

Renforcement en cisaillement de piles de pont de type voile avec chemisage en BFUP

Renaud FRANSSSEN
FRIA (F.R.S. – FNRS)
Urban and Environmental
Engineering, Université de
Liège, Allée de la
découverte 9, 4000 Liège

Luc COURARD
Urban and Environmental
Engineering, Université de
Liège, Allée de la
découverte 9, 4000 Liège

Boyan MIHAYLOV
Urban and Environmental
Engineering, Université de
Liège, Allée de la
découverte 9, 4000 Liège

Résumé

La maintenance des structures vieillissantes pose de sérieux défis partout dans le monde. Parmi les matériaux utilisés pour des méthodes de réhabilitation durables, les bétons fibrés ultra-performants (BFUP) présentent des propriétés mécaniques exceptionnelles ainsi qu'une très bonne durabilité. Ce projet s'intéresse à une méthode de réparation et de renforcement des piles de pont par chemisage en BFUP. Ces piles sont souvent soumises à des environnements agressifs et peuvent être sensibles, en cas de séisme, à des ruptures fragiles par cisaillement. Cet article présente les résultats d'une campagne de quatre essais à rupture réalisés sur des piles de pont à section rectangulaire de 1.50 x 0.23 m² et 2.3 m de hauteur. Le spécimen de référence présente un faible nombre d'étriers tandis que les trois autres piles, en addition aux étriers, ont subi une préparation de surface puis ont été renforcées avec un chemisage en BFUP dont l'épaisseur et la liaison avec le béton variaient d'une pile à l'autre. Les résultats montrent l'influence de la couche de BFUP et de la préparation de surface en termes de comportement global et de contrôle des fissures.

Mots-clés : *cisaillement ; renforcement ; piles de pont ; BFUP ; chemisage*

1. Introduction

Dans le monde, la maintenance des ouvrages de génie civil est un problème persistant. Les défis techniques, environnementaux et économiques à relever sont énormes tandis que les solutions de réparations ne sont pas toujours durables et requièrent des inspections régulières. D'une part, le temps et les investissements requis pour la réhabilitation des structures âgées augmentent. Le nombre de structures nécessitant une réparation va rapidement augmenter dans les années à venir. En région wallonne (Belgique) par exemple, une majeure partie des infrastructures publiques ont été construites dans les années 70-80. D'autre part, le manque de ressources disponibles et la durabilité limitée des réparations forcent les agences publiques à se concentrer sur les ouvrages les plus détériorés alors que d'autres sont ignorés. Dans ce contexte, les bétons fibrés à ultra-haute performance constituent une classe de matériaux prometteurs dans le domaine de la réparation, la réhabilitation et le renforcement des structures en béton [1,2]. Ces matériaux sont basés sur une granulométrie assez fine et continue. De plus, le rapport eau sur ciment est généralement faible, l'ouvrabilité du mix étant facilitée par l'emploi d'une quantité importante de super plastifiants [3]. Finalement, des fibres en acier sont ajoutées au mélange afin de donner une résistance en traction et en flexion au matériau. Ce type de composition permet d'obtenir des propriétés appréciées dans le domaine de la réparation. En premier lieu, la résistance en compression de ces mélanges atteint des niveaux très élevés (150-300 MPa) [4]. Mais plus important, la ductilité et la résistance en traction sont fortement améliorées par rapport aux bétons classiques [5]. Les fibres d'acier permettent aussi d'améliorer le contrôle des fissures en réduisant l'espacement et l'ouverture de celles-ci. Une dernière propriété, propre aux matériaux résultant de ce type de granulométrie, est leur quasi

impermeabilité aux agents agressifs de l'environnement [6-9]. Ces agents, comme les chlorures, sont souvent responsables de la durabilité limitée des ouvrages en béton. Ces propriétés ouvrent de nouveaux horizons pour la réparation durable des structures en béton vieillissantes. Lors de la maintenance des ponts, une attention particulière est portée sur la partie inférieure des piles qui sont exposées à des environnements agressifs impliquant des sels de déverglaçage ou des projections d'eau. En raison de l'introduction récente de normes sismiques plus sévères et/ou d'une mauvaise conception originale, ces zones pourraient nécessiter une protection contre la corrosion et un renforcement vis-à-vis des ruptures fragiles en cisaillement. Dans la littérature, on retrouve plusieurs études, du même groupe, qui se concentrent sur le défaut des joints de chevauchement dans les voiles en béton armé [10-13]. Cependant, les chercheurs dans le domaine des renforcements de ponts se sont principalement concentrés sur la réparation des tabliers [14-15]. L'objectif de ce projet est de prouver l'efficacité de la méthode de chemisage en BFUP pour la réparation et le renforcement de piles de pont de type voile.

