

Quatorzième édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Sherbrooke, Québec, Canada
22-23 août 2013

POINÇONNEMENT DE DALLES COMPOSÉES EN BFUP ET BÉTON ARMÉ

M. Bastien-Masse, E. Brühwiler

Laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Suisse

RÉSUMÉ: L'ajout d'une couche de béton fibré à ultra haute performance (BFUP) avec ou sans barres d'armature sur des dalles en béton armé permet d'augmenter leur résistance à l'effort tranchant. Une série d'essais sur des dalles composées en BFUP et béton armé a été menée afin d'étudier la contribution de la couche de BFUP à la résistance au poinçonnement. Les résultats démontrent qu'une couche de BFUP de 50 mm d'épaisseur permet d'augmenter la résistance au poinçonnement d'une dalle de béton jusqu'à 70% sans en diminuer sa capacité de rotation.

MOTS CLES : BFUP, dalles, section composée, résistance ultime, effort tranchant, poinçonnement.

1. INTRODUCTION

Le poinçonnement est un mode de rupture observé pour les dalles de béton armé soumises à des forces concentrées tel que des planchers-dalles d'épaisseur constante appuyés sur des colonnes. La force concentrée (réaction d'une colonne ou charge concentrée) agissant perpendiculairement à la dalle induit des efforts tranchants sur une section critique autour de son point d'application. La résistance au poinçonnement est donc fonction de la résistance à l'effort tranchant de la dalle; elle est souvent inférieure à celle à la flexion si aucune armature verticale n'est disposée dans la dalle. La rupture en poinçonnement est caractérisée par un cône de béton qui traverse soudainement la dalle au-dessus de la colonne. Ce mécanisme de rupture est « fragile », c'est-à-dire que les déformations observées avant la rupture sont relativement petites et qu'il s'accompagne d'une chute de la capacité portante de la dalle (Menétrey, 2002).

Plusieurs dalles existantes ont une résistance au poinçonnement et à l'effort tranchant insuffisante. Afin de les renforcer et de prolonger la durée d'utilisation de la structure, il est proposé d'ajouter une couche de 25 à 75 mm de béton fibré à ultra haute performance (BFUP) avec ou sans barres d'armatures longitudinales de faible diamètre à la surface de la dalle, tel qu'illustré à la figure 1. Le BFUP, avec ses excellentes propriétés mécaniques sert ainsi de couche de renforcement externe à la traction (Habel et al., 2006) dans les zones de moments négatifs.

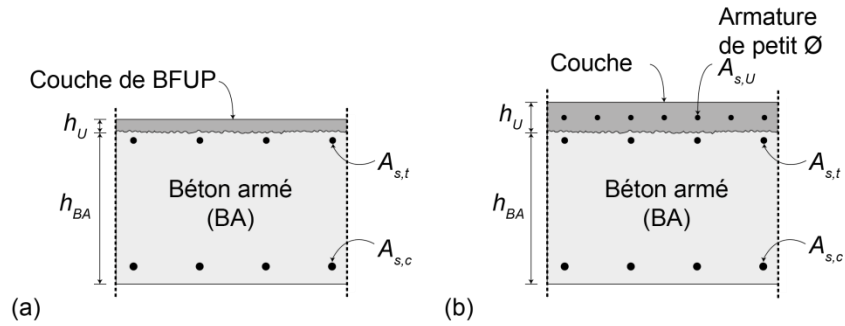


Figure 1. Section typique des éléments composés (Habel et al., 2006) : (a) sans armatures; (b) avec armatures.

Cet article présente les principaux résultats et conclusions de la campagne expérimentale menée sur des dalles composées testées au poinçonnement. L'objectif est de mettre en évidence la contribution de la couche de BFUP à la résistance au poinçonnement des dalles. Les principaux paramètres des essais sont l'épaisseur de la couche de BFUP et le taux d'armature dans celle-ci.

