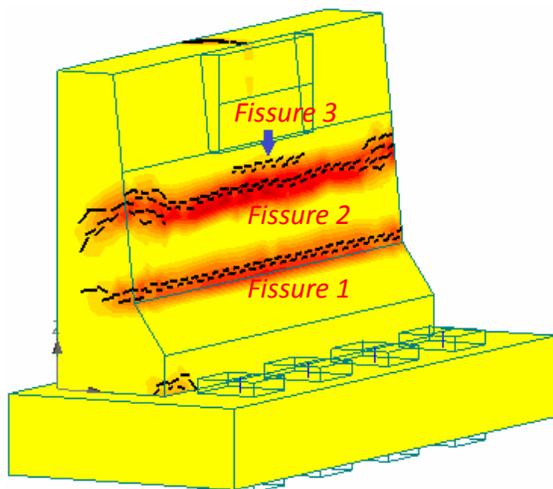
Figure 66 - Patrons de fissuration expérimentaux des parapets MTQ 301



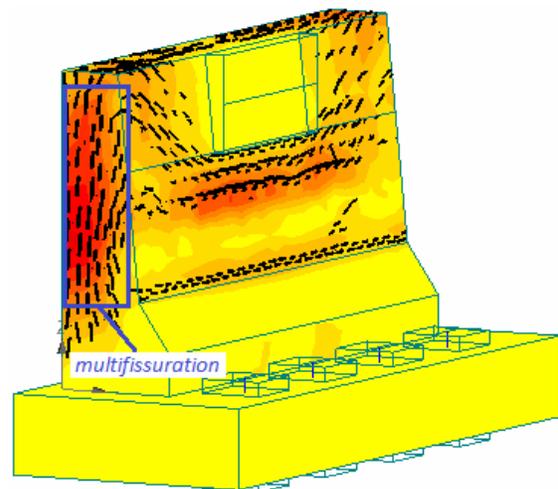
a) Création *fissure 1* ($w \approx 100 \mu\text{m}$)
 $F \approx 190\text{-}200 \text{ kN}$, $d \approx 1.25 \text{ mm}$



b) Création *fissure 2* ($w \approx 100 \mu\text{m}$)
 $F \approx 300 \text{ kN}$, $d \approx 2.75 \text{ mm}$



c) Création *fissure 3* ($w \approx 100 \mu\text{m}$)
 $F \approx 450 \text{ kN}$, $d \approx 6 \text{ mm}$



d) Patron de fissuration ($w > 1 \text{ mm}$) pour
 $F \approx 535 \text{ kN}$, $d \approx 24.5 \text{ mm}$

Figure 67 - Patron de fissuration du modèle numérique du parapet MTQ 301

En ce qui concerne les contraintes dans les armatures, des jauges de déformations étaient positionnées sur une armature centrale de type D2 (**Figure 68**) située à la fois dans le parapet et dans la dalle. Lors des essais, les jauges ont indiqué que la plastification de la barre est survenue à une force de 480 kN, un changement de régime est d'ailleurs visible sur les courbes expérimentales. Numériquement, les cadres situés uniquement dans le parapet, non instrumentés, sont les premiers à atteindre leur limite élastique

de 463 MPa (Figure 69a). Cette plastification est suivie de très près par celle des armatures D2 au niveau où sont collées les jauges et pour une force équivalente à celle mesurée lors des essais (Figure 69b).

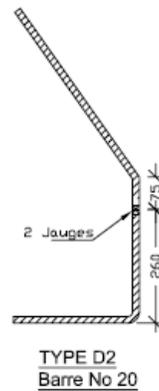
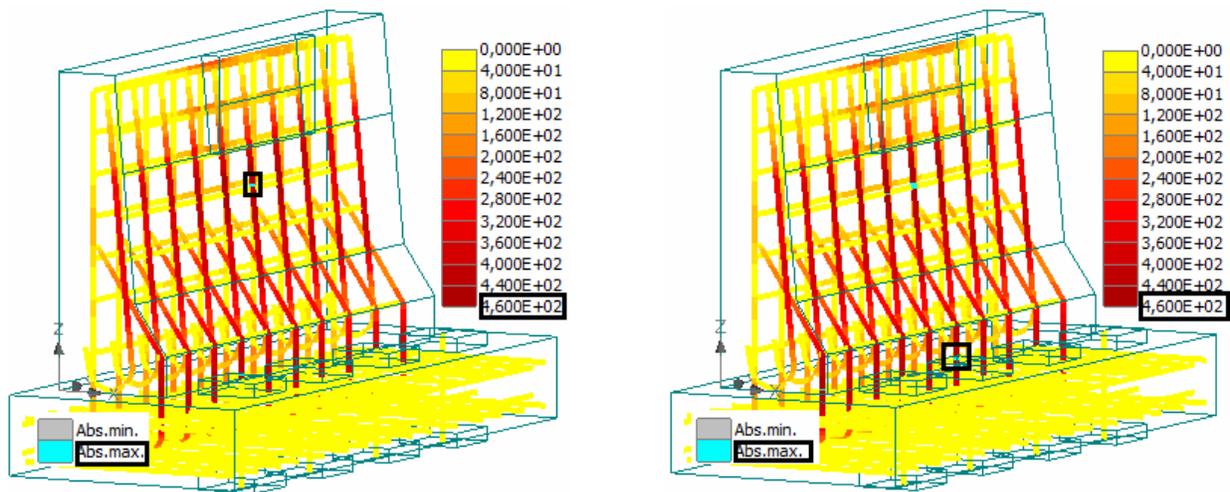


Figure 68 - Position des jauges de déformations sur les aciers d'armatures dans le parapet MTQ 301



a) Plastification du cadre situé dans le parapet
(filtre 0-460 MPa)
 $\sigma_s = 463 \text{ MPa}$, $F \approx 490 \text{ kN}$, $d \approx 9.5 \text{ mm}$

b) Plastification de l'armature centrale de type D2
(filtre 0-460 MPa)
 $\sigma_s = 463 \text{ MPa}$, $F \approx 490 \text{ kN}$, $d \approx 10 \text{ mm}$

Figure 69 - Contraintes de traction dans les armatures du modèle numérique du parapet MTQ 301

6.3 PARAPET HYBRIDE À NICHE FERMÉE

Le comportement global force-flèche obtenu numériquement pour le parapet hybride à niche fermée est représenté à la **Figure 70**, celle-ci présente également les résultats expérimentaux ainsi que l'exigence définie dans la norme CSA. Le comportement global du modèle numérique est très semblable à celui observé expérimentalement jusqu'à la charge maximale atteinte dans les essais. Par la suite, alors qu'expérimentalement la charge décroît progressivement, celle-ci continue d'augmenter dans le modèle numérique. Tel qu'expliqué au **Chapitre 5**, ceci s'explique par le fait qu'une fissuration interne se produit à l'interface des barres transversales dans les parapets testés. Il s'agit d'une conséquence du dépliement des barres transversales qui engendre des efforts de traction dans le béton. Cette fissuration ne peut être reproduite numériquement car les armatures modélisées en éléments barres se déforment et transfèrent des efforts uniquement dans leur axe. Les efforts de traction exercés par le dépliement des barres ne sont donc pas représentés dans le modèle numérique. Par conséquent la charge continue d'augmenter jusqu'à une charge maximale de 537 kN dans le modèle numérique. Le modèle numérique ne pouvant reproduire adéquatement le comportement observé dans les essais pour le parapet hybride à niche fermée, la comparaison de la fissuration et des contraintes dans les armatures n'apporte pas d'information pertinente et exploitable et ne sera donc pas effectuée.