2. Programme expérimental

La campagne expérimentale comprend le chargement horizontal dans leur plan, jusqu'à rupture, de quatre voiles en béton armé. Les voiles seront simultanément soumis à une charge verticale constante durant la durée du test, représentant le poids propre du pont. Ces éléments de relativement grande échelle représentent des piles de pont de type voile. Les voiles en béton armé ont une hauteur de 2.3 m et une largeur de 1.5 m (Fig. 1). L'épaisseur des voiles est de 0.23 m. La distance entre l'axe d'application de la force et la base du voile est de 2.55 m.

Le spécimen de référence est uniquement constitué de béton armé tandis que les trois autres voiles sont pourvus d'une couche de renforcement. Afin d'obtenir une géométrie constante, ces trois voiles ont subi une préparation de surface menant à une section réduite. Par la suite, ils ont été renforcés par une chemise de BFUP, les ramenant à une géométrie identique à celle du voile de référence.

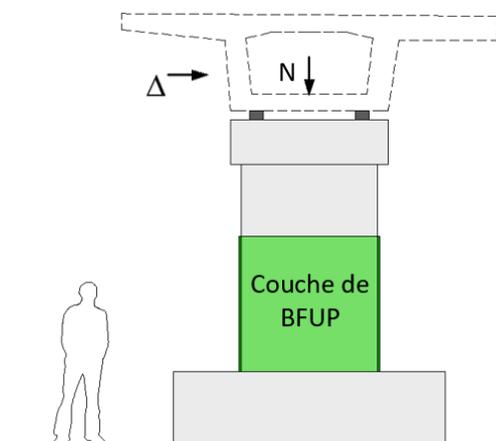


Fig. 1 Géométrie des voiles

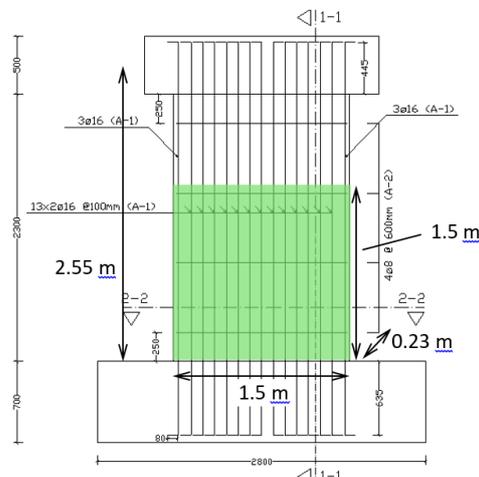


Fig. 2 Armature des voiles

2.1. Matériaux

L'acier des armatures est de type BE500S et présente un module de Young de 200'000 MPa. Deux diamètres (Φ) ont été utilisés dans cette étude. Les limites d'élasticités, limites ultimes et déformations ultimes mesurées sont présentées en Table 1.

Table 1 Propriétés de l'acier des armatures

Φ (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_u (%)
8	577	638	4.65
16	522	609	7.00

Le béton est composé de ciment CEM III/A 42.5 N LA, la dimension maximale des agrégats est de 16 mm et la classe de fluidité est S5. Au jour des tests, la résistance en compression du béton (f'_c) mesurée était relativement constante avec une moyenne de 49 MPa.

Le béton fibré ultra-haute performance est le « WELL STRONG HPC. », produit par la société *ABRALUX COLORI BEGHÈ SRL* en Italie. Des tests de résistance en compression ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques de 22 cm de haut et 11 cm de diamètre, suivant les normes françaises [16-17]. Le BFUP a atteint une résistance en compression comprise entre 120 et 125 MPa. Le volume (V_f), la longueur (L_f), le diamètre (d_f) et la résistance ultime (f_u) des fibres figurent dans la Table 2. Par rapport à d'autres BFUP disponibles [18-19], ces propriétés se situent dans la gamme basse.

Table 2 Propriétés nominales des fibres du BFUP

Vf (%)	L _f (mm)	d _f (mm)	f _u (MPa)
1.25	17	0.2	2200

2.2. Réalisation des voiles

Bien que le premier voile soit exclusivement constitué de béton armé, les voiles 2 à 4 ont été renforcés par une enveloppe de béton fibré ultra-haute performance dans leur partie basse (1.5x1.5 m), voir Fig. 1. Les différentes variables de la campagne expérimentale sont reprises dans la Table 3. L'épaisseur de la réparation en BFUP ainsi que la préparation de surface variaient d'un voile à l'autre, tandis que la charge constante verticale a été modifiée pour le voile 4. La dernière colonne de la Table 3 représente le rapport entre la charge verticale appliquée (N) et la résistance en compression de la section brute (A_g) en béton.

