

Etude expérimentale de l'influence du trafic routier sur l'adhérence BFUP/béton

Dario REDAELLI

Prof. Dr. ing. civil
HES-SO
Fribourg, Suisse

Blaise FLEURY

Ing. civil EPF / SIA
OPAN concept SA
Neuchâtel, Suisse

Daniele STROLIGO

Ing. civil EPF
OFROU - FU
Ittigen, Suisse

Cet article a été rédigé en collaboration avec Messieurs Giovanni Ruggia (chef de projet OFROU), Stefano Mina et Gabriele Attanasi (Consortium TraCiA EP19, auteurs du projet de renforcement du viaduc de Fornaci).

Résumé

L'emploi des Bétons fibrés ultra-performants (BFUP) dans le cadre de réhabilitation ou de renforcement de ponts permet généralement un raccourcissement de la durée du chantier et une limitation de l'entrave au trafic routier. Afin d'exploiter de manière optimale cet avantage, il est cependant nécessaire de définir si une ouverture au trafic à proximité d'une zone de BFUP récemment mis en place risque de péjorer l'adhérence entre le BFUP et le béton ordinaire (BO) de support et de compromettre l'obtention d'un comportement mixte entre ces deux matériaux.

Le présent article résume une étude expérimentale, effectuée au laboratoire de structures de la Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (HEIA). L'étude avait pour objectifs de déterminer l'évolution de l'adhérence entre le BFUP et le BO pendant les premières heures qui suivent la mise en place du BFUP, ainsi que les éventuelles conséquences de vibrations ou de sollicitations cycliques, appliquées entre 0 et 48 heures, sur les propriétés d'adhérence à 28 jours.

Mots clefs: BFUP, adhérence, vibration, élément mixte BFUP-béton

1 Description du projet d'intervention des viaducs de Fornaci

1.1 Descriptif

Les viaducs de Fornaci sont situés sur le tronçon Bellinzona-Chiasso de l'autoroute N02, à proximité de la jonction de Lugano-Sud. Ces deux ouvrages parallèles, de section transversale en forme de caisson, et dont la géométrie générale est donnée dans la figure 1, ont été mis en service en 1968 et sont sollicités actuellement par un trafic journalier moyen de 74'000 véhicules/jour.

