

## RÉSISTANCE EN CISAILLEMENT ET RÉSISTANCE EN ÉCROUISSAGE STRUCTURAL DE DALLES EN BÉTON RÉPARÉES EN BFUP

M. Pharand<sup>A</sup>, J.-P. Charron<sup>A</sup>

A Polytechnique Montréal, Montréal, Canada.

**RÉSUMÉ :** Le béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) est de plus en plus utilisé en couche mince comme matériau de réparation pour des éléments structuraux endommagés construits en béton ordinaire (BO). Cet article décrit d'abord les essais de cisaillement menés sur des dalles hybrides unidirectionnelles composées d'un substrat en BO et d'une couche de BFUP à la fibre tendue. L'étude des courbes effort-flèche et des déformations de surface par corrélation d'images mettent en évidence le comportement structural biphasé observé dans les dalles hybrides : une action monolithique jusqu'à l'apparition de la première fissure de cisaillement, puis une action mécanique composée offrant une capacité d'écroutissement structural. L'article présente ensuite de nouveaux modèles analytiques, conformes à la philosophie de conception canadienne, qui prédisent la résistance au cisaillement ( $V_R$ ) de l'action monolithique et la résistance en écroutissement structural ( $V_{Rsh}$ ) de l'action mécanique composée. Enfin, les prédictions des modèles analytiques sont comparées aux données expérimentales obtenues.

### 1 INTRODUCTION

La popularité de l'utilisation structurale du béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) a conduit plusieurs pays, dont le Canada, la France, l'Australie, le Japon et la Suisse, à réglementer son utilisation par la formulation de normes. Ces normes intègrent l'apport significatif en traction qu'apporte le BFUP et guident la conception des éléments en BFUP en proposant des coefficients de résistance, des lois de comportement et des modèles de calcul adaptés.

Au Canada, l'utilisation structurale du BFUP est réglementée par l'annexe 8 du Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CSA, 2019). Comme la plupart des normes internationales en France, en Australie et au Japon (AFGC, 2013; AS, 2018; JSCE, 2008), le Code canadien sur le calcul des ponts routiers intègre des modèles de calcul uniquement pour la conception d'éléments entièrement constitués de BFUP. Ainsi, aucune recommandation de calcul n'est faite pour les applications de réparation en BFUP, où un élément hybride est généré à partir d'un substrat en béton ordinaire (BO) et d'une couche de BFUP, ou pour les éléments hybrides BO-BFUP préfabriqués.

Dans le contexte actuel, les ingénieurs concepteurs qui envisagent de renforcer une structure avec du BFUP doivent rechercher des solutions alternatives. Une première alternative serait l'utilisation de la norme suisse (SIA, 2016), la seule norme qui traite de la conception d'éléments hybrides en BO-BFUP. Cependant, cette norme a une validation expérimentale limitée quant à la résistance en cisaillement. De plus, le calcul

de la résistance au cisaillement est basé sur la théorie de la fissuration critique en cisaillement, alors que la philosophie de conception canadienne est basée sur la théorie du champ de compression modifié. Une seconde alternative serait alors d'utiliser la modélisation par éléments finis. L'obtention d'une solution juste et précise avec ce type de modélisation nécessite toutefois un utilisateur avancé et des temps de préparation et de calcul élevés. Elle est donc moins adaptée au contexte industriel.

Étant donné l'absence de recommandations dans le Code canadien sur le calcul des ponts routiers pour la conception d'éléments hybrides en BO-BFUP, un important projet de recherche a été réalisé à Polytechnique Montréal afin de formuler des modèles de calcul analytiques simplifiés. Dans cet article, le comportement à l'effort tranchant de dalles hybrides est traité. La campagne expérimentale réalisée sur des sections hybrides de dalles unidirectionnelles ainsi les résultats obtenus sont d'abord présentés. Puis, les modèles analytiques simplifiés développés pour prédire la résistance en cisaillement et la résistance en écrouissage structural des éléments hybrides sont définis et appliqués. Les paramètres expérimentaux détaillés et l'analyse approfondie des résultats et des modèles peuvent être consultés dans Pharand (2022).

## 2 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

### 2.1 Configuration des dalles et du montage d'essais

Les dalles testées (Figure 1) représentent une bande de 400 mm de large d'une dalle de pont unidirectionnelle en BO (UD-REF) à partir de laquelle 3 configurations de renforcement en BFUP sont appliquées (UD-R, UD-S et UD-RS). La configuration de type R comprend les barres de traction d'origine noyées dans la couche de BFUP ajoutée, celle de type S comprend des barres de traction supplémentaires noyées dans la couche de BFUP ajoutée, celle de type RS combine les barres de traction d'origine et les barres de traction supplémentaires noyées dans la couche de BFUP ajoutée.