Table 3 Variables des voiles

# voiles	Épaisseur de BFUP (mm)	Préparation de surface	Charge verticale, N (kN)	N/(A _g f' _c) (%)
1	0	/	1200	6.7
2	30	Lisse	1200	6.6
3	30	Hydro démolition	1200	7.5
4	50	Hydro démolition	2200	14.0

L'objectif de cette campagne expérimentale est d'étudier une nouvelle méthode de réhabilitation, qui serait appliquée sur des ouvrages détériorés. Dès lors, une dégradation de l'armature a été simulée par un faible taux d'armature horizontale. En effet, une pile de pont est principalement concernée par des problèmes d'épaufrures et de corrosion, qui touchent directement les armatures de cisaillement. En prenant en compte ce faible taux d'armature, la pile en béton armé (voile 1) est donc sensible à la rupture fragile par cisaillement. L'armature des piles est présentée à la Fig. 2. L'armature transversale comprend quatre étriers de 8 mm, espacés de 600 mm. Le pourcentage d'acier horizontal est de 0.073 %. L'armature verticale est composée de 32 barres de 16 mm de diamètre, ce qui correspond à un pourcentage d'armatures de 1.86 %.

Les échantillons ont été coulés à l'Université de Liège. Les quatre voiles sont identiques à l'exception du voile 2 qui a été coulé avec un coffrage négatif en polystyrène expansé de 30 mm d'épaisseur sur les 4 faces du voile, pour obtenir une section réduite avec une préparation de surface lisse (Fig. 3).

L'hydro démolition des voiles 3 et 4 a été effectuée par une société spécialisée (Fig. 4). Après analyse par photométrie, l'épaisseur moyenne de béton enlevée est de ~28 mm pour le voile 3 et ~45-50 mm pour le voile 4.

Finalement, le coffrage pour le BFUP ainsi que la mise en place du matériau se sont déroulés dans le laboratoire de mécanique des matériaux & structures de l'ULiège (Fig. 6). L'application du BFUP permet aux voiles 2 à 4 de retrouver la géométrie initiale, celle du voile 1.



Fig. 3 Réalisation voiles BA



Fig. 4 Hydro démolition



Fig. 5 Coffrage BFUP



Fig. 6 Coulage chemises BFUP

2.3. Montage expérimental

Les voiles ont été testés au laboratoire, dans le montage présenté à la Fig. 7. Les charges horizontales et verticales sont appliquées par des vérins contrôlés en pression. Les déplacements hors plan sont empêchés par la présence de poutres latérales au niveau du bloc supérieur.

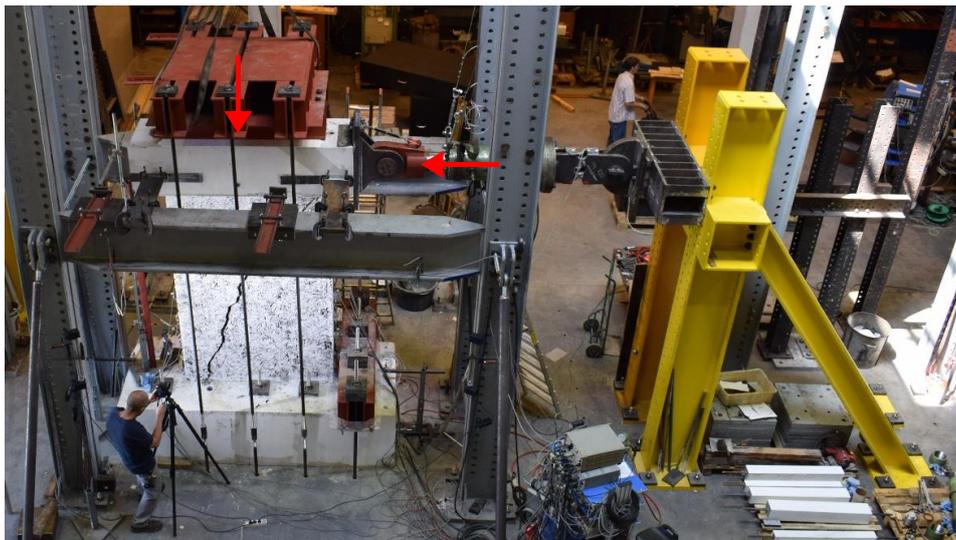


Fig. 7 Dispositif d'essai

Les quatre voiles ont été instrumentés largement à l'aide de capteurs de déplacement et de jauges de déformation. Le schéma d'implantation de ces capteurs est présenté en Fig. 8. Les capteurs les plus importants sont placés dans l'axe de la charge horizontale et sont nommés $hdisp_1$ et $hdisp_2$. Une

attention particulière sera aussi portée sur w_R qui est la mesure de l'ouverture de la fissure en base. En outre, les faces des voiles ont été instrumentées par deux techniques de suivi de déformation. Les points rouges sur la vue en élévation de la Fig. 8 présentent l'emplacement d'émetteurs LED. L'autre face des voiles présentait un mouchetis de point noirs utilisés pour de la corrélation d'image digitale (DIC). Ces deux techniques utilisent des caméras pour suivre les déplacements des émetteurs dans un cas et du mouchetis de points dans l'autre cas. Après le traitement des données, le champ de déformation du voile peut être reconstruit.