2. ÉTAT DE LA RECHERCHE SUR LES ÉLÉMENTS COMPOSÉS

2.1 Comportement du BFUP en traction

Tel qu'illustré à la figure 2, le comportement en traction du BFUP se divise en trois phases. D'abord le matériau est élastique jusqu'à l'atteinte de sa limite élastique $f_{Ut,el}$. Ensuite, le BFUP montre un comportement écrouissant caractérisé par la création de multiples microfissures. A l'atteinte de la résistance maximale, définie comme résistance à la traction $f_{Ut,u}$, les déformations se localisent au niveau d'une microfissure et la phase adoucissante débute pour laquelle le comportement du matériau est défini par une loi contrainte-ouverture de fissure.

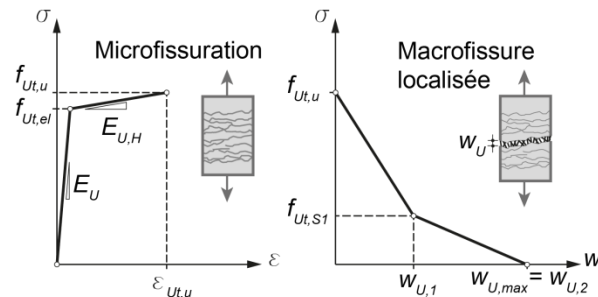


Figure 2. Comportement en traction du BFUP (Habel et al., 2006).

2.2 Comportement des poutres composées

Des essais de flexion menés sur des poutres composées ont démontré que l'ajout d'une couche de BFUP armé permet d'augmenter la résistance jusqu'à 165% par rapport à un élément de béton armé sans couche de BFUP (Oesterlee, 2010). Dans le cas de poutres composées en porte-à-faux soumises à la flexion combinée à l'effort tranchant, les essais ont permis de démontrer qu'une couche de BFUP permet d'empêcher la rupture en effort tranchant en modifiant le mode de rupture pour une rupture en flexion et d'augmenter la résistance de 170% par rapport à une poutre de référence en béton armé (Noshiravani et al., 2013; Bastien-Masse et al., 2012).

Ces essais sur poutres composées en porte-à-faux ont également permis d'identifier le mécanisme de résistance à l'effort tranchant. Ce mécanisme débute par l'apparition d'une fissure diagonale dans la

section de béton. Cette fissure, en cherchant à s'ouvrir, crée une action de levier sur la couche de BFUP et la pousse à se déplacer par rapport au socle de béton armé. Ceci initie un processus d'adoucissement d'un volume de béton sous la couche de BFUP, tel qu'illustré à la figure 3 (Noshiravani et al., 2013). C'est un mécanisme de délamination causée par une fissure intermédiaire (DFI). La couche de BFUP, en résistant à la délamination, est soumise à des efforts de flexion en double courbure et c'est ainsi qu'elle résiste à l'effort tranchant.

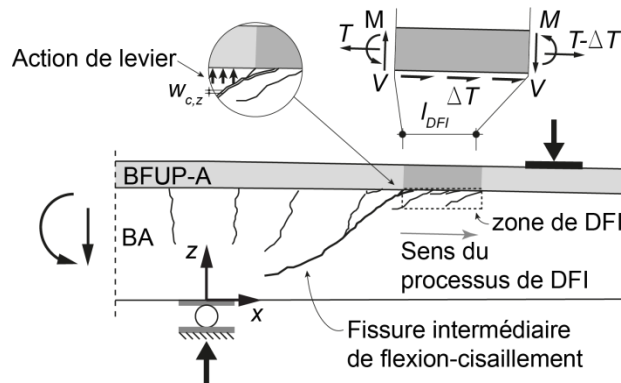


Figure 3. Mécanisme de résistance à l'effort tranchant d'une poutre composée (Noshiravani et al., 2013)

3. MÉCANISMES DE RÉSISTANCE AU POINÇONNEMENT

Différents mécanismes contribuent à la résistance au poinçonnement d'une dalle de béton armé sans armature d'effort tranchant. Autour de la colonne (force concentrée), une bielle inclinée est créée. Lorsque la résistance en traction du béton est atteinte, une fissure critique inclinée à un angle compris entre 25° et 30° se crée le long de cette bielle. Ceci se produit à environ 50 à 70% de la résistance au poinçonnement. Le transfert des contraintes est toujours possible le long de cette fissure grâce à l'engrènement des granulats, l'effet de goujon des barres d'armatures de flexion et la déviation du champ de contrainte autour de la fissure inclinée. Aussi, la propagation de la fissure critique est empêchée par la zone comprimée à la tête de la fissure près du périmètre de la colonne. Lorsque la fissure traverse finalement cette zone la rupture en poinçonnement a lieu (Theodorakopoulos et al., 2002; Broms, 2000).