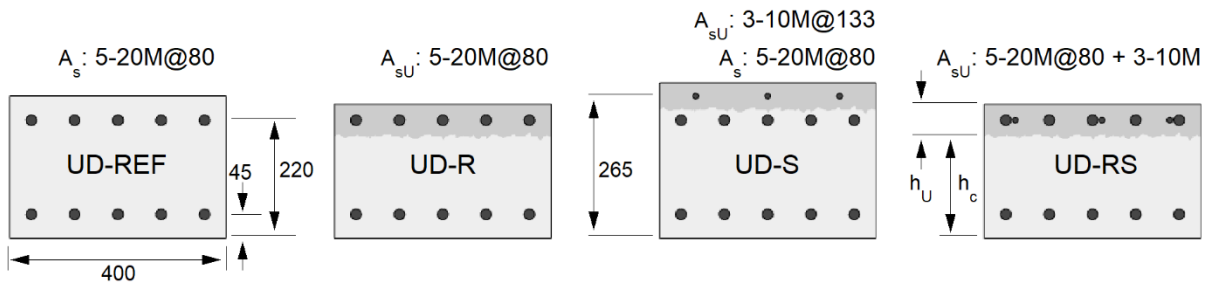


Figure 1. Section des dalles unidirectionnelles testées (dimensions en mm)

Les propriétés de la section transversale des dalles hybrides sont présentées au Tableau 1, où  $h_c$  et  $h_U$  sont respectivement l'épaisseur du BO et du BFUP,  $A_s$  et  $A_{sU}$  sont l'aire des barres d'armature situées respectivement dans le BO et le BFUP,  $d_{eq}$  est la hauteur équivalente de la corde tendue (armatures du BO et du BFUP ainsi que la couche de BFUP), et  $a$  est la centre-à-centre entre l'appui et la charge.

Tableau 1. Propriétés de section

Nom	$h_c$ (mm)	$h_U$ (mm)	$h_U/h_c$	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	$A_{sU}$ (mm <sup>2</sup> )	$d_{eq}$ (mm)	$a/d_{eq}$
UD-REF	265	-	-	1 500	-	220	3.6
UD-R	190	60	0.32	-	1 500	220	3.6
UD-S	240	50	0.21	1 500	300	236	3.3
UD-RS	190	60	0.32	-	1 800	220	3.6

Un montage d'essai en flexion à 3 points a été utilisé pour charger les dalles jusqu'à leur rupture avec un taux de chargement équivalent de 0,15 mm/min (Figure 2). Les dalles ont été retournées (BFUP sur la fibre inférieure tendue) pour reproduire un moment de flexion négatif sur la dalle du tablier du pont. Pendant les essais, la région d'intérêt située de l'appui jusqu'au point de chargement (Figure 2) a été photographiée à une fréquence de 1 Hz afin de mesurer les déplacements en surface et d'en évaluer les déformations par corrélation d'images avec le logiciel Vic-3D (Correlated Solutions Inc, 2020).