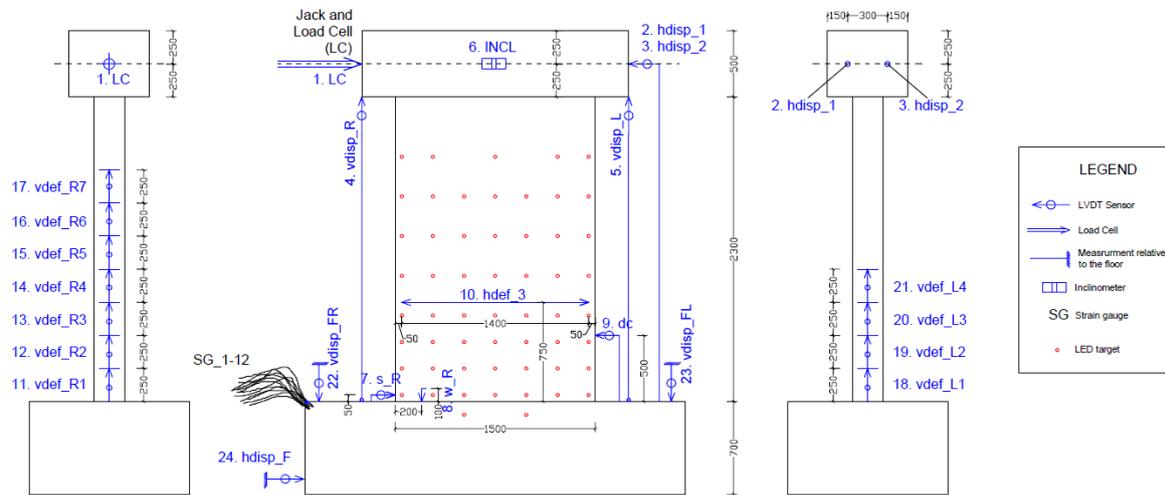


Fig. 8 Instrumentation

3. Résultat des essais

On présente ici le comportement des quatre voiles grâce aux courbes charge-déplacement et charge-ouverture de la fissure en base. On décrit aussi les résultats en ce qui concerne le contrôle des fissures.

3.1. Comportement global

La courbe charge-déplacement du voile de référence est présentée à la Fig. 9. L'axe des abscisses représente le déplacement en tête tandis que les ordonnées portent la charge de cisaillement, horizontale, imposée par le vérin en tête. On observe une partie linéaire au début. Ensuite, des effets non-linéaires apparaissent. La charge à la rupture est de 1040 kN pour un déplacement de 21 mm. Cette rupture est apparue de manière brutale et peut être considérée comme fragile. On n'observe pas de plateau plastique correspondant à de la ductilité. Des paliers de décharge sont marqués sur la Fig. 9. Ceux-ci correspondent à des pauses durant l'essai afin de marquer les fissures et d'en mesurer l'ouverture et le glissement à certains endroits. La Fig. 10 est une photo du voile 1 après rupture. On remarque un schéma typique de rupture par cisaillement avec une fissure principale diagonale courant sur la hauteur de l'échantillon. De près, on a pu observer la rupture des armatures de cisaillement ainsi que le cisaillement important (effet goujon) des armatures longitudinales au voisinage de la fissure. Les lignes rouges sont le résultat des marquages manuels des fissures. Les mesures effectuées par les jauges de déformations placées sur les armatures longitudinales ont montré que la rupture est survenue avant la plastification des armatures tendues.