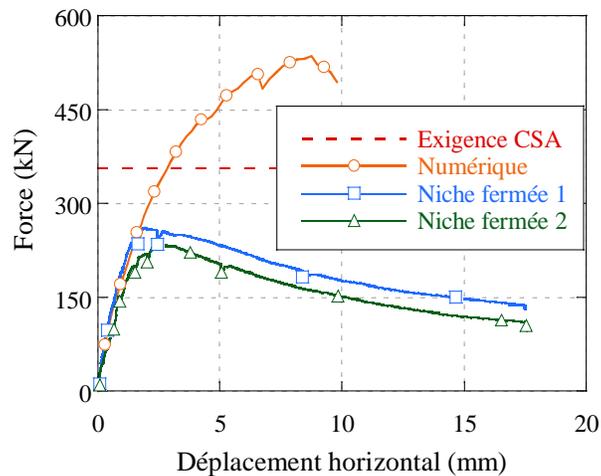


Figure 70 - Évolution de la charge en fonction de la flèche du parapet hybride à niche fermée

6.4 PARAPET HYBRIDE À NICHE OUVERTE

Le comportement global force-flèche obtenu numériquement pour le parapet hybride à niche ouverte est représenté à la **Figure 70**, celle présente également les résultats expérimentaux ainsi que l'exigence définie dans la norme CSA. Le comportement global obtenu numériquement montre une rigidité initiale similaire à l'expérimental. La rigidité à l'état fissuré est, quant à elle, un peu plus faible dans le modèle numérique. Une force maximale de 545 kN, très proche des charges maximales mesurées expérimentalement sur les deux parapets testés (550 et 580 kN), est atteinte numériquement.

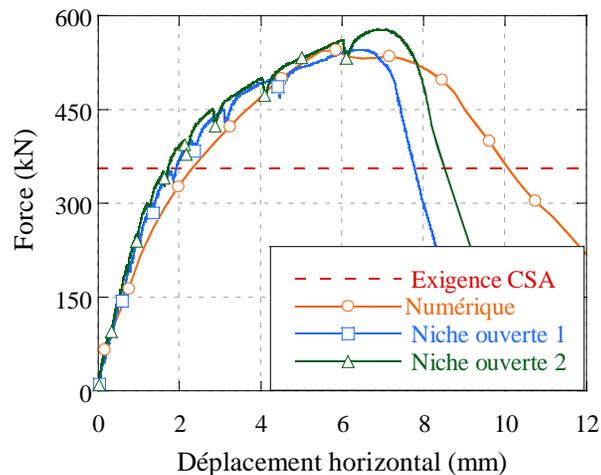
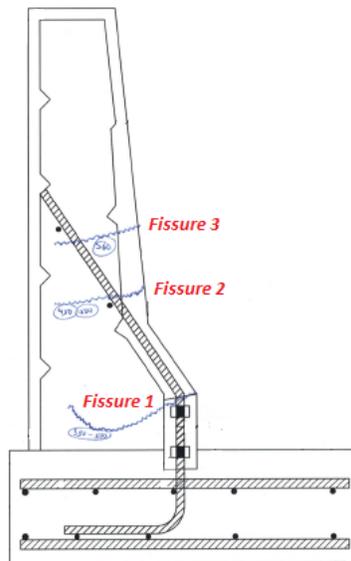


Figure 71 - Évolution de la charge en fonction de la flèche du parapet hybride à niche ouverte

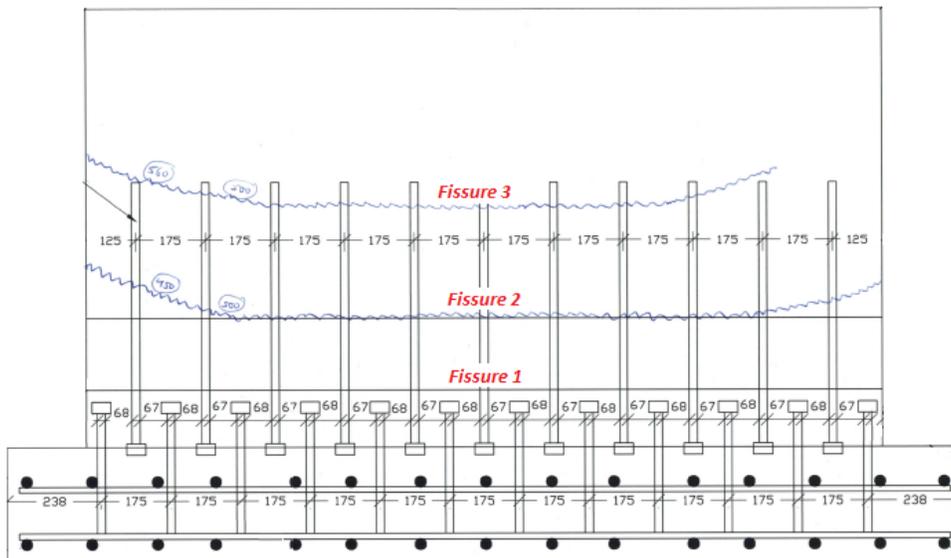
La première fissure à apparaître lors des essais est située au niveau de l'interface niche-coque du parapet (*fissure 1* sur la **Figure 72**). Cette fissure n'est pas reproduite numériquement. Ceci s'explique par le fait qu'un très petit vide de remplissage (environ 0.5 mm) a été remarqué près des zones d'extrémités des parapets et a par la suite été comblé par un mortier de plus faible résistance, créant ainsi une zone de faiblesse propice à la fissuration lors des essais. Cette zone de faiblesse n'étant pas reproduite numériquement, cette fissure n'apparaît pas dans le modèle. Étant donné que la *fissure 1* n'est pas prédominante, les comportements globaux numérique et expérimentaux restent très similaires.