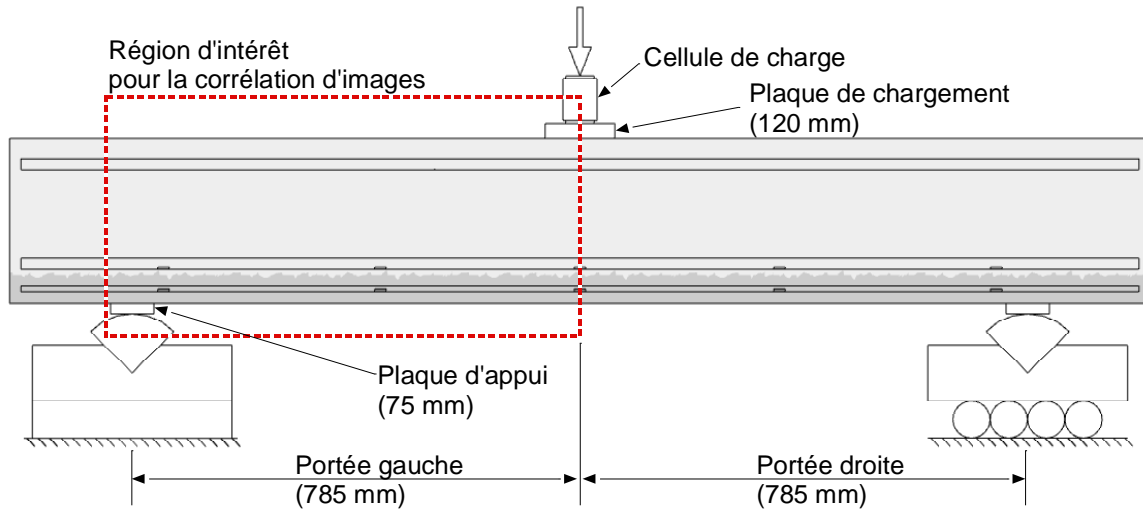


Figure 2. Montage expérimental et région d'intérêt pour la corrélation d'images

## 2.2 Propriétés des matériaux

Les barres d'armature 10M et 20M possédaient une limite élastique de 450 MPa et de 433 MPa respectivement, une résistance ultime est de 655 MPa ainsi qu'un module d'Young de 200 GPa. Le BO possédait une résistance à la compression de 35,4 MPa, un module d'Young de 27 100 MPa et une résistance à la traction par fendage de 2,7 MPa. Le BFUP possédait quant à lui une résistance à la compression de 170,3 MPa, un module d'Young de 44 000 MPa et une résistance à la traction directe de 12,0 MPa. Le comportement à la traction du BFUP mesuré sur des éprouvettes en forme d'os est illustré à la Figure 3. Les propriétés des bétons présentés sont celles mesurées à l'échéance des essais en cisaillement des dalles, soit à 270 jours et à 50 jours pour le BO et le BFUP respectivement.

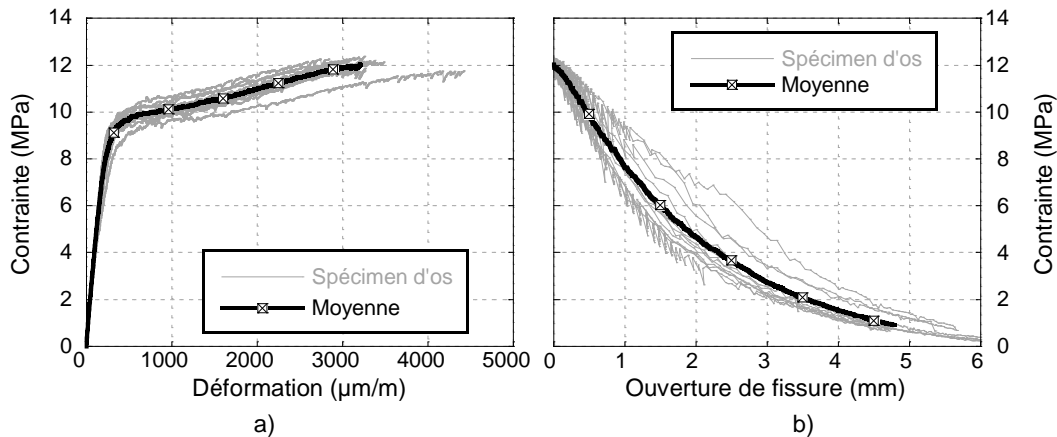


Figure 3. Comportement en traction du BFUP, a) pré-pic, b) post-pic

### 3 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

#### 3.1 Flèche et déformations de surface

La flèche mesurée sous le point de chargement pour toutes les dalles ainsi que les déformations longitudinales  $\varepsilon_x$  de surface dans la région d'intérêt pour les dalles UD-REF et UD-S sont illustrées à la Figure 4. Les images de courbes de niveau pour les déformations longitudinales des dalles UD-REF (Figure 4b) et UD-S (Figure 4c) ont été prises lors de la localisation d'une fissure diagonale de cisaillement dans le BO (image du haut) et lors de la rupture (image du bas).

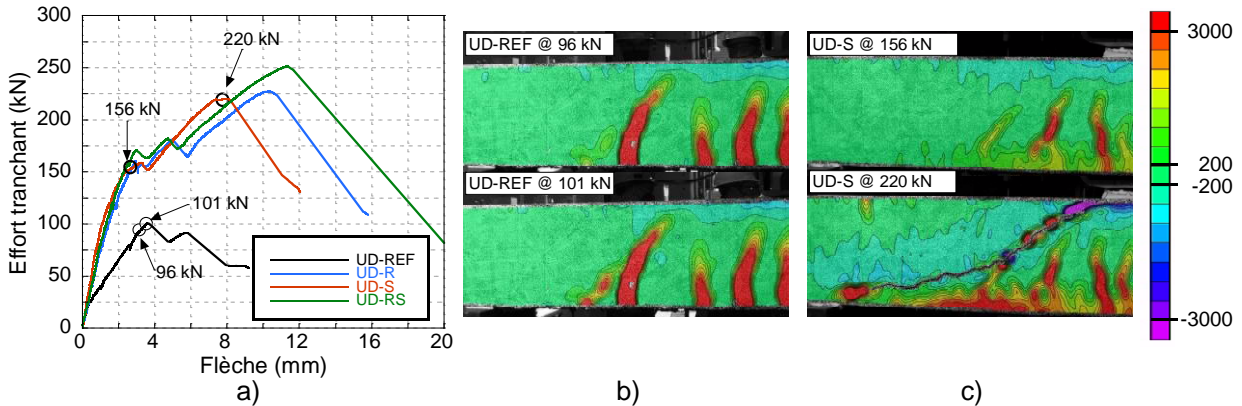


Figure 4. Comportement expérimental des dalles testées, a) courbes effort tranchant-flèche pour les 4 dalles, b) déformations longitudinales  $\varepsilon_x$  pour la dalle UD-REF, c) déformations longitudinales  $\varepsilon_x$  pour la dalle UD-S