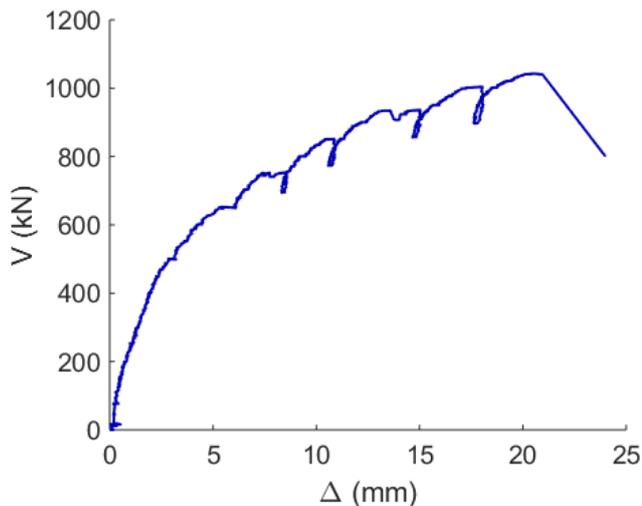


Fig. 9 Courbe charge-déplacement voile 1

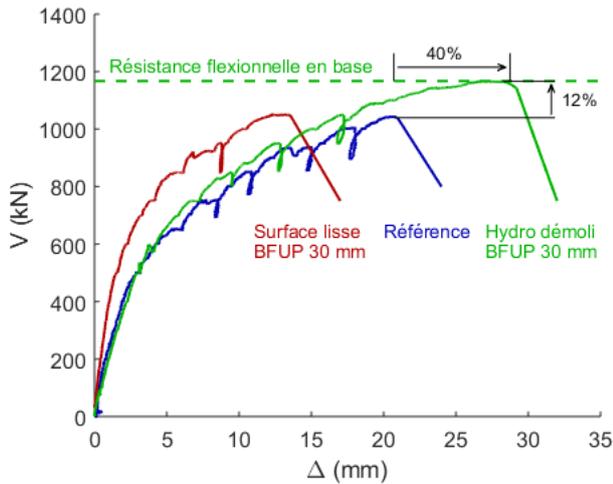


Fig. 10 Rupture du voile 1

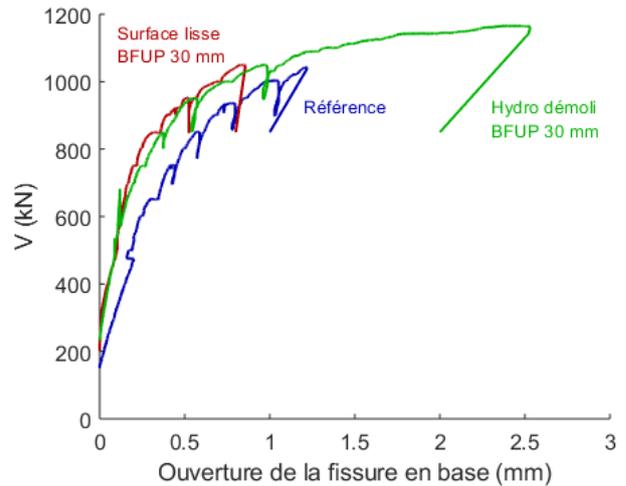
L'influence d'une couche de béton fibré ultra-haute performance sur le comportement des voiles va être discutée ci-après avec l'aide des voiles 2 et 3. Dans les deux cas, un chemisage de 30 mm d'épaisseur nominale a été appliqué sur la partie inférieure des voiles (1,5 m). Le BFUP a été coulé sur une surface lisse (voile 2) préparée avec un coffrage négatif en polyuréthane et sur une surface rugueuse (voile 3) préparée par hydro démolition. Les courbes de comportement charge-déplacement sont présentées à la Fig. 11.a.

On s'aperçoit que le voile 2 (courbe rouge), qui possède une préparation de surface lisse, montre une capacité similaire à celle du voile 1. La charge maximale atteinte est de 1050 kN. Le spécimen 2 montre une plus grande rigidité, mais la ductilité a été fortement réduite avec un déplacement à la rupture de 13.5 mm. La rupture intervient avant la plastification des armatures longitudinales et est du même type que la rupture du voile 1. La différence de rigidité entre ce voile 2 et les spécimens 1 et 3 n'a pas encore été étudiée.

Le voile 3 (courbe verte) se comporte différemment. Tout d'abord, la charge maximale atteinte est de 1165 kN. La différence entre les voiles 1 et 3 en termes de capacité de chargement est de 12 %. En ce qui concerne la capacité de déplacement, la différence par rapport au voile 1 est plus significative avec un accroissement de 40 %, la rupture survenant pour un déplacement en tête de 29 mm. La capacité du voile 3 correspond à la résistance flexionnelle en base du voile et de la plastification a été observée sur les armatures longitudinales. De plus, on observe une certaine ductilité avec un accroissement des déplacements pour une charge constante. Grâce à l'ajout d'une chemise en BFUP dans la zone inférieure du voile, le comportement a été modifié, retardant la rupture en cisaillement, qui se produit bien après la plastification en flexion.