Par la suite, deux fissures principales se forment dans la coque en BFUP et contrôlent le comportement global du parapet hybride à niche ouverte (*fissures 2* et *3* sur la **Figure 72**). La *fissure 2* est la première à apparaître, entre 350 et 500 kN selon l'endroit considéré sur le parapet (centre, extrémités). Elle est située approximativement au niveau du changement de pente du parapet. La *fissure 3* apparaît ensuite pour un niveau de chargement entre 450 kN et la charge maximale, à nouveau selon l'endroit considéré sur le parapet. Ces deux fissures principales sont reproduites numériquement et apparaissent dans le même ordre qu'expérimentalement. Tout d'abord, une première fissure se forme dans le modèle et se développe

au niveau du changement de pente dans le parapet (**Figure 73a**), jusqu'à ce qu'une deuxième fissure se forme autour de la plaque de chargement (**Figure 73b**). Celle-ci devient la fissure prédominante et continue de se développer jusqu'à former une fissure un peu plus horizontale qu'elle ne l'est initialement (**Figure 73c**). Cette fissure contrôle, tout comme dans l'essai, la rupture finale du parapet. Enfin, les patrons de fissuration numérique (**Figure 73**) et expérimentaux (**Figure 72**) sont très similaires.

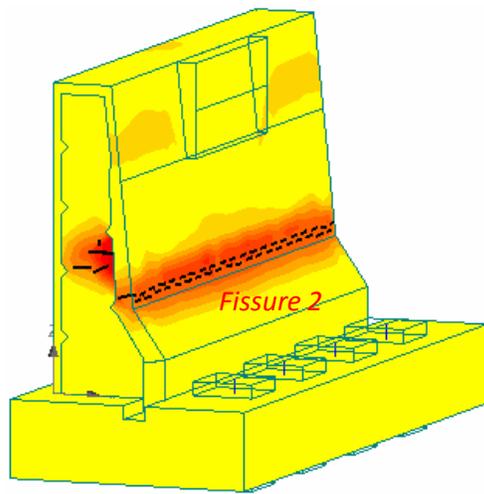


a) Extrémité du parapet hybride à niche ouverte n°2

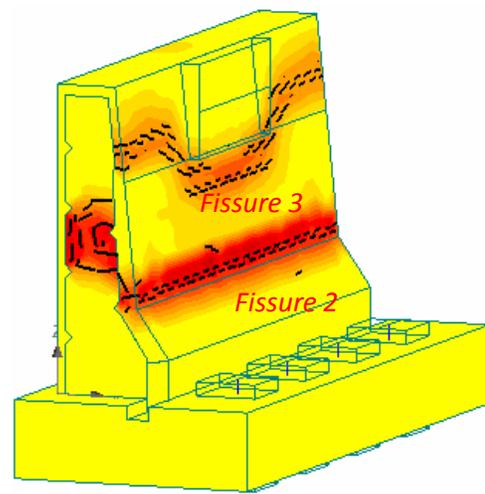


b) Face avant du parapet hybride à niche ouverte n°2

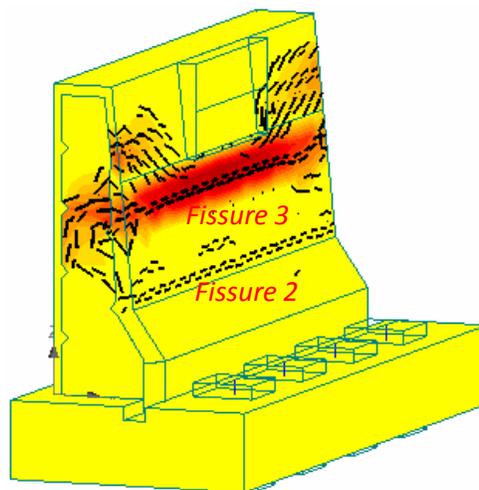
Figure 72 - Patron de fissuration expérimental typique du parapet hybride à niche ouverte



a) Création *fissure 2* ($w \approx 100 \mu\text{m}$)
 $F \approx 540 \text{ kN}$, $d \approx 5.25 \text{ mm}$



b) Création *fissure 3* ($w \approx 100 \mu\text{m}$)
 $F \approx 530 \text{ kN}$ (après pic de charge), $d \approx 7.25 \text{ mm}$



c) *Fissure 3* qui contrôle la rupture finale ($w > 100 \mu\text{m}$)

Figure 73 - Patron de fissuration du modèle numérique du parapet hybride à niche ouverte

En ce qui concerne les contraintes dans les armatures, des jauges de déformation étaient positionnées sur deux armatures centrales du parapet dans les essais, soit sur une armature positionnée dans la coque en BFUP ainsi que sur une armature qui relie la dalle à la niche (**Figure 74**). Ces jauges étaient positionnées approximativement à mi-hauteur de la niche et ont enregistré des contraintes au pic de chargement d'environ 285 MPa pour la barre de type P3 et d'environ 320 MPa pour la barre de type P4 (cf. **Figure 52**,

Section 5.4). Le modèle numérique indique que la contrainte dans les armatures est maximale pour les barres situées aux extrémités du parapet à la zone de pliage, avant de noter une chute de force marquée dans le comportement global du parapet ($f_{s \text{ max}} = 459 \text{ MPa}$ pour $F = 531 \text{ kN}$ et $d = 7.5 \text{ mm}$, **Figure 75a**). Cette zone n'était pas instrumentée lors des essais. À l'endroit où étaient situées les jauges, la contrainte obtenue numériquement est d'environ 320 MPa pour l'armature de type P4 (**Figure 75b**) et d'environ 250 MPa pour l'armature de type P3 (**Figure 75c**), soit des valeurs très proches de celles obtenues expérimentalement au pic de chargement.

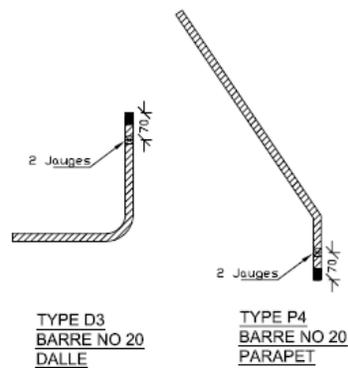
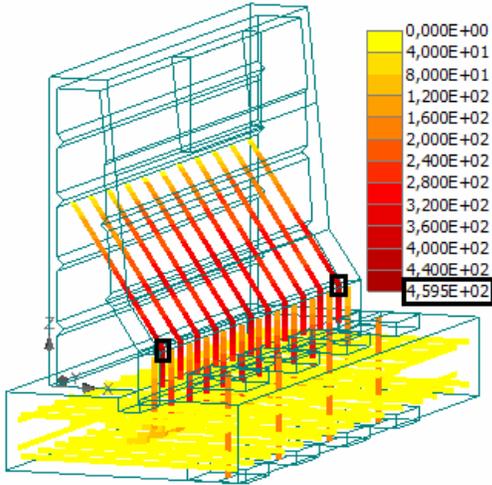
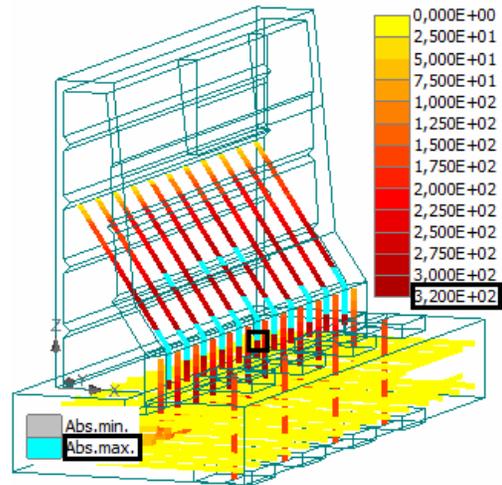