Les courbes effort tranchant-flèche à la Figure 4a mettent en évidence deux caractéristiques importantes du comportement à l'effort tranchant des dalles renforcées en BFUP. Premièrement, la résistance maximale à l'effort tranchant ( $V_{Max}$  dans le Tableau 2) est considérablement augmentée. En effet, les dalles hybrides ont atteint entre 2.18 et 2.50 fois l'effort tranchant maximal de la dalle de référence ( $V_{Max REF} = 101$  kN). Deuxièmement, toutes les dalles hybrides présentent un comportement à l'effort tranchant biphasé, alors que celui de la dalle de référence UD-REF monphasé. Initialement, les dalles hybrides se comportent de manière monolithique, la fibre supérieure étant comprimée et la fibre inférieure tendue (UD-S à 156 kN à la Figure 4c) comme la dalle de référence (UD-REF à 96 kN dans la Figure 4b). Pour la dalle de référence, ce comportement monolithique est maintenu jusqu'à la rupture (UD-REF à 101 kN dans la Figure 4b). Pour les dalles hybrides, le comportement monolithique se termine par la localisation d'une fissure de cisaillement diagonale ( $V_{Loc gauche}$  et  $V_{Loc droit}$  pour chaque portée dans le Tableau 2). L'effort tranchant moyen à la localisation de la fissure diagonale de cisaillement sur les deux portées ( $V_{Loc}$ ) est nettement supérieur, soit entre 1.48 et 1.70 fois celui de la dalle de référence ( $V_{Loc REF}$ ). Ensuite, le champ des déformations se réorganise pour les dalles hybrides (UD-S à 220 kN dans la Figure 4c), et une action mécanique composée est activée. À l'effort tranchant maximal, l'ouverture de la fissure diagonale de cisaillement dépasse 1.7 mm et la rupture est causée par l'écrasement du béton près du point de chargement (région colorée en violet à la Figure 4c).

Tableau 2. Effort tranchant à la localisation d'une fissure diagonale de cisaillement et à la rupture

Nom	$V_{Loc gauche}$ (kN)	$V_{Loc droit}$ (kN)	$V_{Loc}$ $/V_{Loc REF}$	$V_{Max}$ (kN)	$V_{Max}$ $/V_{Max REF}$
UD-REF	96	91	1.00	101	1.00
UD-R	169	146	1.68	228	2.26
UD-S	156	120	1.48	220	2.18
UD-RS	159	159	1.70	252	2.50

### 3.2 Déformée

Les déplacements de surface obtenus par corrélation d'images pour la dalle US-S ont été amplifiés 30 fois à la Figure 5 afin d'illustrer la déformée lors de l'action monolithique et lors de l'action mécanique composée.

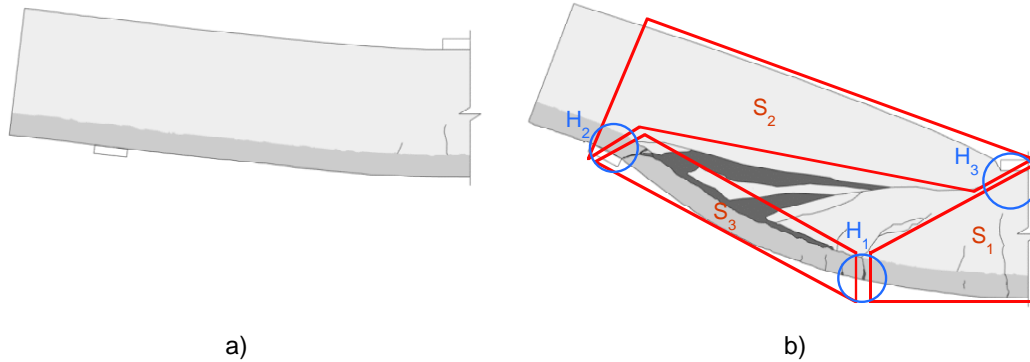


Figure 5. Déformée amplifiée de la dalle hybride UD-S, a) lors de la phase de l'action monolithique, b) lors de la phase de l'action mécanique composée

Tel qu'illustré à la Figure 5a, les dalles hybrides possèdent une courbure concave continue pendant la phase d'action monolithique. Après l'apparition d'une fissure diagonale de cisaillement dans le substrat en BO, une action mécanique composée se développe. Dans cette deuxième phase (Figure 5b), les dalles hybrides sont divisées en 3 sous-sections qui découpent les efforts. La sous-section  $S_1$  est monolithique et transfère des efforts de flexion avec une courbure concave. La sous-section  $S_2$  est en BO, agit comme une bielle de compression entre la plaque de chargement et la plaque d'appui et présente une courbure convexe. La sous-section  $S_3$  est en BFUP, agit comme un tirant ancré par deux rotules plastiques ( $H_1$  et  $H_2$ ) qui permettent un transfert d'effort tranchant et qui induisent une double courbure.