11.a Charge-déplacement



11.b Charge-ouverture de fissure en base

Fig. 11 Effet d'une couche de 30 mm et de la préparation de surface

La Fig. 11.b montre l'influence de la couche de BFUP et de la préparation de surface sur l'ouverture de la fissure en base, représentée en abscisse. Cette ouverture peut directement être liée à la plastification des armatures longitudinales et dès lors, à la ductilité du voile en béton. L'influence d'une bonne préparation de surface et de 30 mm de BFUP est d'autant plus marquée sur cette figure avec une ouverture de fissure supérieure. La première partie de la courbe montre que la préparation de surface n'a pas eu d'influence sur l'ouverture de la fissure, avant la rupture soudaine de l'échantillon.

La Fig. 12 montre le voile 2 après rupture. Le mode de ruine est identique à celui de la Fig. 10, typique d'une rupture par cisaillement. Le voile 3, présenté à la Fig. 13, bien que montrant un meilleur comportement et une ductilité plus importante, a aussi subi une rupture du même type. La capacité de déplacement a été limitée par l'atteinte de la résistance en cisaillement. La différence fondamentale entre les voiles 2 et 3 est l'adhérence de la couche de BFUP. Dans le cas d'une préparation de surface lisse, une perte d'adhérence a été observée. Dès lors, les deux matériaux ont cessé de travailler ensemble et la rupture est intervenue plus tôt. La désolidarisation des différentes couches constituant le voile est visible sur la fissure principale qui n'est pas continue dans les deux milieux. Par opposition, le voile 3 montre une adhérence parfaite entre le cœur en béton et le renforcement en BFUP et la fissure principale traverse toute l'épaisseur du voile.



Fig. 12 Rupture du voile 2



Fig. 13 Rupture du voile 3

Au vue de la Fig. 11.a, la couche de 30 mm de BFUP est déjà suffisante pour modifier le comportement de la pile de pont et retarder la rupture fragile en cisaillement. Dès lors, afin de pousser plus loin l'expérience, la charge verticale a été augmentée pour le quatrième essai. Ceci a pour effet d'augmenter la résistance flexionnelle en base de l'échantillon n°4. L'objectif est donc de favoriser une rupture fragile afin de voir l'effet de la couche de 50 mm de BFUP. Les résultats sont comparés avec le voile 3 et sont présentés sur la Fig. 14.

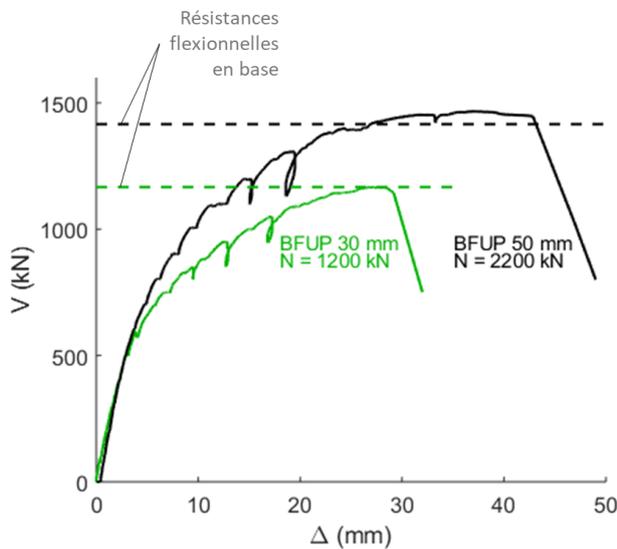


Fig. 14 Effet de l'épaisseur du chemisage et de la charge verticale



Fig. 15 Rupture du voile 4

Bien que la charge axiale ait été augmentée et, avec elle, le moment résistant de la section, le spécimen 4 (courbe noire) est aussi capable d'atteindre la capacité en flexion de la section sans rupture préalable par cisaillement. La ductilité de l'échantillon est aussi plus importante que celle du voile 3 avec un déplacement à la rupture de 43 mm pour une charge de 1465 kN. On observe un déplacement important pour la même charge ce qui est le témoin d'une rupture ductile. Comme on peut le voir sur la Fig. 15, la capacité en déplacement a été limitée par une rupture selon une fissure

principale. Cette fissure ne suit plus la diagonale de l'élément mais est déviée vers le bas par la force axiale importante.

3.2. Contrôle des fissures

Après le comportement global, on montre dans ce paragraphe les résultats en termes de contrôle des fissures. Sous les charges de service, l'ouverture des fissures dans les éléments en béton armé est d'une importance cruciale. Cette ouverture est directement liée à la durabilité des ouvrages. Une fissure plus large augmentera la pénétration d'agents extérieurs tels que les sels de déverglaçage et diminuera la durabilité du béton et des aciers d'armature. La Fig. 16 présente les ouvertures des fissures relevées en surface pour une charge de 930 kN sur les voiles 1, 2 et 3. Les variables sont donc la présence ou non de couche de renforcement et la préparation de surface. Tous les autres paramètres sont constants.