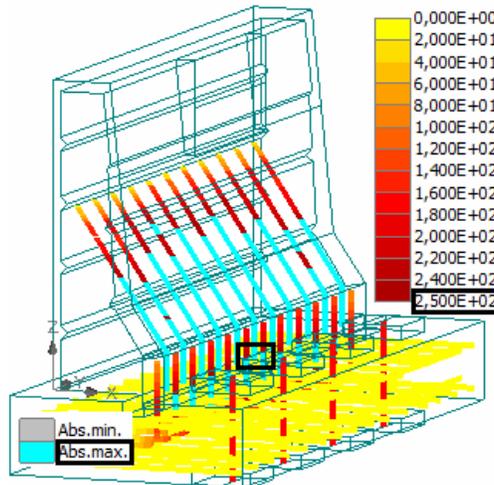
Figure 74 - Position des jauges de déformations sur les aciers d'armatures dans le parapet hybride à niche ouverte



a) $f_{s \max} = 459 \text{ MPa}$ au pliage des armatures d'extrémités
 $F = 531 \text{ kN}$, $d = 7.5 \text{ mm}$



b) $f_s \approx 320 \text{ MPa}$ à l'endroit des jauges de déformation sur l'armature centrale de type P4
 (filtre 0-320 MPa)
 $F = 531 \text{ kN}$, $d = 7.5 \text{ mm}$



c) $f_s \approx 250 \text{ MPa}$ à l'endroit des jauges de déformation sur l'armature centrale de type P3 (filtre 0-250 MPa)
 $F = 531 \text{ kN}$, $d = 7.5 \text{ mm}$

Figure 75 - Contraintes de traction dans les armatures du modèle numérique du parapet hybride à niche ouverte juste avant la chute marquée de la force

Par ailleurs, le module numérique permet d'illustrer clairement l'effet de confinement de la niche en BFUP créé par la rainure dans la dalle (**Figure 76**). Cet effet de confinement permet d'améliorer le comportement général du parapet hybride à niche ouverte, notamment en restreignant le déplacement de la niche vers l'avant du parapet, et en limitant l'ouverture de l'interface parapet-dalle. Ce dernier point garantira une durabilité hors pair de l'interface parapet-dalle.

L'effet de confinement de la niche en BFUP par la dalle a aussi pour conséquence de réduire le développement de contrainte dans les armatures d'ancrage. Ainsi, seulement les barres aux extrémités du parapet parviennent à atteindre la plastification (**Figure 75a**). Pour obtenir un comportement un peu plus ductile à la rupture, une solution serait de réduire la quantité d'armature d'ancrage pour favoriser leur plastification à l'atteinte de la force maximale. Afin de vérifier cette hypothèse, le modèle numérique a donc été modifié en réduisant la quantité d'armature d'ancrage de 20% dans le parapet hybride à niche ouverte. Le résultat du calcul est présenté à la **Figure 77**. La réduction de la quantité d'armature d'ancrage fait en sorte que la diminution de résistance liée à la localisation de la fissuration dans la coque en BFUP survient cette fois après la plastification des barres. La ductilité associée à la plastification des barres est donc plus visible dans le processus de rupture. Cette modification simple pourrait donc être considérée pour le concept de parapet hybride à niche ouverte.

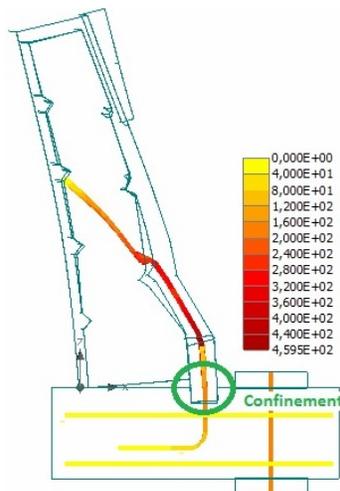


Figure 76 - Effet de confinement de la niche en BFUP créé par la rainure dans la dalle (F = 531 kN, d = 7.5 mm, déformée x 25)

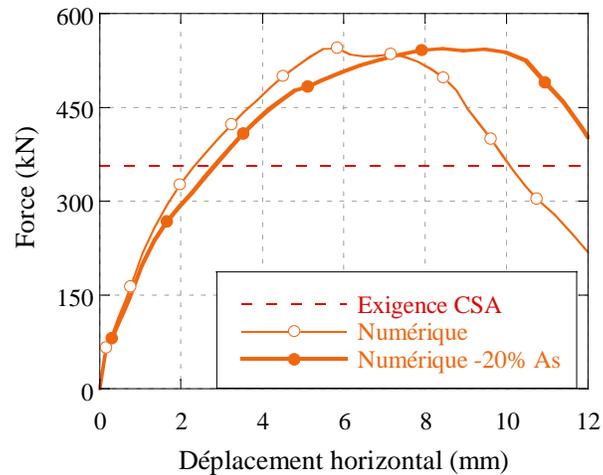


Figure 77 - Réduction de 20% des armatures d'ancrage dans le modèle numérique du parapet hybride à niche ouverte

6.5 CONCLUSION

Les modélisations numériques réalisées avec le logiciel *ATENA* permettent de bien reproduire les résultats des essais sur le parapet MTQ 301 et le parapet hybride à niche ouverte. De fait, les modèles présentent des rigidités, des contraintes dans les armatures, des résistances ultimes et des patrons de fissuration similaires à ceux observés en laboratoire. Dans ce contexte, les modèles numériques sont considérés validés pour ces deux concepts de parapets. Ils permettent maintenant d'étudier d'autres aspects du comportement mécanique des parapets, par exemple déterminer l'effet d'une modification au dimensionnement, d'un chargement excentré, ou de la continuité des parapets. A cet effet, le modèle de parapet hybride à niche ouverte a permis de vérifier qu'une réduction de 20% de la quantité d'armature d'ancrage permettait d'augmenter la ductilité à la rupture de ce type de parapet.

Les résultats du parapet hybride à niche fermée n'ont pu être reproduits étant donné une limitation concernant le transfert d'efforts des éléments barre utilisés pour modéliser les armatures.