## 4 MODÈLES ANALYTIQUES SIMPLIFIÉS

Deux modèles analytiques simplifiés ont été développés pour évaluer la résistance des phases du comportement des dalles hybrides soumises à un effort tranchant. Le premier modèle évalue la résistance en cisaillement  $V_R$  de l'action monolithique à la localisation d'une fissure diagonale de cisaillement dans le substrat en BO. Le second modèle évalue la résistance maximale en écrouissage structural  $V_{Rsh}$  de l'action mécanique composée à l'écrasement du substrat en BO à la fibre comprimée.

### 4.1 Résistance en cisaillement $V_R$

Pour l'action monolithique, la résistance en cisaillement des éléments hybrides correspond à la résistance offerte par l'engrenure des granulats le long de la fissure diagonale du substrat en BO. Pour considérer l'augmentation de résistance offerte par la contribution du BFUP, la méthode générale du code canadien pour la résistance en cisaillement a été adaptée comme suit.

La résistance en cisaillement  $V_R$  d'une section hybride est calculée en sommant la résistance offerte par l'engrenure des granulats du substrat en BO et la résistance offerte par les armatures transversales le long de la fissure diagonale de cisaillement ( $V_c$  et  $V_s$  respectivement) à l'aide des équations (1) à (9).

Dans l'Éq. (2) pour  $V_c$ ,  $\lambda$  est un facteur tenant compte de la faible densité du béton et est pris égale à 1 pour un BO,  $\beta$  un facteur tenant compte de l'engrenure des granulats dans le béton fissuré,  $f'_c$  est la résistance à la compression (cylindre),  $b_w$  est la largeur de béton considérée en cisaillement,  $d_v$  est la hauteur efficace de cisaillement égale à 0.9 fois la hauteur efficace équivalente de la section  $d_{eq}$ .

Dans l'Éq. (3) pour  $\beta$ ,  $\varepsilon_x$  est la déformation à mi-hauteur imputable aux charges,  $s_{ze}$  est l'espacement effectif des fissures tenant compte de l'espacement des fissures  $s_z$  contrôlé par les armatures et de la grosseur du plus gros granulat  $a_g$ .

Dans l'Éq. (4) pour  $\varepsilon_x$ ,  $M_f$ ,  $V_f$  et  $N_f$  sont respectivement le moment, l'effort tranchant et l'effort normal imputables aux charges,  $E_s$  et  $E_{sU}$  sont le module d'Young de l'armature longitudinale tendue dans le BO ou dans le BFUP.  $A_s$ ,  $A_{sU}$  et  $A_U$  sont l'aire de l'armature longitudinale tendue dans le BO ou dans le BFUP ainsi que l'aire du BFUP.  $E_{Ue}$ ,  $E_{Ush}$  et  $\varepsilon_{Ue}$  sont respectivement le module élastique ou écrouissant du BFUP et la déformation du BFUP à la microfissuration de sa matrice.

Dans l'Éq. (7) pour  $d_{eq}$ ,  $d_i$  est la distance entre la fibre comprimée et le centroïde de chaque lit d'armatures longitudinales tendues ou le centroïde de la couche de BFUP,  $A_i$  est leur aire respective, et  $f_i$  la limite élastique  $f_y$  des armatures ou la contrainte ultime  $f_{Utu}$  du BFUP. L'indice  $i$  renvoie au lit d'armatures considéré ou à la couche de BFUP.

Dans l'Éq. (8) pour  $V_s$ ,  $A_v$  est l'aire des armatures transversales espacées d'une distance  $s$ ,  $f_y$  est la limite élastique des armatures transversales, et  $\theta$  est l'angle d'inclinaison des contraintes diagonales de compression par rapport à l'axe longitudinal de l'élément.

$$V_R = V_c + V_s \quad (1)$$

$$V_c = \lambda \cdot \beta \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d_v \quad (2)$$

$$\beta = \left( \frac{0.4}{1 + 1500 \cdot \varepsilon_x} \right) \cdot \left( \frac{1300}{1000 + s_{ze}} \right) \quad (3)$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{2} \left( \frac{(M_f/d_v + V_f + 0.5N_f) - ((E_{Ue} - E_{Ush}) \cdot A_U \cdot \varepsilon_{Ute})}{E_s \cdot A_s + E_{sU} \cdot A_{sU} + E_{Ush} \cdot A_U} \right) \quad (4)$$

$$s_{ze} = \frac{35 \cdot s_z}{15 + a_g} \geq 0.85 \cdot s_z \quad (5)$$

$$s_z = \begin{cases} d_v, & \text{sans étriers} \\ 300, & \text{avec étriers} \end{cases} \quad (6)$$

$$d_{eq} = \frac{\sum_i d_i \cdot A_i \cdot f_i}{\sum_i A_i \cdot f_i} \quad (7)$$

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d_v}{s \cdot \tan \theta} \quad (8)$$

$$\theta = 29 + 7000 \cdot \varepsilon_x \quad (9)$$

Dans ce modèle adapté, le BFUP d'un élément hybride participe à l'augmentation de la hauteur efficace équivalente de la section  $d_{eq}$ , à la réduction de la déformation à mi-hauteur  $\varepsilon_x$  et à la réduction de l'inclinaison des contraintes de compression  $\theta$ . Cela se traduit par une aire de BO fissurée augmentée et une ouverture de fissure plus fine. Ainsi, la contribution à la résistance au cisaillement de l'engrenure des granulats et celle de l'aire des armatures transversales interceptées sont majorées.