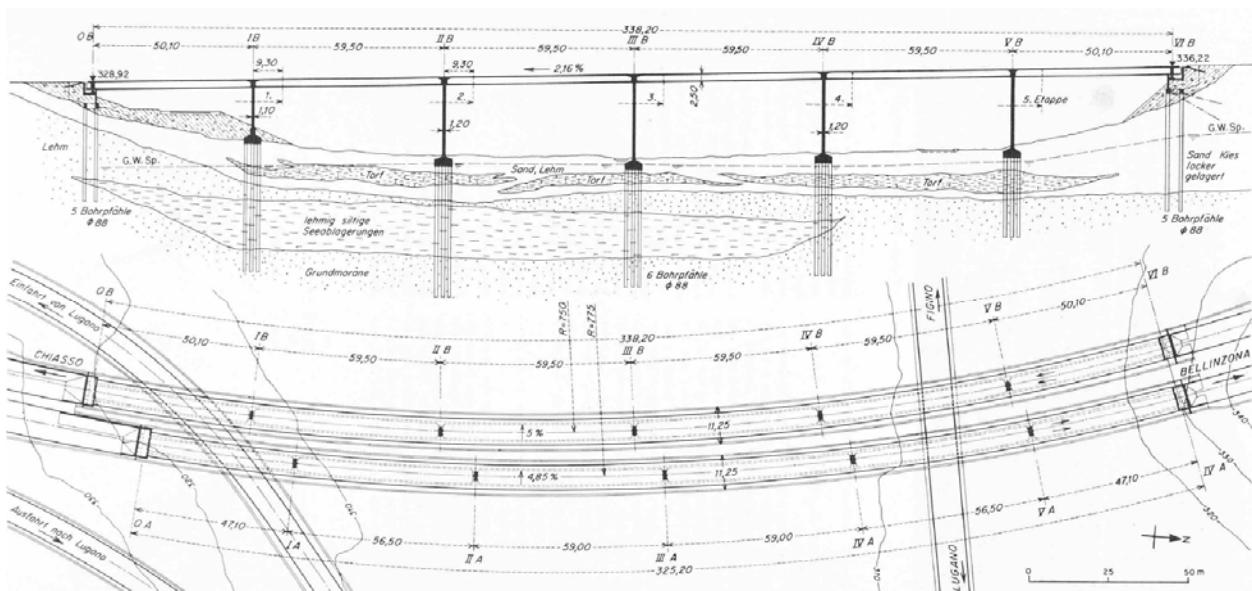


Fig. 1 Esquisse d'ouvrage tirée de [1].

Les relevés géométriques, effectués dans le cadre du concept d'intervention [2], ont mis en évidence un déficit systématique et non négligeable de l'épaisseur de la dalle de roulement par rapport aux valeurs théoriques indiquées sur les plans d'archives. Les vérifications statiques effectuées sur la base des dimensions effectives (épaisseur de la dalle et recouvrement des armatures) ont montré un

degré de conformité insuffisant de la dalle de roulement dans le sens transversal. Les auteurs du projet ont donc proposé et développé un concept de renforcement de la dalle de roulement par une couche de BFUP armé dans le sens transversal [2, 3] sur le même principe que ce qui a été réalisé sur les viaducs de Chillon (VD).

1.2 Phase de chantier déterminantes

Le passage de la finisseuse et l’approvisionnement en BFUP par Dumper hors de la zone ferrillée nécessitent la fermeture totale d’un viaduc durant les travaux de mise en place du BFUP (Fig. 2). Cette fermeture de voies exceptionnelle n’est admise que durant la nuit et l’objectif est une réouverture rapide après la fin de la pose du BFUP pour permettre une gestion de trafic 3 + 1 (Fig. 3). Ceci va impliquer des vibrations engendrées par le trafic routier durant la prise du BFUP, avec d’éventuelles conséquences néfastes sur son adhérence au support.

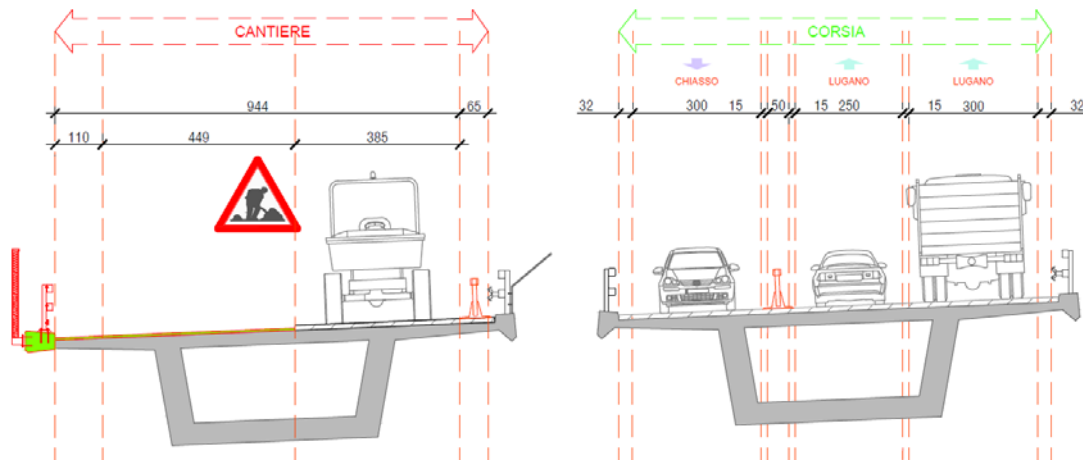


Fig. 2 Extrait du plan de gestion de trafic : phase de mise en place du BFUP (tiré de [3]).