L'augmentation du taux d'armature de flexion dans une dalle augmente sa résistance mais réduit sa capacité de déformation (Muttoni, 2008). Les mêmes observations ont été faites dans le cas de l'ajout sur des dalles existantes de renforcement en flexion tel que des lamelles de polymères renforcés de fibres, à savoir, les dalles renforcées ont une plus grande résistance et un comportement plus rigide (Harajli et al., 2003).

Le cas du renforcement avec une couche de BFUP se distingue de ces autres méthodes car, tel qu'illustré par le mécanisme de DFI, la couche de BFUP, contribue aussi à la reprise des contraintes et déformations normales à la dalle ce qui permet de conserver une bonne capacité de déformation des éléments renforcés.

4. ESSAIS AU LABORATOIRE

4.1 Spécimens

Pour cette campagne d'essai, 4 dalles carrées de 3 mètres de côté ont été testées. Les résultats des essais sur ces dalles composées de béton armé et d'une couche de BFUP sont comparés à une dalle de référence en béton armé ayant les mêmes dimensions et testée par Guidotti (2010). Le plan d'armature et la géométrie des dalles sont illustrés à la figure 4. Trois dalles (PBM1 à 3) ont une couche de BFUP de 50 mm avec un taux variable de renforcement dans la couche de BFUP. La dernière dalle, PBM4, a une

couche de seulement 25 mm d'épaisseur. Toutes les dalles composées ont une épaisseur totale de 260 mm. La dalle de référence PG19 a une épaisseur de 250 mm. Le plan d'armature de PG19 est identique à celui de PBM4, sans la couche de BFUP. Le tableau 1 résume les différents paramètres géométriques de chaque spécimen.

Les dalles ont toutes été fabriquées dans une usine de préfabrication. La section de béton des dalles composées a été coulée à l'envers et le fond des coffrages a été peint avec un retardateur de prise. Ainsi, le béton de surface a pu être lavé après le décoffrage ce qui a permis d'exposer les granulats. C'est sur cette surface rugueuse que la couche de BFUP (armée ou non) a été coulée, permettant ainsi une adhérence convenable entre les deux matériaux.