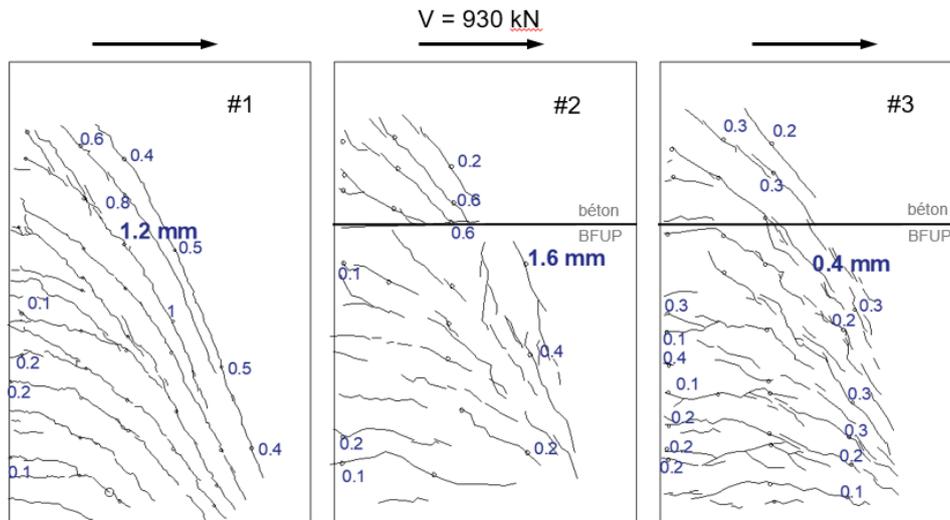


Fig. 16 Contrôle de la fissuration

Le voile 1 montre des fissures principales diagonales qui se prolongent sur la hauteur du voile. Ces fissures possèdent des ouvertures comprises entre 0.4 et 1.2 mm. Cette dernière valeur est aussi l'ouverture maximale à ce niveau de charge. D'autre part, on observe un réseau de fissures partant du coin en bas à droite et se prolongeant vers le côté gauche du voile.

En ce qui concerne le voile 2, l'ouverture la plus importante est large de 1.6 mm (+33 % par rapport au voile témoin). On observe aussi des fissures ouvertes dans la partie supérieure du voile, qui est composée uniquement de béton. Dans la partie renforcée avec du BFUP, les ouvertures sont plus limitées à l'exception de la fissure principale, qui sera la cause de la rupture. On peut aussi noter qu'aucune fissure n'est continue entre la partie en béton et la partie renforcée. La délamination entre les matériaux peut expliquer ces phénomènes. Celle-ci a pour effet de désolidariser la chemise de BFUP qui va alors travailler comme une coque indépendante, enveloppant le cœur en béton. Puisque la coque n'a pas d'armature conventionnelle et possède un pourcentage de fibres relativement faible, la formation de la première macro fissure dans la coque empêche l'apparition de nombreuses autres fissures. Dès lors, la plupart des déformations se concentrent dans cette fissure unique plutôt que de se distribuer dans plusieurs fissures dispersées.

Pour finir, la figure de droite représente les mesures réalisées sur le voile avec une préparation de surface rugueuse. Cette fois-ci, la fissure principale est trois à quatre fois moins ouverte que pour les autres voiles. De plus, on observe de nombreuses petites fissures, non continues. D'un point de vue de la durabilité, cette situation est plus favorable. Par opposition au schéma de fissuration dans le voile 2, l'adhérence supérieure entre les matériaux dans le voile 3 a permis aux fissures de passer du milieu en béton à la partie renforcée. L'espacement entre les fissures est aussi réduit grâce à l'intervention des fibres d'acier.

4. Conclusions

Ce papier présente les résultats préliminaires d'une étude sur le renforcement de piles de pont en béton armé. Sur base de ceux-ci, plusieurs conclusions peuvent être données :

- L'applicabilité de la méthode de réhabilitation de piles de pont avec une chemise de BFUP a été démontrée.
- L'efficacité de l'hydro démolition comme préparation de surface a été clairement démontrée. Elle permet d'obtenir une adhérence forte entre le substrat et la couche rapportée.
- La couche externe en béton fibré ultra-haute performance améliore efficacement la résistance mais surtout la ductilité. Avec seulement 30 mm de BFUP, la capacité de déplacement a progressé de 40 % par rapport à l'échantillon de référence, à condition d'avoir une bonne préparation de la surface.
- Sous des charges de service, le renfort en BFUP a montré sa capacité à contrôler les fissures et à en limiter l'ouverture. Par rapport au voile en béton armé, l'ouverture de fissure pour une charge donnée a été divisée par 3.
- Les résultats encourageants de cette étude ont été obtenus avec un BFUP possédant des propriétés relativement basses par rapport à d'autres produits similaires.

5. Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement le Service Public de Wallonie (SPW) Mobilité et Infrastructures, Département Expertises Structures et Géotechniques pour le soutien apporté à cette recherche.

6. Références

- [1] HABEL K., DENARIÉ E., AND BRÜHWILER, E., "Structural response of elements combining ultrahigh-performance fiber-reinforced concretes and reinforced concrete", *Journal of structural engineering*, Vol. 132, No 11, 2006, pp. 1793-1800.
- [2] BRÜHWILER E, AND DENARIÉ E., "Rehabilitation and strengthening of concrete structures using ultra-high performance fibre reinforced concrete", *Structural Engineering International*, Vol. 23, No 4, 2013, pp. 450-457.
- [3] RUSSEL H.G., and GRAYBEAL B.A., "Report No. FHWA-HRT-13-060", U.S. Department of Transportation, McLean, VA, 2013.
- [4] WILLE K., NAAMAN A.E., AND PARRA-MONTESINOS G.J., "Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way", *ACI Materials Journal*, V. 108, No. 1, 2011, pp.46-54.
- [5] LEUTBECHER T., AND FEHLING E., "Structural Behaviour of UHPC under Tensile Stress and Biaxial Loading", *International Symposium on UHPC*, 2004, Kassel, pp. 435-448.
- [6] ABBAS S., NEHDI M. L., AND SALEEM M. A., "Ultra-high performance concrete: Mechanical performance, durability, sustainability and implementation challenges" *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 10, No 3, 2016, p. 271.
- [7] CHARRON J.-P., DENARIÉ E., AND BRUHWILER E., "Permeability of ultra high performance fiber reinforced concretes (UHPRFC) under high stresses", *Materials and Structures*, Vol. 40, 2007, p. 269-277.
- [8] MOSER B., AND PFEIFER C., "Microstructure and Durability of Ultra-High Performance Concrete", *UHPC-2008: The Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, March 2008, pp. 417-424.
- [9] TOUTLEMONDE F., AND RESPLENDINO J. (eds.), "Designing and Building with UHPRFC: State-of-the-Art and Development", John Wiley and Sons, 2011.

- [10] DAGENAIS, M., MASSICOTTE, B. AND BOUCHER-PROULX, G. 2018, "Seismic Retrofitting of Rectangular Bridge Piers with Deficient Lap Splices Using Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concrete", *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 23, 2018, No. 2, p. 04017129.
- [11] LAGIER, F., 2015, " Étude du comportement de chevauchements d'armatures en traction directe dans du béton fibré ultra performant", Ph.D thesis, Ecole Polytechnique of Montreal.
- [12] DAGENAIS, M.-A., 2014, "Réhabilitation sismique des joints de chevauchement de piles de ponts par chemisage en béton fibré à ultra-haute performance", Ph.D thesis, Ecole Polytechnique of Montreal.
- [13] GARNEAU, J.-F., 2015, "Réhabilitation sismique des piles-murs de pont rectangulaires par chemisage en béton fibré à ultra-haute performance", Ph.D thesis, Ecole Polytechnique of Montreal.
- [14] BRÜHWILER E., BASTIEN-MASSE M., MÜHLBERG, H., ET AL. "Strengthening the Chillon viaducts deck slabs with reinforced UHPFRC", *IABSE Symposium Report. International Association for Bridge and Structural Engineering*, 2015. p. 1-8.
- [15] MOREILLON L. AND MENÉTREY, P., "Rehabilitation and strengthening of existing RC structures with UHPFRC: various applications", *RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, France: RILEM Publication SARL, 2013, p. 127-136.
- [16] NF P 18-470 Bétons fibrés à ultra-hautes performances – Spécification, performance, production et conformité, AFNOR, Paris, 2016.
- [17] NF P 18-710 Calcul des structures en béton – Règles spécifiques pour les bétons fibrés à ultrahautes performances (BFUP), AFNOR, Paris, 2016
- [18] KUSUMAWARDANINGSIH Y, FEHLING E, AND ISMAIL M., "UHPC compressive strength test specimens: Cylinder or cube?", *Procedia Engineering*, Vol. 125, 2015, pp. 1076-1080.
- [19] HABEL K., VIVIANI M., DENARIÉ E., AND BRÜHWILER E., "Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC)", *Cement and Concrete Research*, 2006, p. 1362–1370.