7 ÉTUDE ÉCONOMIQUE

Ce chapitre a pour objectif de présenter une analyse économique sommaire illustrant l'intérêt d'utiliser des parapets préfabriqués hybrides en comparaison à des parapets coulés en place. Le potentiel de durabilité d'une structure en BHP et en BFUP sera d'abord analysé puis les coûts d'utilisation des parapets sur la durée de vie d'un pont seront évalués.

7.1 POTENTIEL DE DURABILITÉ DES MATÉRIAUX ET DES PARAPETS

Les informations présentées dans cette section sont extraites d'un rapport de recherche intitulé *Intérêt de l'utilisation des bétons renforcés de fibres pour la construction d'ouvrages durables* (Charron et Desmettre, 2013). Les nombreuses références étayant les données présentées dans les tableaux et les recommandations sont fournies dans le rapport, celui-ci est disponible sur demande.

Le **Tableau 28** présente une comparaison des propriétés de différentes classes de bétons. Au lieu de montrer une liste de propriétés et les valeurs obtenues pour chaque matériau, des ratios comparatifs sont utilisés pour faciliter l'analyse. Un ratio R indique la performance d'un matériau en considérant le béton ordinaire (BO) comme matériau de référence. Ainsi, $R_c = n$ signifie que le béton présente des résistances mécaniques n fois supérieures au BO (un BFUP de résistance à la compression de 120 MPa par rapport à un BO de 30 MPa conduit à une valeur de R_c de 4.0). R_t représente le ratio de résistance à la traction.

La durabilité des matériaux a été étudiée pour deux conditions, soit à l'état non fissuré et à l'état fissuré. De fait, la durabilité d'une structure dépend du comportement des matériaux dans les deux conditions, puisque celles-ci sont retrouvées dans la structure et interagissent (par exemple le phénomène de corrosion dépend à la fois des propriétés de transport du béton à l'état non-fissuré et à l'état fissuré). Le ratio R_{nf} représente la valeur minimale obtenue en comparant 5 indicateurs de durabilité des matériaux à l'état non fissuré (perméabilité à l'air, perméabilité à l'eau, diffusion effective, sorptivité, et vitesse de corrosion). Ainsi, pour ces 5 indicateurs, le BFUP possède au minimum une durabilité 67 fois plus longue que celle du BO ou du BHP à l'état non fissuré. Le ratio R_f représente la valeur minimale obtenue en comparant la perméabilité à l'eau à l'état fissuré. Dans cette condition le BFUP possède au minimum une durabilité 1000 fois plus longue que celle du BO ou du BHP. En considérant un ensemble de paramètres liés aux aléas rencontrés lors de la fabrication d'une structure (présence de défauts, variation des propriétés des matériaux, etc.) et d'un éventuel changement de comportement des matériaux à l'échelle de la structure, un ratio R_d a été proposé pour caractériser l'amélioration de durabilité à considérer en conception (en fonction des ratios R_{nf} , R_f et des aléas). Le ratio R_d du BFUP indique que la durabilité d'un élément composé de BFUP devrait présenter une durabilité supérieure à environ trois fois celle du BO ou du BHP.

Tableau 28 - Comparaison des propriétés des bétons

Aspects considérés	BO	BHP	BFHP	BFUP
Résistance mécanique	Modérée	Élevée	Élevée	Très élevée
	$R_c = 1.0$	$R_c = 1.3 \text{ à } 4.5$	$R_c = 1.3 \text{ à } 4.5$	$R_c = 3.0 \text{ à } 8.0$
	$R_t = 1.0$	$R_t = 1.2 \text{ à } 3.0$	$R_t = 1.2 \text{ à } 3.0$	$R_t = 1.5 \text{ à } 5.0$
Durabilité	Modérée	Modérée à élevée	Élevée à très élevée	Exceptionnelle
État non fissuré	$R_{nf} = 1.0$	$R_{nf} \geq 3.1$	$R_{nf} \geq 3.1$	$R_{nf} \geq 66.7$
État fissuré	$R_f = 1.0$	$R_f \geq 1.0$	$R_f \geq 3.2$	$R_f \geq 1000$
Design	$R_d = 1.0$	$R_d \geq 1.15$	$R_d \geq 1.4$	$R_d \geq 3.0$

Selon les données du **Tableau 28** et l'analyse précédente, la durabilité attendue des parapets hybrides fabriqués avec du BFUP devrait être au moins 3 fois supérieure à celle des parapets coulés en place fabriqués en BO ou BHP. Pour un pont très achalandé, la fréquence de remplacement des parapets coulés en place est d'environ 35 ans selon le rapport technique préparé pour le futur Pont Champlain (PJCCI et MTQ, 2011). Ainsi, la fréquence de remplacement de parapets préfabriqués hybrides en BFUP atteindrait au moins 75 à 100 ans. Une telle fréquence de remplacement est équivalente à la durée de vie du pont, il est donc envisageable qu'aucun remplacement de parapets préfabriqués hybrides en BFUP ne soit requis. Cette hypothèse sera à la base de l'analyse économique réalisée à la section suivante.

7.2 COÛTS DE CONSTRUCTION ET DE REMPLACEMENT DES PARAPETS

Afin d'estimer les coûts de construction et de remplacement des parapets de pont, plusieurs variables ont été considérées. Le **Tableau 29** détaille ces variables et leur référence. La majorité des informations ont été extraites de la liste des prix suggérés par le MTQ pour les travaux de construction et de réparation d'un pont, d'autres proviennent du coût actuel des matériaux. Enfin, le coût de gestion du trafic est une donnée fréquemment mentionnée par les gestionnaires d'ouvrages. La gestion du trafic peut être considérée pour les travaux de construction initiaux des parapets (cas d'un pont neuf avec circulation automobile existant en périphérie), et pour les travaux de remplacement de parapets. Seule la construction d'un pont neuf sans existence préalable de trafic automobile environnant peut justifier de ne pas tenir compte de la gestion du trafic.

Les caractéristiques des parapets servant à l'analyse économique sont présentées au **Tableau 30**. Les caractéristiques sont données par mètre linéaire de parapet pour permettre l'estimation des coûts de construction et de remplacement sur cette même base. Le parapet hybride se distingue par le fait que le volume de BFUP correspond à environ 30 % du volume total de béton, et que le poids d'armature est réduit de 65 % par rapport au parapet MTQ 301.

Tableau 29 - Variables considérées dans l'analyse économique

Variables considérées	Valeurs
Coûts main d'œuvre coffrage, béton et armature ¹	1340 \$/m ³
Coûts du BHP ²	160 \$/m ³
Coûts du BFUP ²	3040 \$/m ³
Coût acier standard ¹	2,50 \$/kg
Coûts acier galvanisé ¹	3,25 \$/kg
Coûts déplacement glissière pour chantier ¹	26,50 \$/m parapet
Coûts démolition du béton ¹	1000 \$/m ³
Coûts d'organisation du chantier pour projet ¹	15 % coût projet
Coûts de gestion du trafic ⁴	30 % coût projet

¹ : Liste des prix suggérés MTQ 2012. ² : Prix du marché.