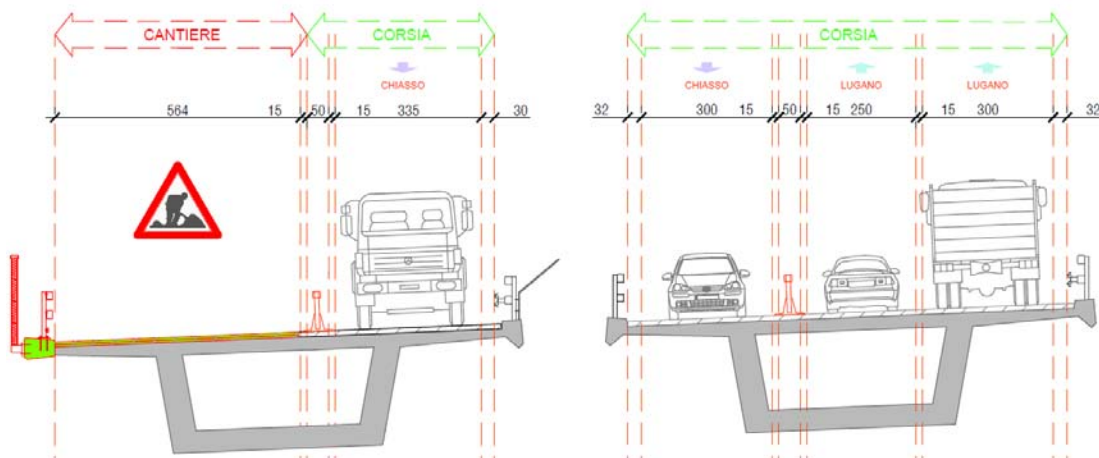


Fig. 3 Extrait du plan de gestion de trafic : phase de prise du BFUP (tiré de [3]).

Au vu de la montée en résistance atteinte par un BFUP sous conditions de température usuelles (Fig. 12), on peut considérer que la période critique est comprise entre 0 et 24, voire 48 heures après la mise en place du BFUP. Passé ce délai, la résistance à la compression du BFUP ne devrait pas être affectée par des vibrations du trafic. Il devrait logiquement en être de même pour l’adhérence au support, qui dépend également du processus d’hydratation du ciment.

2 Problématique de l’adhérence du BFUP sur son support

Lorsqu’une couche en BFUP est mise en place sur un élément en béton ordinaire existant, selon le chapitre 4.3 du Cahier Technique SIA 2052 [8], on considère un comportement monolithique et l’on admet que l’interface entre les deux matériaux n’est pas déterminante, sous réserve que les dispositions constructives des articles 4.3.3.4 et 6.2.3 soient respectées et que la résistance du béton de support soit supérieure à celle d’un béton C20/25 (ce qui est souvent le cas pour les ouvrages d’art existants). Selon l’annexe C.6, les exigences en termes d’adhérence sont satisfaites si, lors

d'essais d'adhérence par traction effectués selon la norme SN EN 1542 [9], la rupture se produit dans le béton de support. Il est également indiqué à l'article 6.2.1 que le BFUP doit être protégé des vibrations nuisibles jusqu'à ce qu'il ait atteint une résistance suffisante.

La problématique de l'adhérence entre BFUP et béton, assimilable à une reprise de bétonnage, reste complexe. On peut cependant relever que la résistance de l'interface est notamment influencée par les paramètres suivants :

- Préparation du support. Le support doit être propre, présenter une rugosité suffisante et être correctement humidifié avant la mise en place du BFUP. La rugosité du support devrait être obtenue par hydrodémolition et non par piquage car cette dernière opération engendre des microfissures qui affaiblissent notablement l'épiderme du support.
- Consistance du BFUP. Un BFUP thixotrope présente généralement une moins bonne adhérence qu'un BFUP fluide qui pénètre mieux dans les interstices du béton de support. Ce désavantage peut être partiellement compensé par une pervibration lors de la mise en place.
- Formulation et propriétés du type de BFUP (temps de début de prise, cinétique de montée en résistance et d'hydratation, chaleur d'hydratation, retrait endogène et évolution du module d'élasticité au très jeune âge).
- Orientation de la surface de contact [7]. Une application d'un BFUP au-dessus d'un support horizontal est plus favorable qu'une application contre une face verticale.