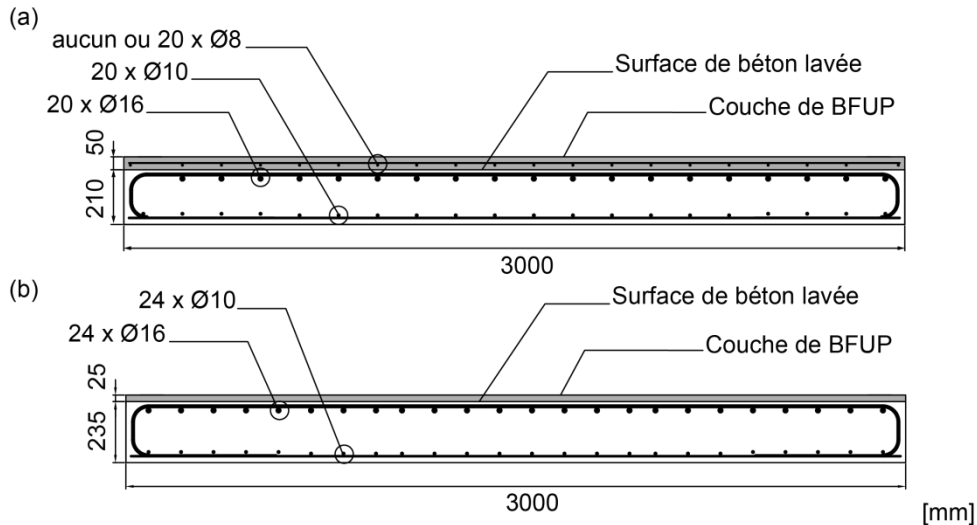


Figure 4. Géométrie et plan d'armature : (a) dalles PBM1 à 3; (b) dalle PBM4

Toutes les dalles présentées ont un taux nominal d'armature de flexion dans le béton armé de 0.75% et une hauteur statique équivalente d_{eq} proche de 210 mm, soit la hauteur statique pour la dalle de référence PG19. La hauteur statique équivalente d_{eq} d'une dalle composée tient compte de la quantité et de la résistance des différents renforcements en traction : l'armature dans le béton, la couche de BFUP et l'armature dans le BFUP (s'il y a lieu). Cette variable se calcule avec l'équation 1 où d_i , A_i et f_i représentent respectivement la hauteur statique, l'aire et la limite élastique en traction du renforcement i considéré.

$$d_{eq} = \frac{\sum d_i A_i f_i}{\sum A_i f_i} \quad (1)$$

Tableau 1. Résumé des paramètres géométriques des spécimens

| Spécimen | h_{BA} [mm] | d [mm] | ρ [%] | h_U [mm] | Type d'acier (BFUP) | d_{eq} (mm) |
|----------------------------------|---------------|----------|------------|------------|---------------------|---------------|
| PBM-1 | | | | | | 202 |
| PBM-2 | 210 | 184 | 0.73 | 50 | B500 | 205 |
| PBM-3 | | | | | inox | 207 |
| PBM-4 | 235 | | | 25 | | 216 |
| PG-19 (Guidotti, 2010) | 250 | 210 | 0.77 | | | |

4.2 Propriété des matériaux

Toutes les dalles sont réalisées avec un béton normal contenant des granulats d'un diamètre maximal (d_g) de 16 mm. Le tableau 2 résume les propriétés moyennes du béton mesurées au même âge que l'essai sur la dalle.

Tableau 2. Propriétés mécaniques des bétons lors de l'essai sur dalle

| Béton | E_c [GPa] | f_c [MPa] |
|-----------------------|-------------|-------------|
| PBM1 | 31.3 | 30.9 |
| PBM2 | 34.6 | 41.3 |
| PBM3 et PBM4 | 33.9 | 39.1 |
| PG19 (Guidotti, 2010) | 32.7 | 46.2 |

Le BFUP utilisé pour les dalles composées est le prémix industriel Holcim 707. Il contient 3% vol. de fibres d'acier droites de 13 mm de longueur. Le tableau 3 donne les principales propriétés mécaniques obtenues par des essais de caractérisation du matériau..

Tableau 3. Propriétés mécaniques du BFUP Holcim 707

| E_U [GPa] | f_{Uc} [MPa] | $f_{Ut,el}$ [MPa] | $f_{Ut,u}$ [MPa] | $\epsilon_{Ut,u}$ [‰] |
|-------------|----------------|-------------------|------------------|-----------------------|
| 44.5 | 150 | 5 | 7 | 1.0 |

Les propriétés mécaniques des barres d'armature utilisées pour la fabrication des spécimens ont été obtenues par des essais de traction dont les résultats sont présentés au tableau 4. Le type inox est un acier inoxydable ayant une haute résistance élastique de plus de 700 MPa. Le type B500 correspond à un acier standard ayant une limite élastique nominale de 500 MPa.

Tableau 4. Propriétés mécaniques de l'acier d'armature

| Type | Diamètre [mm] | f_{sy} [MPa] | f_{su} [MPa] | ϵ_{su} [‰] |
|------|---------------|----------------|----------------|---------------------|
| inox | 8 | 770 | 900 | 3.0 |
| | 8 | 536 | 606 | 5.7 |
| B500 | 10 | 520 | 616 | 7.5 |
| | 16 | 550 | 621 | 11.8 |

4.3 Montage et protocole d'essai

La figure 5 présente le montage pour les essais de poinçonnement. La face inférieure de la dalle (côté béton) est appuyée au milieu sur une colonne carrée de 260 mm de côté. La force est ensuite appliquée à la surface de la dalle (côté BFUP) en 8 points placés sur un cercle de 1500 mm de rayon. La couche de BFUP est donc sollicitée en traction.