³ : Estimation relative au prix du coulé en place.

⁴ : Coûts nuls si le nouveau pont dans une zone sans circulation automobile.

Tableau 30 - Caractéristiques des parapets servant à l'analyse économique (/m linéaire de parapet)

Caractéristiques des parapets	Parapet MTQ 301	Parapet hybride
Volume de béton BHP (m ³)	0,348	0,241
Volume de béton BFUP (m ³)	0	0,104
Poids d'acier (kg)	30,6	10,8
Surface coffrage (m ²)	2,30	2,30
Poids total (kg)	866	869

Les coûts de construction et de remplacement des parapets sont indiqués au **Tableau 31**. Les coûts de matériaux concernent le béton et l'acier (armature). Les coûts de main d'œuvre considèrent le temps de travail pour la fabrication des parapets, soit la construction des coffrages, l'installation des armatures, la mise en place du béton, l'application de la cure de mûrissement au béton et le décoffrage. Le parapet hybride est produit en 2 phases (construction successive du cœur et de la coque du parapet), cependant le temps de travail en usine est habituellement réduit significativement grâce à la disponibilité des moules, de procédures automatisées et à l'aisance de travail en usine. N'ayant pas de données précises à ce sujet, il a été estimé de manière conservatrice que le coût en main d'œuvre serait égal pour le parapet préfabriqué hybride et le parapet coulé en place. Les coûts de transport et d'installation en chantier sont par ailleurs des frais applicables seulement au parapet préfabriqué hybride.

Les coûts de démolition sont considérés uniquement lors du remplacement des parapets. Les coûts d'organisation de chantier et de gestion du trafic sont appliqués proportionnellement au nombre de jours des travaux de construction. À ce titre, on estime que pour un pont de 30 m de longueur, la démolition de parapets requerrait 4 jours (si applicable), la fabrication de parapets coulés en place

prendrait 18 jours (Bissonnette et Morin, 2000), et l'installation de parapets préfabriqués nécessiterait 4 jours (Charron et al., 2011). Les coûts de gestion du trafic sont indiqués pour 2 situations. Dans l'éventualité de la construction d'un pont neuf sans circulation automobile environnante, le coût de gestion du trafic est nul et le coût total des parapets est réduit (valeurs indiquées par un * dans le **Tableau 31**). Cette situation est de plus en plus rare, car le réseau d'infrastructures routières du MTQ est relativement complet. Dans ce contexte, l'analyse suivante est plutôt réalisée en considérant des coûts de gestion du trafic pour la construction initiale et le remplacement des parapets (travaux dans une zone avec circulation automobile). Les coûts totaux considérés dans l'analyse suivante sont donc ceux indiqués en gras dans le **Tableau 31**.

En tenant compte des paramètres précédents, le coût de construction par mètre linéaire de parapet MTQ 301 est de 900\$, tandis que celui du parapet préfabriqué hybride est de 1050\$ (hausse de 16%). Ceci permet d'illustrer clairement que, malgré le coût très élevé du BFUP au m³, le coût par mètre linéaire de parapet préfabriqué hybride demeure compétitif. Ceci s'explique par le fait que les coûts en matériaux des parapets représentent moins de 35 % du prix total et que les frais de d'organisation du chantier et du trafic sont réduits pour la préfabrication (travaux de 4 jours avec les parapets préfabriqués versus 18 jours pour les parapets coulés en place). Le coût de remplacement par mètre linéaire du parapet MTQ 301 est de 1440\$, alors que celui du parapet préfabriqué est de 1500\$ (hausse de 5%). La différence de prix entre les deux options est plus faible cette fois, car les coûts d'organisation de chantier et de gestion du trafic représentent une plus grande proportion des coûts. En effet, les travaux s'effectuent sur une plus longue période avec la démolition préalable des parapets (travaux de 8 jours avec les parapets préfabriqués versus 22 jours pour les parapets coulés en place).

Tableau 31 - Coûts de construction et de remplacement des parapets (/m linéaire de parapet)

	Parapet MTQ 301		Parapet hybride	
	Construction	Remplacement	Construction	Remplacement
Coûts matériaux	160 \$	160 \$	380 \$	380 \$
Coûts main d'œuvre fabrication	470 \$	470 \$	470 \$	470 \$
Coûts transport & installation	0 \$	0 \$	130 \$	130 \$
Coûts démolition	0 \$	370 \$	0 \$	370 \$
Coûts organisation de chantier	90 \$	150 \$	30 \$	40 \$
Coûts gestion de trafic	0 \$ *	190 \$	0 \$ *	40 \$
Total	710 \$ *	900 \$	1 010 \$ *	1 050 \$

* : Coûts sans gestion de trafic pour un pont neuf dans une zone sans circulation automobile.

Les coûts de construction et de remplacement des parapets estimés sur le cycle de vie d'un pont de 30 m de longueur sont présentés au **Tableau 32**. Tel que pour des études techniques similaires réalisées récemment pour l'estimation des coûts d'exploitation d'un pont, l'inflation n'a pas été considérée dans l'analyse économique. De fait, si l'inflation se maintient à un taux faible, celle-ci a été inférieure à 2 % au cours des 20

dernières années (Gouvernement du Québec, 2012), on peut considérer que le pouvoir d'achat des gestionnaires d'ouvrages évoluera au même rythme. Le coût réel des travaux peut donc être conservé en dollars 2013 pour l'analyse sur la durée de vie complète de l'ouvrage. Le coût des interventions de construction et de remplacement ainsi que leur durée ont été expliqués précédemment.

L'analyse du **Tableau 32** indique que le coût par mètre linéaire sur 75 à 100 ans serait de 3780\$ pour le parapet coulé en place avec une durée totale de travaux de 62 jours. Le coût et la durée totale des travaux seraient nettement inférieurs pour le parapet préfabriqué hybride, soit de 1050\$ et 4 jours. Ceci s'explique par le fait qu'une seule phase de construction serait requise pour cette option sur la durée de vie utile de l'ouvrage. Ainsi, malgré un coût initial de construction supérieur de 16 % pour le parapet préfabriqué hybride, le coût total investi sur les parapets pendant la durée de vie d'un pont s'avère inférieure de 72 % par rapport au parapet coulé en place. Ce constat est aussi applicable dans l'éventualité où une structure aurait une durée de vie prolongée à 125 ans avec les interventions de remplacement requises.