En cas de réouverture au trafic à proximité de la couche en BFUP et pendant la prise de ce dernier, d'autres paramètres interviennent, qui peuvent influencer la résistance d'interface, mais qui n'ont pas été étudiés en détail :

- Intensité et période d'apparition d'éventuelles vibrations durant la prise du BFUP.
- Sollicitations mécaniques et/ou déformations du support durant la prise du BFUP.

3 Mesure de vibrations du viaduc de Fornaci N-S

Afin de quantifier les vibrations du trafic routier, une campagne de mesures [5] a été réalisée sur le viaduc Nord-Sud par IFEC Ingegneria sous la direction du bureau Sciarini Ingegneria SA, auteur du projet de renforcement par du BFUP. Les positions des capteurs, ainsi que les vitesses verticales maximales obtenues, sont données dans la figure 4.

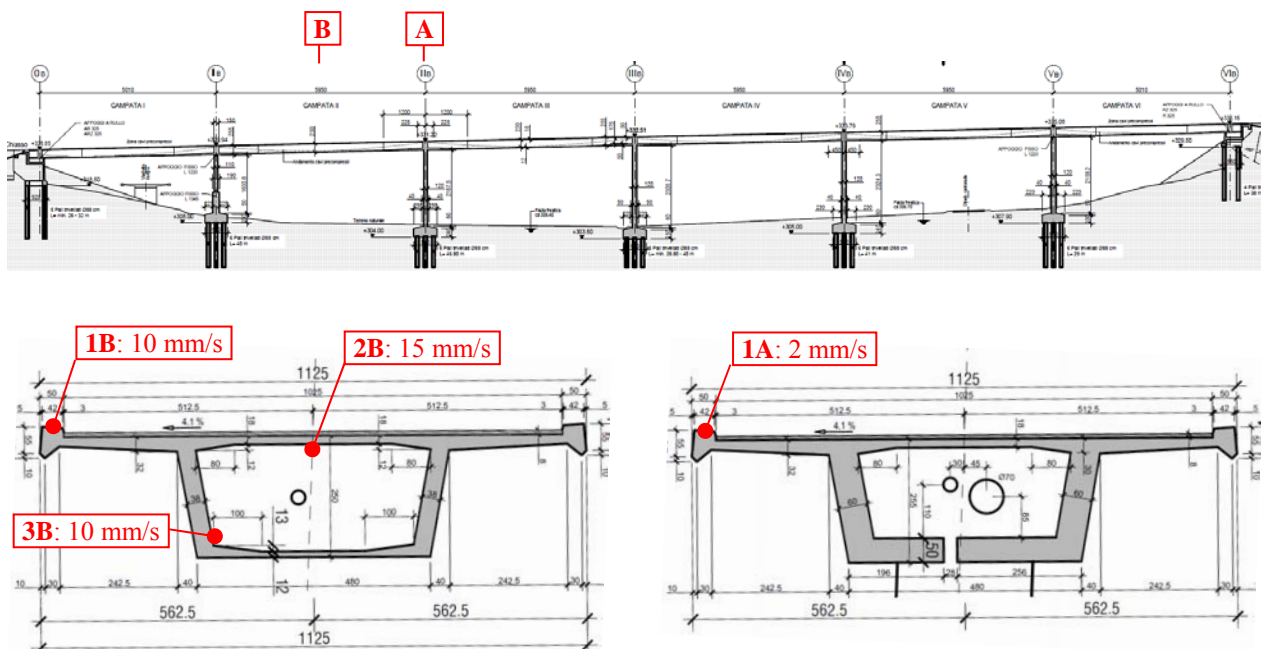


Fig. 4 Position des capteurs et vitesses verticales maximales mesurées sur le viaduc N-S (section A à mi-travée, section B sur appui).

Le trafic routier a induit des vibrations importantes de la dalle de roulement du viaduc, en particulier au droit du point de mesure 2B, situé au milieu du champ de dalle, sur lequel des vitesses verticales de 15 mm/s ont été enregistrées.