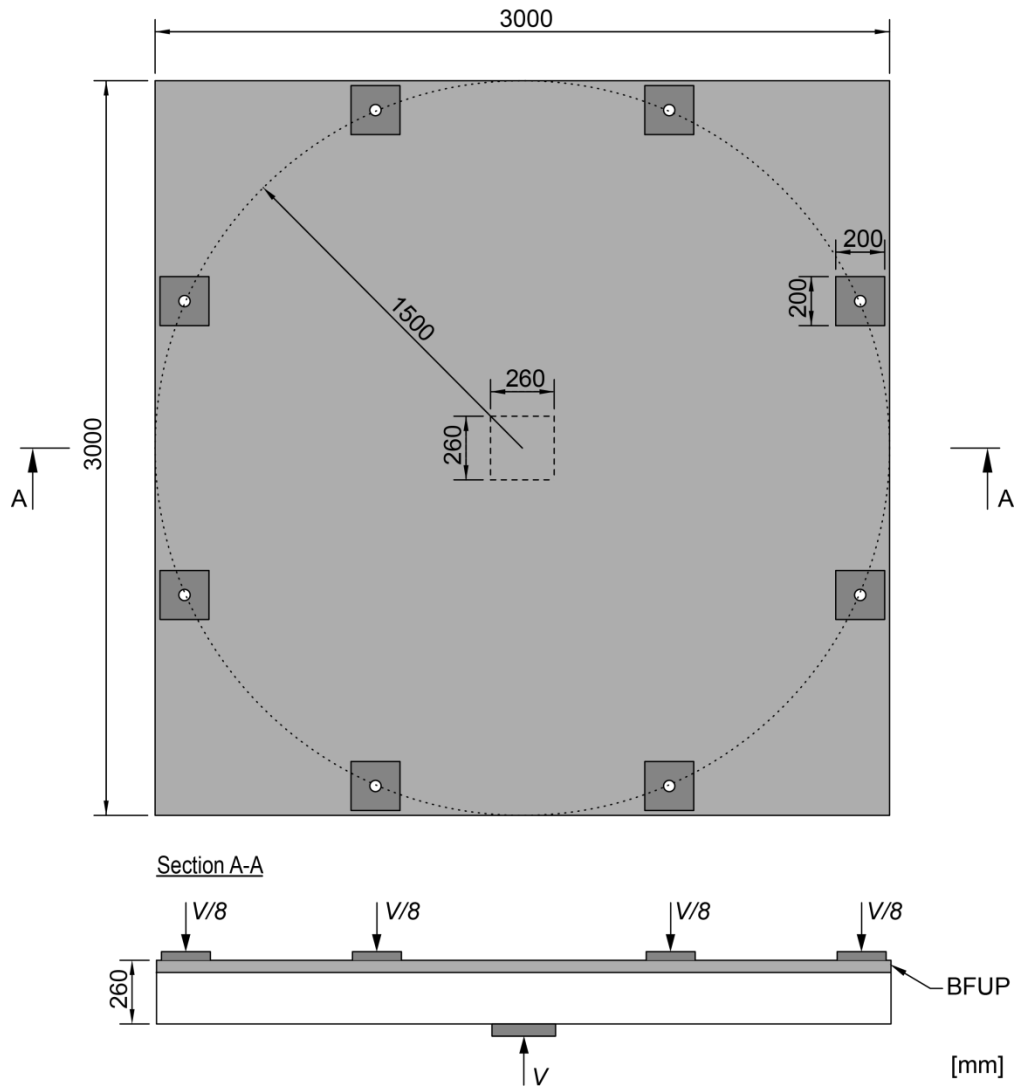


Figure 5. Montage expérimental

Au début de l'essai, la dalle est soumise à son poids propre (soit 56 kN). L'essai est contrôlé en déplacement au moyen de vérins hydrauliques. Une série de capteurs de force mesurent les forces résistantes de la dalle. La rotation de la dalle ainsi que la déflexion sont mesurées en différents points. Enfin, les déformations des faces de béton et de BFUP sont également enregistrées.