Tableau 32 - Coûts des parapets sur le cycle de vie d'un pont (/m linéaire de parapet) et le temps de construction (pont de 30 m)

Événements	Année	Parapet BHP cycle 33 ans		Parapet hybride cycle 100 ans	
		Coûts ¹	Temps travaux ²	Coûts ¹	Temps travaux ²
Construction	0	900 \$	18 jours	1 050 \$	4 jours
Remplacement	33	1 440 \$	22 jours	-	-
Remplacement	66	1 440 \$	22 jours	-	-
Remplacement	100	1 440 \$	22 jours	1 500 \$	8 jours
Total durée de vie 75-100 ans		3 780 \$	62 jours	1 050 \$	4 jours
Total durée de vie 125 ans		5 220 \$	84 jours	2 550 \$	12 jours

¹ : Coûts des travaux en considérant un trafic automobile environnant, détails au **Tableau 31**.

² : Estimation pour un pont de 30 m, 4 jours démolition (si applicable), 18 jours fabrication coulé en place (Bissonnette et Morin, 2000), 4 jours installation préfabriqué (Charron et al. 2011).

7.3 CONCLUSION

La durabilité attendue des parapets hybrides fabriqués avec du BFUP devrait être au moins 3 fois supérieure à celle des parapets coulés en place fabriqués en BO ou BHP. Pour un pont très achalandé, la fréquence de remplacement des parapets coulés en place est d'environ 35 ans. Ainsi, la fréquence de remplacement de parapets préfabriqués hybrides en BFUP atteindrait au moins 75 à 100 ans. Une telle fréquence de remplacement est équivalente à la durée de vie du pont, il est donc envisageable qu'aucun remplacement de parapets préfabriqués hybrides en BFUP ne soit requis.

Le coût de construction par mètre linéaire de parapet préfabriqué hybride est 16 % plus élevé que celui du parapet MTQ 301. Ceci permet d'illustrer clairement que, malgré le coût très élevé du BFUP au m³, le coût par mètre linéaire de parapet préfabriqué hybride demeure compétitif. Ceci s'explique par le fait que les coûts en matériaux des parapets représentent moins de 35% du prix total et que les frais d'organisation du chantier et du trafic sont réduits pour la préfabrication

L'analyse économique sur les travaux de construction et de remplacement des parapets indique que, malgré un coût initial de construction plus élevé de 16 % pour le parapet préfabriqué hybride, le coût total investi pendant la durée de vie d'un pont (75 à 100 ans) est inférieur de 72 % à celui du parapet coulé en place. De fait, la durabilité exceptionnelle du parapet hybride en BFUP permettrait d'éviter son remplacement durant la vie utile de l'ouvrage.

8 CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATION

Le projet de recherche avait pour but d'étudier la performance du BFUP dans les parapets préfabriqués pour répondre à une problématique concrète du MTQ. Le MTQ s'intéresse actuellement à l'utilisation d'éléments préfabriqués afin d'accélérer la construction des nouveaux ouvrages et la réparation des ouvrages existants. L'utilisation de parapets coulés en place allonge le temps de construction et conduit parfois à une fissuration précoce pouvant être pénalisante pour la durabilité des parapets. Le projet consistait à comparer la performance mécanique de parapets préfabriqués à celle de parapets coulés en place, et à incorporer du BFUP aux parapets préfabriqués pour supprimer une partie de leurs armatures et prolonger leur durabilité. Les travaux réalisés ont mené aux conclusions suivantes.

CONCEPTION DES PARAPETS PRÉFABRIQUÉS HYBRIDES

Deux concepts de parapets préfabriqués hybrides PL-3 ont été développés. Le premier concept de parapet hybride utilise une niche d'ancrage fermée et le BFUP pour sa capacité de protection principalement (amélioration de la durabilité du parapet). Le premier concept permet de réduire de 50 % la quantité d'armature par rapport au parapet MTQ 301 et sa connexion à la dalle s'effectue avec pompage. Le deuxième concept de parapet hybride comprend une niche d'ancrage ouverte et utilise le BFUP pour ses apports mécaniques et de durabilité. Le deuxième concept permet de réduire de 65 % la quantité d'armature par rapport au parapet MTQ 301 et sa connexion à la dalle s'effectue sans pompage. Pour les deux concepts, les parapets sont composés d'un noyau intérieur en BHP et d'une coque en BFUP à épaisseur variable.

Lors de la conception, les études numériques préliminaires ont démontré que la résistance maximale des deux concepts de parapets préfabriqués hybrides serait comparable au parapet coulé en place MTQ 301 de référence, et largement supérieure à la surcharge transversale pondérée de 357 kN exigée par le Code S6-2006.

PERFORMANCE MÉCANIQUE DES PARAPETS PRÉFABRIQUÉS HYBRIDES

Les observations réalisées lors des essais quasi-statiques sur les parapets ont confirmé que le parapet MTQ 301 performe très bien à l'ultime. Il présente une résistance maximale 44 % supérieure à celle exigée par le Code S6-2006 et une rupture ductile. Son comportement en service avec des ouvertures de fissure allant jusqu'à 0.3 mm pourrait accélérer la pénétration d'eau et d'agents agressifs dans le béton et éventuellement une détérioration dans le temps.

Le parapet hybride à niche fermée n'a pas performé adéquatement lors des essais. Lors du chargement, une fissuration interne se localise à l'interface des barres transversales. Ceci rend les barres transversales inactives pour reprendre des efforts supérieurs à 260 kN, de plus celles-ci n'interviennent pas dans le plan de fissuration final. Ce mode de rupture ne pouvait pas être détecté par les modèles développés

lors de la conception. Pour performer adéquatement, ce concept devrait être modifié de manière à éviter le pliage des barres transversales à proximité de la niche d'ancrage.

Le parapet hybride à niche ouverte présente une excellente performance mécanique lorsqu'il est soumis à un chargement quasi-statique, à l'ultime et en condition de service. La résistance maximale atteinte dépasse de 47 % les exigences du Code S6-2006, la rupture finale est cependant un peu moins ductile que le parapet de référence. La rupture un peu moins ductile ne pose pas de problème, puisque la sur-résistance garantit que le parapet n'atteindra jamais la rupture. Dans l'éventualité où une rupture plus ductile est désirée, une réduction de 20% de la quantité de barres d'ancrage peut être apportée au parapet pour conduire à leur plastification et augmenter la ductilité du processus de rupture. De plus, la fissuration négligeable (inférieure à 0.04 mm à l'interface parapet-dalle et dans la coque du parapet) présentée en conditions de service par le parapet hybride à niche ouverte assurera une durabilité exceptionnelle sous des conditions d'exposition sévères.

INTÉRÊT ÉCONOMIQUE DES PARAPETS PRÉFABRIQUÉS HYBRIDES

La durabilité attendue des parapets hybrides fabriqués avec du BFUP devrait être au moins 3 fois supérieure à celle des parapets coulés en place fabriqués en BO ou BHP. Pour un pont très achalandé, la fréquence de remplacement des parapets coulés en place est d'environ 35 ans. Ainsi, la fréquence de remplacement de parapets préfabriqués hybrides en BFUP atteindrait au moins 75 à 100 ans, éliminant ainsi un remplacement pendant la durée de vie d'un pont.