Des vitesses verticales de 10 mm/s ont été mesurées contre l'âme du caisson (3B) et à l'extrémité du porte-à-faux (1B) de la section située à mi-travée. À l'extrémité du porte-à-faux de la section sur appui (1A), munie d'une entretoise massive, la vitesse verticale maximale n'était que de 2 mm/s.

Les mesures ont mis en évidence deux fréquences principales de vibration verticale, respectivement de 1.9 Hz, probablement associée à la rigidité longitudinale de l'ouvrage, et de 3.2 Hz, probablement associée à la rigidité transversale du tablier.

4 Matériaux employés

4.1 Béton fibré ultra-performant (BFUP)

Le BFUP utilisé dans le cadre de la campagne d'essais, est un Ductal[®], de sorte UA selon CT 2052, fourni par Lafarge Holcim SA. Afin de correspondre aux exigences d'application sur les viaducs de Fornaci, il présente une consistance thixotrope, un dosage minimal de 280 kg/m³ (3.7% en volume) de fibres métalliques (longueur 14 mm, diamètre 0.2 mm) et une résistance à la compression sur cube supérieure à 70 N/mm² après 24 heures.

4.2 Béton ordinaire (BO)

Les dalles de la série d'essais 1.1 ont été confectionnées par une entreprise de construction avec un béton ordinaire (BO) de classe de résistance C30/37 ($D_{max} = 32$ mm). La résistance à la traction de ce béton s'étant révélée trop faible par rapport à l'adhérence BFUP/BO, toutes les autres dalles de support ont été confectionnées par un préfabriquant avec un béton de classe de résistance C60/75 ($D_{max} = 16$ mm).

5 Essai de type 1 : évolution de l'adhérence BFUP/BO au cours du temps

5.1 Objectifs et principes des essais

Les objectifs des essais de type 1 sont de :

- mesurer l'évolution au jeune âge de l'adhérence qui se développe entre le BFUP et le béton ordinaire (BO) de support ;
- comparer cette évolution à celle de la résistance à la compression du BFUP.

Etant donné l'impossibilité de carotter au travers d'une couche de BFUP frais, des essais d'adhérence par traction directe selon la norme SN EN 1542 [9] ne sont pas réalisables. Une procédure alternative, consistant à couler des cylindres en BFUP sur une dalle de support pré-carottée a donc été développée. Celle-ci, inspirée d'essais de pull-off traditionnels, permet de tester l'adhérence BFUP/BO dès la mise en place du BFUP.

Il est important de souligner que les résultats des essais de traction sur carotte sont particulièrement sensibles aux éventuels défauts d'alignement, orthogonalité et centrage des carottes et des pastilles. Pour cette raison, les valeurs des contraintes mesurées avec des essais de ce type d'essai doivent être considérées comme des valeurs nominales.

La surface supérieure des dalles de support a été préparée par hydrodémolition afin d'obtenir une rugosité de 5 mm de profondeur. Les pré-carottages, de 50 mm de profondeur et de 50 mm de diamètre ont été remplis par du sable puis surmontés par des moules cylindriques en acier (Fig. 5). Le remplissage des moules par du BFUP a été effectué manuellement à l'aide d'une truelle, après humidification du support.