5. RÉSULTATS ET DISCUSSION

5.1 Résultats

Les courbes normalisées force-rotation pour chacune des cinq dalles se trouvent à la figure 6. Les courbes sont normalisées selon l'équation 2.

$$y = \frac{v}{b_0 d \sqrt{f_c}}, \quad x = \frac{\psi d}{d_{g0} + d_g} \quad (2)$$

Cette opération permet afin d'éliminer l'effet sur la résistance V des différentes résistances f_c du béton et des différentes hauteurs statiques d de l'armature de flexion dans le béton. La variable b_0 est le périmètre

de contrôle placé à une distance de $0.5d$ des bords de la colonne tel que défini par le Model Code 2010 (fib, 2012). Enfin, la rotation est multipliée par la valeur $d/(d_{g0}+d_g)$ pour annuler l'effet de l'épaisseur de la dalle et de la taille des granulats (Muttoni, 2008). Dans ce cas-ci, $(d_{g0}+d_g)$ vaut 32 mm pour les cinq dalles.

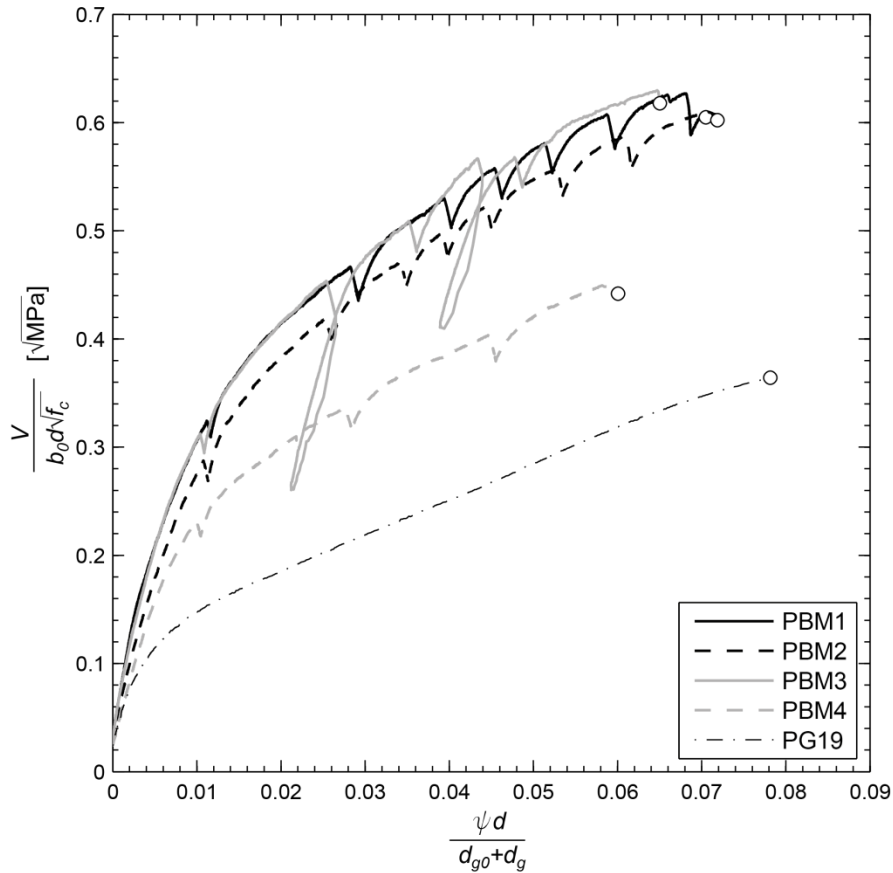


Figure 6. Courbes force-rotation normalisées

Le tableau 5 résume les principaux résultats des essais de poinçonnement :

- V_R : la résistance ultime de la dalle (force de rupture);
- ψ_R : la rotation maximale de la dalle à la rupture;
- V_{res} : la résistance résiduelle de la dalle après la rupture;
- α_{min} : l'angle minimal du cône de poinçonnement mesuré sur la coupe de la dalle réalisé sur son axe central après l'essai.