#### 4.2 Résistance à l'écrouissage structural $V_{Rsh}$

Après l'apparition de la fissure diagonale de cisaillement dans le substrat en BO, la résistance aux charges provient d'une action mécanique composée impliquant 3 sous-sections qui permet un écrouissage structural avec une augmentation de résistance. Ce second mécanisme de résistance est représenté à la Figure 6

par un modèle simplifié composé de bielles, de tirants et de rotules plastiques. Dans ce modèle, les efforts de compression transisant dans le substrat en BO sont obtenus par les bielles  $C_1$  et  $C_2$ , les efforts de traction transisant par la corde tendue (armatures du substrat et du BFUP, et couche de BFUP) sont obtenus par les tirants  $T_1$  et  $T_2$ , et l'effort tranchant équivalent transisant dans la couche de BFUP est obtenue en considérant la couche de BFUP et les armatures qui la compose comme une poutre en BFUP dont le moment résistant  $M_U$  est calculé en utilisant le Code canadien de conception des ponts routiers (CSA, 2019).

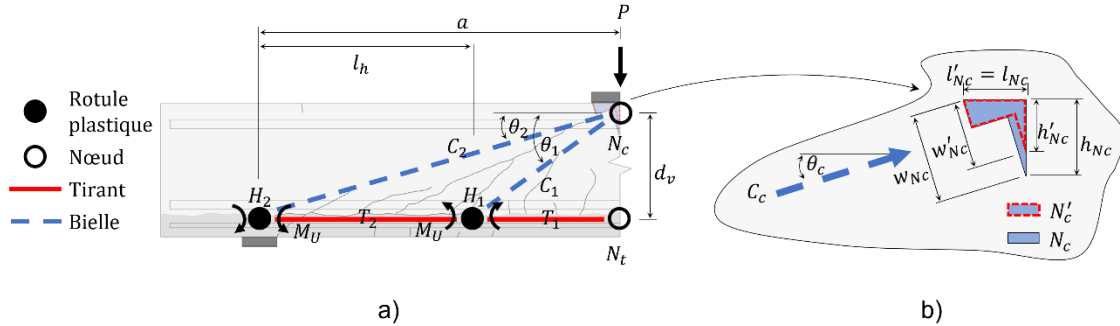


Figure 6. Modèle simplifié de l'action mécanique composée, a) position des bielles, tirants et rotules plastiques, b) nœud effectif  $N'_c$  et bielle combinée  $C_c$

Bien que plusieurs modes de défaillance puissent découler de cette action mécanique composée (résistance des bielles, résistance de la corde tendue, résistance des rotules plastiques, résistance de l'interface BO-BFUP au droit de la rotule  $H_2$ ), le plus fréquemment observé expérimentalement est celui dû à l'écrasement du béton au niveau du nœud  $N_c$ . (Ji & Liu, 2020; Noshirvani & Brühwiler, 2013; Pharand, 2022; Sine et al., 2022; Yin et al., 2017). Par conséquent, la résistance en écrasement structural  $V_{Rsh}$  est évaluée en déterminant la charge  $P$  à laquelle la capacité des bielles au nœud  $N_c$  est dépassée. Comme l'action mécanique composée se développe après la localisation de la fissure diagonale de cisaillement,  $V_{Rsh}$  ne peut pas être inférieure à  $V_R$  (Éq. (10)).

La résistance des bielles au nœud  $N_c$  ( $R_{Nc}$ ) est donnée par l'Éq. (11). Pour obtenir cette dernière, les bielles  $C_1$  et  $C_2$  ont été combinées en une bielle  $C_c$  dont l'effort y transisant est donné par l'Éq. (12). De la sorte, la distance inconnue entre les rotules plastiques ( $l_h$  in Figure 6) n'est plus requise.

Dans l'Éq. (11),  $l_{Nc}$  est la longueur du nœud  $N_c$  (demi-longueur de la plaque de chargement),  $\theta_c$  est l'angle d'inclinaison de la bielle combinée  $C_c$ , et  $h'_{Nc}$  est la hauteur effective du nœud.