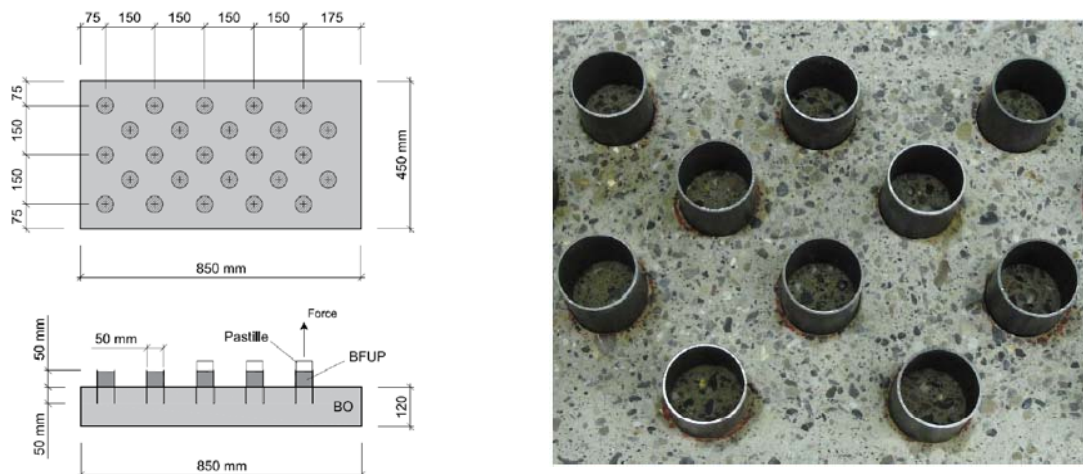


Fig. 5 Géométrie et photographie des éléments d'épreuve de type 1.

Compte tenu de la très faible intensité des forces attendues au jeune âge, un appareil d'essai spécifique a été développé. Celui-ci est composé d'un trépied métallique, d'un vérin hydraulique commandé par une pompe à main et d'un capteur de force. La mise en traction est effectuée à l'aide de pastilles métalliques filetées, collées à la surface du BFUP préalablement brossée.

Le collage des pastilles métalliques sur le BFUP s'est révélé très ardu en raison de la surface très lisse du BFUP, de son humidité et des variations dimensionnelles résultant de la chaleur d'hydratation. Il en est résulté de nombreuses ruptures de la colle dans la plage comprise entre 0 et 48 heures après la mise en place du BFUP.

5.2 Résultats de la série d'essais 1.1 (béton de support C30/37)

Les résultats des 24 essais de résistance à la compression du BFUP sur cube de 100 mm d'arête, réalisés dans le cadre de la série d'essais 1.1, sont représentés graphiquement dans la figure 6. Chaque point représente la moyenne des 2 essais réalisés à chaque échéance.

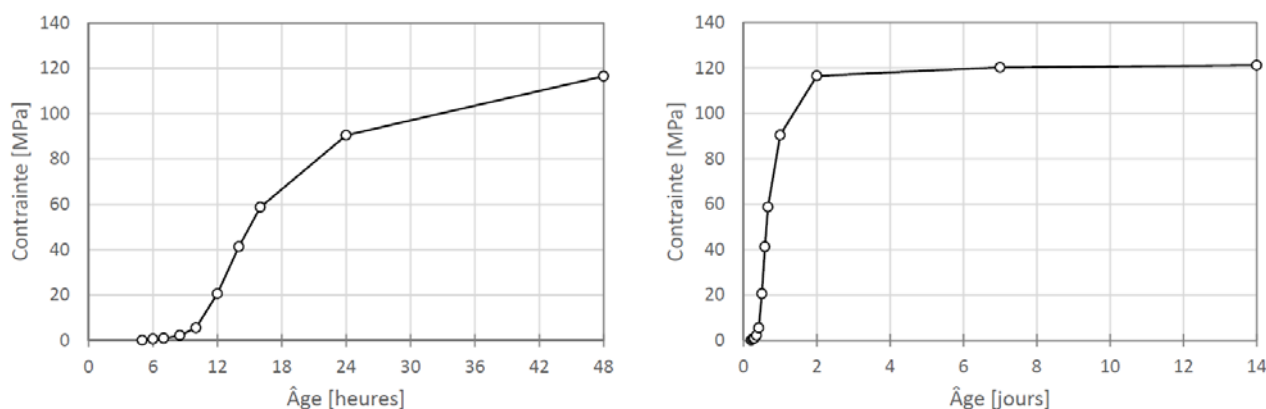


Fig. 6 Evolution de la résistance à la compression du BFUP de 0 à 48 heures (à gauche) et de 0 à 14 jours (à droite).