Tableau 5. Principaux résultats

| Spécimen | V_R [kN] | ψ_R (‰) | Gain [%] | V_{res} [kN] | V_{res}/V_R [%] | α_{min} |
|----------------------------------|------------|--------------|----------|-----------------------|-------------------|----------------|
| PG-19 (Guidotti, 2010) | 860 | 12.1 | | <i>Non disponible</i> | | 22° |
| PBM-1 | 1076 | 11.5 | 72 | 353 | 33 | 24° |
| PBM-2 | 1210 | 12.0 | 67 | 367 | 30 | 28° |
| PBM-3 | 1172 | 11.3 | 73 | 315 | 27 | 21° |
| PBM-4 | 1010 | 8.82 | 23 | 261 | 26 | 29° |

Le gain de résistance présenté au tableau 5 est calculé avec les forces normalisées (équation 2). La figure 7 présente la forme des cônes de poinçonnement observée sur les coupes représentant l'état après l'abandon de l'essai.

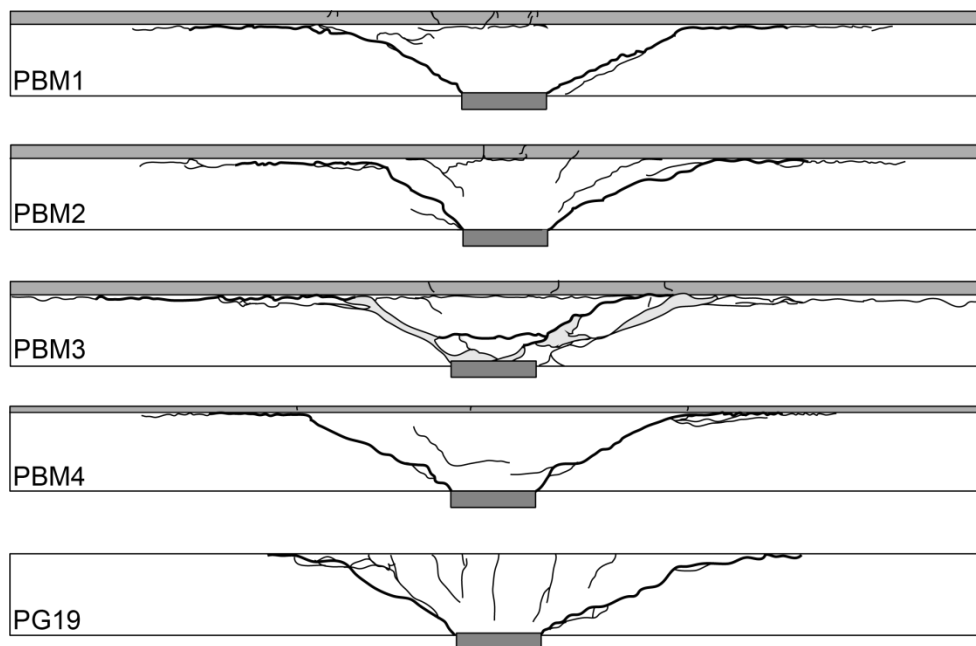


Figure 7. Patrons de fissurations sur l'axe central de la dalle

5.2 Discussion

Ces résultats d'essais permettent d'abord d'observer que pour une même hauteur statique et résistance de béton, une couche de BFUP de 50 mm d'épaisseur permet une augmentation de la résistance ultime de 67% et plus. Par contre l'ajout d'armature dans la couche de BFUP n'apporte aucun bénéfice notable à la résistance au poinçonnement de la dalle. En effet, en observant les courbes force-rotation à la figure 6, on remarque que les courbes des dalles PBM 1 à 3 sont pratiquement superposées.

La rotation à la rupture (ψ_R) pour les dalles PBM1 à 3 est environ la même que celle de la dalle de référence PG19. Ainsi, l'utilisation d'une couche de BFUP de 50 mm d'épaisseur permet d'augmenter la résistance au poinçonnement d'une dalle de béton sans diminuer sa capacité de rotation.

Le cas de la dalle PBM4, avec une couche de seulement 25 mm de BFUP est différent puisque cette mince couche de BFUP ne peut pas reprendre l'effort tranchant de la même façon et agit principalement comme un renforcement en traction unidirectionnel. Ainsi, le résultat obtenu s'approche des observations faites pour un renforcement avec des lamelles de carbone collées (Harajli, 2003), soit une augmentation de la résistance de plus de 20% mais une diminution de la capacité de rotation.