Pour permettre l'estimation par calcul direct de la résistance des bielles au nœud,  $\theta_c$  est pris égale à  $\theta_2$  (Éq. (13)). D'autre part, comme la fissure diagonale de cisaillement entrave physiquement le développement de la pleine hauteur du nœud  $N_c$ , une hauteur effective est obtenue à partir de l'Éq. (14).

Dans l'Éq. (14),  $V_R$  est la résistance en cisaillement de l'action monolithique déterminée à l'Éq. (1), et  $M_{ru}$  est le moment résistant de la pleine section hybride en BO-BFUP à l'écrasement en compression de la fibre comprimé.  $M_{ru}$  peut être estimé par le modèle moment-courbure simplifié présenté dans Pharand (2022) ou par tout autre analyse sectionnelle détaillée.

La charge  $P$ , qui correspond à la résistance à l'écrasement structural  $V_{Rsh}$ , est alors déterminée en résolvant l'équation quadratique Éq. (15). Selon le contexte du problème, la solution est donnée par les équations (16) à (19).

$$V_{Rsh} = \max(P, V_R) \quad (10)$$

$$R_{Nc} = (l_{Nc} \cdot \sin \theta_c + h'_{Nc} \cdot \cos \theta_c) \cdot b_w \cdot f'_c \cdot 0.85 \quad (11)$$

$$C_c = \left( \left( P \cdot a / d_v - 2 \cdot M_U / d_v \right)^2 + P^2 \right)^{1/2} \quad (12)$$

$$\theta_c = \tan^{-1} \left( \frac{P \cdot d_v}{P \cdot a - 2 \cdot M_U} \right) \approx \theta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{d_v}{a} \right) \quad (13)$$

$$h'_{Nc} = \frac{\min(V_R \cdot a; M_{ru}) / d_v}{\alpha_1 \cdot f'_c \cdot b} \quad (14)$$

$$C_c - R_{Nc} \leq 0 \quad (15)$$

$$P = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A} \quad (16)$$

$$A = 1 + a^2 / d_v^2 \quad (17)$$

$$B = -4 \cdot a \cdot M_U / d_v^2 \quad (18)$$

$$C = 4 \cdot M_U^2 / d_v^2 - R_{Nc}^2 \quad (19)$$

## 5 PRÉDICTIONS DES MODÈLES ANALYTIQUES SIMPLIFIÉS

Les modèles simplifiés évaluant la résistance en cisaillement et la résistance en écroutissage structural ont été utilisés sur les 3 dalles hybrides unidirectionnelles décrites précédemment pour prédire leurs résistances respectives en cisaillement et en écroutissage structural. Le ratio des prédictions ( $V_R$  et  $V_{Rsh}$  respectivement) sur les résultats expérimentaux ( $V_{Loc}$  et  $V_{Max}$  respectivement) est présenté à la Figure 7. Dans la Figure 7a, le résultat des portées gauche et droite est illustré, tandis que seule la valeur de la portée critique est illustrée dans la Figure 7b.

Les prédictions des modèles pour la résistance en cisaillement  $V_R$  et pour la résistance en écroutissage structural  $V_{Rsh}$  sont raisonnablement précises et conservatrices (rapports  $V_R/V_{Loc}$  et  $V_{Rsh}/V_{Max}$  inférieurs à 1 dans la Figure 7). Une tendance similaire a été obtenue sur une autre série de dalles hybrides préendommagées avant l'application du renforcement en BFUP, ainsi que sur des poutres et des dalles extraites de la littérature. En moyenne, les modèles de résistance en cisaillement et de résistance en écroutissage structural ont un ratio de prédiction de 0,81 et de 0,93 respectivement (Pharand, 2022). La justesse des prédictions des modèles est tributaire du fait qu'ils considèrent un mécanisme de résistance distinct propre à chaque phase du comportement (engrenure des granulats pour l'action monolithique et système de bielles et tirants avec rotules plastiques pour l'action mécanique composée).

L'utilisation combinée de ces modèles analytiques simplifiés permet ainsi d'établir un portrait fidèle du comportement à l'effort tranchant de dalles en BO renforcées par une couche de BFUP à la fibre tendue et d'en effectuer le dimensionnement.