Les résultats des 29 essais de pull-off de la série 1.1, ainsi que les modes de rupture observés, sont donnés dans la figure 7.

Les ruptures d'interface se sont manifestées exclusivement au très jeune âge ($t \leq 14$ h) et sans séparation nette entre BFUP et BO. Une certaine quantité de BFUP, de consistance encore relativement pâteuse, restait systématiquement collée au support.

Des ruptures dans le béton de support ont été constatées déjà 24 heures après la mise en place du BFUP, pour des contraintes de traction inférieures à 2.0 N/mm^2 .

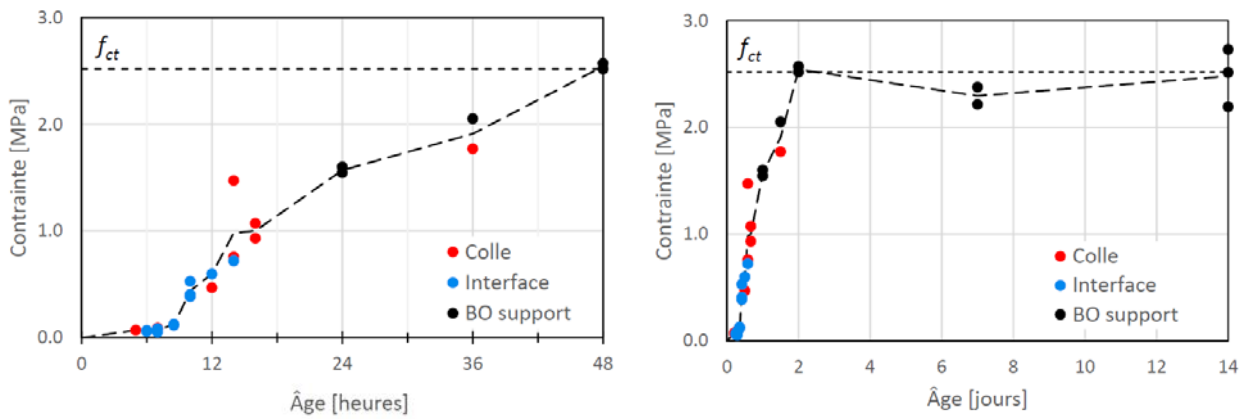


Fig. 7 Evolution de l'adhérence du BFUP au béton de support C30/37 et mode de rupture observé de 0 à 48 heures (à gauche) et de 0 à 14 jours (à droite).

A partir de 24 heures, la rupture s'est produite systématiquement dans le béton de support (C30/37), sous une résistance à la traction moyenne de 2.5 N/mm^2 . L'objectif étant de tester l'adhérence au support et non la résistance de celui-ci, il a été décidé d'interrompre les essais à l'âge de 14 jours et d'entreprendre une nouvelle série avec un béton de support plus résistant.

5.3 Résultats des séries d'essais 1.2 et 1.3 (béton de support C60/75)

La série 1.2 a été réalisée avec un béton de support de classe de résistance C60/75. Elle représente la série de référence principale pour les essais de type 1. La série 1.3 a été effectuée afin de confirmer les résultats de la série 1.2, en accordant une attention particulière à la mise en place du BFUP dans les moules cylindriques.

Les résultats des 20 essais de résistance à la compression du BFUP sur cube de 100 mm d'arête, réalisés dans le cadre de la série d'essais 1.2, sont représentés graphiquement dans la figure 8. Chaque point représente la moyenne des 2 essais réalisés à chaque échéance.