Le coût de construction par mètre linéaire de parapet préfabriqué hybride est de 16 % supérieur à celui du parapet MTQ 301. Cependant, l'analyse économique sur les travaux de construction et de remplacement des parapets indique que, malgré un coût initial de construction supérieur du parapet préfabriqué hybride, le coût total investi pendant la durée de vie d'un pont (75 à 100 ans) serait inférieur de 72 % à celui du parapet coulé en place. De fait, la durabilité exceptionnelle du parapet hybride en BFUP permettrait d'éviter son remplacement durant la vie utile de l'ouvrage.

RECOMMANDATION

Les résultats du projet de recherche confirment que l'utilisation de parapets préfabriqués hybrides à niche ouverte sur les ponts serait avantageuse à bien des égards. D'une part, l'installation du parapet hybride serait réalisée bien plus rapidement que la fabrication du parapet coulé en place, et ne requiert pas de pompage. D'autre part, le parapet hybride possède une résistance largement supérieure à celle exigée par le Code des ponts, et présente une rupture ductile. Les ouvertures de fissure négligeables mesurées pour des conditions de service et la durabilité exceptionnelle du BFUP permettront d'éviter le remplacement du parapet hybride. Enfin, l'analyse économique sur les travaux de construction et de remplacement du parapet hybride indique que le coût total investi pendant la durée de vie d'un pont (75 à 100 ans) serait inférieur de 72 % à celui du parapet coulé en place.

Dans ce contexte, il est recommandé de poursuivre l'étude des parapets préfabriqués hybrides en BFUP avec une étude du comportement mécanique sous différentes conditions de chargement avec les modélisations numériques et une étude de performance en chantier.

- AASHTO. 1989. Guide Specifications for bridge railings. American Association of State Highway Transportation Officials. Washington, D.C.
- AASHTO. 2007. Bridge Design Specification, SI Units 4th edition. American Association of State Highway Transportation Officials . Washington, D.C.
- Androuet, C., Charron, J.-P. 2010. Freeze-thaw resistance of two fibre reinforced concretes.École Polytechnique de Montréal, Montréal. Report SR10-12.
- Beaumier, É. 2000. Évaluation sous charges statiques de glissières de ponts de type PL-2 et PL-3 en béton renforcé avec de l'armature en matériaux composites.M.Sc. thesis, Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Canada).
- Beaurivage, F. 2009. Étude de l'influence des paramètres structuraux sur les lois de comportement des bétons fibrés pour la conception de structures. M.Sc. thesis. École Polytechnique de Montréal, Montréal.
- Bissonnette, B., Morin, R. 2000. Experimentation of a ternary cement for the rehabilitation of the highway overpass Notre-Dame/St-Augustin in Montréal. Conference on research progress on civil infrastructures in Québec, ACI, Montréal.
- Braike, S. 2007. Conception d'éléments préfabriqués de ponts avec des bétons fibrés à haute et ultra haute performance. M.Sc. thesis. École Polytechnique de Montréal, Montréal.
- CEB-FIB. 2000. Bond of reinforcement in concrete, State-of-art report. International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne. Bulletin 10
- CSA-S6-06. 2006. Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC). CSA International. Toronto, Canada.
- CSA-S6-06. 2006. Commentary to Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC). CSA International. Toronto, Canada.
- CSA-A23.3. 2004. CSA Standard A23.3-04 –Design of Concrete Structures. CSA International. Toronto, Canada.
- Červenka, V., Jendele, L., and Červenka, J. 2012. ATENA Program Documentation – Part 1 - Theory.Cervenka Consulting Ltd. Prague, Czech Republic
- Charron, J.-P., Denarié, E.,Brühwiler, E. 2008. Transport properties of water and glycol in an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under high tensile deformation. Cement and concrete research, 38, pp. 689-698.

- Charron, J.-P., Desmettre, D. 2013. Intérêt de l'utilisation des bétons renforcés de fibres pour la construction d'ouvrages durables. Rapport de recherche SR13-01, École Polytechnique, Montréal.
- Charron, J.-P., Niamba, E., and Massicotte, B. (2011). Static and dynamic behavior of precast bridge parapets in high and ultra high performance fiber reinforced concrete. *ASCE Bridge Engineering Journal* Vol. 16, No 3, p. 413-421.
- Cusson, D., Repette, W. L. 2000. Early-Age cracking in reconstructed concrete bridge Barrier Walls. *ACI Materials Journal*, 97 (4): 438-446.
- Delsol, S. 2012. Évaluation du coefficient d'orientation dans les bétons renforcés de fibres métalliques. M.Sc. thesis. École Polytechnique, Montréal, Canada.
- Duchesneau, F. 2010. Conception de parapet préfabriqué hybrides et monolithiques en utilisant des bétons à haute et ultra-haute performance. M.Sc. thesis. École Polytechnique, Montréal, Canada.
- Duchesneau, F., Charron, J.-P., Massicotte, B. 2011. Hybrid and monolithic precast bridge parapets in high and ultra high performance fibre reinforced concretes, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 38, N° 8, pp. 859-869.
- Habel, K., Charron, J.-P., Braike, S., Hooton, R. D., Gauvreau, P., and Massicotte. 2008. Ultra-high performance fibre reinforced concrete mix design in central Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35 (2): 217-224
- Haluk, A., and Attanayaka, U. 2004. Causes and cures for cracking of concrete barriers., Michigan Department of transportation, Lansing. Research Report RC-1448
- Lai Yung Ngan, C. 2008. Experimental investigation of anchorage capacity of precast concrete bridge barrier for performance level 2. M.Sc Thesis, University of British Columbia, Vancouver.
- Lessard, M.-C. 2009. Conception de pré-dalles en bétons innovants pour les ponts. M.Sc. thesis, École Polytechnique, Montréal, Canada.
- Namy, M. 2012. Structural behavior of bridge decks with cast-in-place or precast concrete bridge barriers when barriers are subjected to static loading, M.Sc. Thesis.École Polytechnique, Montréal, Canada.
- Niamba, É. 2009. Développement de parapets préfabriqués en bétons renforcés de fibres pour les ponts. M.Sc. thesis, École Polytechnique, Montréal, Canada.
- PJCCI et MTQ. 2011. Étude de pré faisabilité portant sur le remplacement de l'actuel pont Champlain - Rapport synthèse - Contrat PJCCI No 61100 (Consortium BCDE : BPR - CIMA+ - DESSAU - EGIS). Montréal, QC, Canada.

Quebec Ministry of Transport (QMT). 2010. Normes - Ouvrages d'art tome III. Ministère des Transport du Québec, Québec.