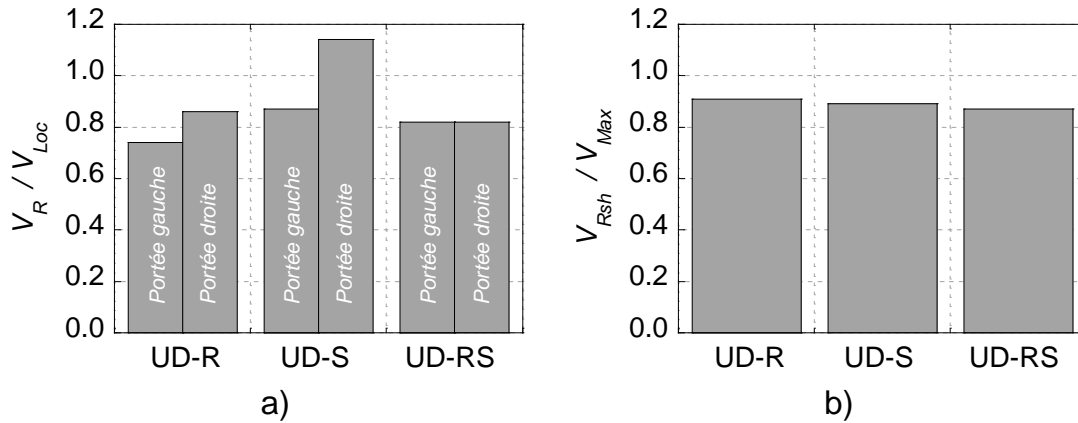


Figure 7. Ratios des prédictions des modèles sur les résultats expérimentaux, a) résistance au cisaillement  $V_R/V_{Loc}$ , b) résistance en écoulement structural  $V_{Rsh}/V_{Max}$

## 6 CONCLUSION

Le renforcement de dalles de ponts en BO à l'aide de BFUP à la fibre tendue bonifie et modifie le comportement à l'effort tranchant des dalles. Afin d'améliorer la compréhension de ce comportement et des mécanismes de résistance qui en résultent, trois configurations de renforcement en BFUP (types R, S et RS) sur des dalles unidirectionnelles en BO ont été étudiées expérimentalement. Les faits saillants de cette campagne expérimentale ainsi que les modèles analytiques dérivés des résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

1. Les dalles hybrides en BO-BFUP ont un comportement biphasé sous l'effet d'un effort tranchant. Dans un premier temps, les dalles possèdent un comportement monolithique. Après la localisation d'une fissure diagonale de cisaillement dans le substrat en BO, elles se divisent en 3 sous-sections et adoptent une action mécanique composée.
2. Le BFUP améliore considérablement la résistance à l'effort tranchant des dalles hybrides. D'une part, durant la phase d'action monolithique, la fissure diagonale de cisaillement se développe sous une charge plus élevée. D'autre part, durant l'action mécanique composée, la réorganisation des efforts permet un écoulement structural avec une augmentation supplémentaire de la résistance.
3. La résistance en cisaillement  $V_R$  de la phase d'action monolithique est calculée par la méthode générale canadienne pour le cisaillement, où la contribution du BFUP est intégrée à la détermination de la déformation à mi-hauteur. Ce modèle adapté prédit la résistance offerte par l'engrenure des granulats avec une précision raisonnable.
4. La résistance en écoulement structural  $V_{Rsh}$  de la phase d'action mécanique composée est calculée à partir d'un modèle de bielles et tirants avec rotules plastiques. Ce modèle prédit la résistance à l'écrasement d'une bielle combinée en BO et offre aussi précision raisonnable.

## 7 REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à souligner le soutien financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) ainsi que celui du Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FRQNT) pour ce projet de recherche. Les auteurs remercient également l'équipe technique du Groupe de recherche en génie des structures de l'École polytechnique de Montréal pour son aide et ses conseils précieux.

## 8 RÉFÉRENCES

- AFGC. (2013). *Bétons fibrés à ultra-hautes performances, Recommandations*. Association Française de Génie Civil.
- AS. (2018). *3600:2018 Concrete structures*. Standards Australia Limited.
- Correlated Solutions Inc. (2020). *Vic-3D Digital Image Correlation*.
- CSA. (2019). *CAN/CSA S6:19 Canadian Highway Bridge Design Code*. Canadian Standards Association.
- Ji, H., & Liu, C. (2020). Ultimate shear resistance of ultra-high performance fiber reinforced concrete-normal strength concrete beam. *Engineering Structures*, 203, 109825. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109825>
- JSCE. (2008). *Recommandations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)*. Japan Society of Civil Engineer.
- Noshiravani, T., & Brühwiler, E. (2013). Experimental Investigation on Reinforced Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Composite Beams Subjected to Combined Bending and Shear. *Acı Structural Journal*, 110(2), 251-261. <https://doi.org/10.14359/51684405>
- Pharand, M. (2022). *Comportement structural et dimensionnement en flexion et à l'effort tranchant d'éléments hybrides en béton ordinaire et en béton fibré à ultra-hautes performances* [Thèse de doctorat, Polytechnique Montréal]. <https://publications.polymtl.ca/10579/>
- SIA. (2016). *SIA 2052 UHPFRC: Materials, Design and Application 592052:2015 fr*. Swiss Society of Engineers and Architects.
- Sine, A., Pimentel, M., Nunes, S., & Dimande, A. (2022). Shear behaviour of RC-UHPFRC composite beams without transverse reinforcement. *Engineering Structures*, 257, 114053. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114053>
- Yin, H., Teo, W., & Shirai, K. (2017). Experimental investigation on the behaviour of reinforced concrete slabs strengthened with ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 155, 463-474. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.077>