Les patrons de fissurations illustrés à la figure 7 donnent des informations intéressantes sur les mécanismes de rupture. D'abord, il apparaît que pour les cinq dalles, la forme du cône de poinçonnement est similaire avec des angles minimaux (α_{min}) entre 20° et 30°. Ainsi, l'ajout de la couche de BFUP n'a pas modifié l'angle d'inclinaison de la fissure critique. Par contre, cette fissure critique pivote à la hauteur des barres d'armature dans le béton pour devenir parallèle à la couche de BFUP. Il est probable que cette délamination apparaisse au moment où la fissure critique s'ouvre et que le cône de poinçonnement se déplace verticalement. Le cône ne pouvant pas traverser la couche de BFUP plus rigide, la fissure doit pivoter pour devenir parallèle à l'interface béton-BFUP. Ensuite, la couche de BFUP est sollicitée principalement en flexion au-dessus du cône de poinçonnement. Ceci n'est pas sans rappeler l'effet

goujon ainsi que le mécanisme de résistance à l'effort tranchant observé pour les essais sur poutre et provoqué par l'apparition d'une zone de DFI (figure 3).

Enfin, après la chute de résistance due à l'ouverture de la fissure critique et à l'enfoncement du cône de poinçonnement dans la section de béton, une résistance résiduelle (V_{res}) de 26 à 33% de la résistance ultime a été mesurée sur les dalles composées.

6. CONCLUSION

Les essais réalisés au laboratoire ont permis de démontrer que l'ajout d'une couche de BFUP permet d'augmenter de plus de 67% la résistance au poinçonnement d'une dalle de béton armé démontrant ainsi l'efficacité de cette méthode de renforcement. L'utilisation d'une couche de BFUP de 50 mm permet également de conserver la capacité de rotation de la dalle.

Les résultats de ces essais serviront de base pour le développement de modèles analytiques pour le dimensionnement de renforcement au poinçonnement et à l'effort tranchant des dalles bidirectionnelles.

7. RÉFÉRENCES

- Bastien-Masse, M. et Brühwiler, E. (2012) Mode de rupture et résistance d'éléments composés en BFUP armé et béton armé, *13e édition des Journées scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton*, (RF)²B, Lyon, France, 5-6 juillet 2012
- Broms, C.E. (2000) Elimination of flat plate punching failure mode, *ACI Structural Journal*, 97 (1): 94-101.
- Fédération Internationale du Béton (fib). (2012) *Model Code 2010 – Final draft*, Bulletins 65 et 66, Lausanne, Suisse.
- Guidotti, R. (2010) *Poinçonnement des planchers-dalles avec colonnes superposées fortement sollicitées*, Thèse No. 4812, Ibéton, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suisse.
- Habel, K., Denarié, E. et Brühwiler E. (2006) Structural response of elements combining Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concretes (UHPFRC) and reinforced concrete, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 132 (11): 1793-1800.
- Harajli, M. H. et Soudki, K. A. (2003) Shear Strengthening of Interior Slab-Column Connections Using Fiber-Reinforced Polymer Sheets, *Journal of Composites for Construction*, 7 (2): 145-153.
- Menétrey, Ph. (2002) Synthesis of punching failure in reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites*, 24: 497-507.
- Muttoni, A. (2008) Punching Strength of Reinforced Concrete Slabs without Transverse Reinforcement. *ACI Structural Journal*, 105 (4): 440-450.
- Noshiravani, T. et Brühwiler, E. (2013) Experimental Investigation on R-UHPFRC – RC Composite Beams Subjected to Combined Bending and Shear, *ACI Structural Journal*, 110 (2): 251-261.
- Oesterlee, C. (2010). *Structural Response of Reinforced UHPFRC and RC Composite Members*, Thèse No. 4848, MCS, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suisse.
- Theodorakopoulos, D.D. et Swamy, R.N. (2002) Ultimate punching shear strength analysis of slab-column connections, *Cement & Concrete Composites*, 24:509-521.