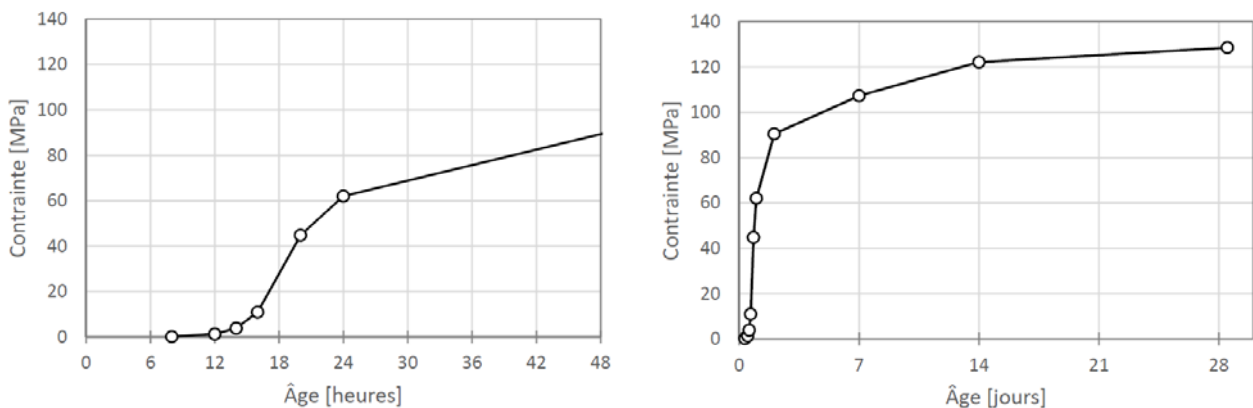


Fig. 8 Evolution de la résistance à la compression du BFUP de 0 à 48 heures (à gauche) et de 0 à 30 jours (à droite).

Les résultats de 49 essais de pull-off de la série 1.2, ainsi que les modes de rupture observés, sont donnés dans la figure 9.

Pour les séries 1.2 et 1.3, des ruptures d'interface ont été observées au jeune âge, mais également jusqu'à l'âge de 28 jours. Dans certains cas, les ruptures d'interface présentaient une forte quantité de BFUP collée au support, comme c'était le cas dans la série 1.1. Dans d'autres cas, la quantité de BFUP collée au support était très faible, voire nulle et la rupture de l'interface BFUP/BO était nette.

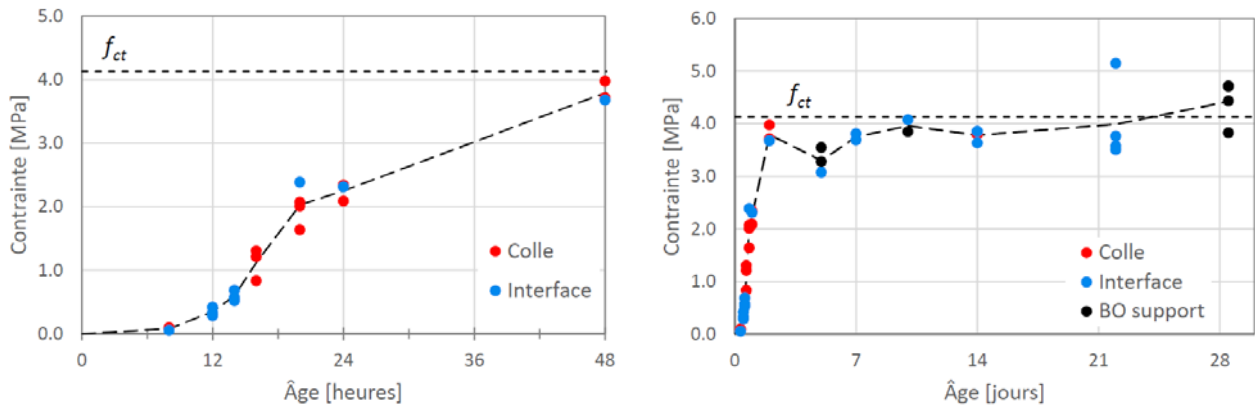


Fig. 9 Evolution de l'adhérence du BFUP au béton de support C60/75 et mode de rupture observé de 0 à 48 heures (à gauche) et de 0 à 30 jours (à droite).

Plusieurs ruptures partielles impliquant en partie la peau du BFUP et celle du béton ordinaire ont également été observées.

5.4 Synthèses et commentaires des essais de type 1

Les résultats des séries d'essais 1.1, 1.2 et 1.3 sont comparés entre eux dans les figures 10 et 11.

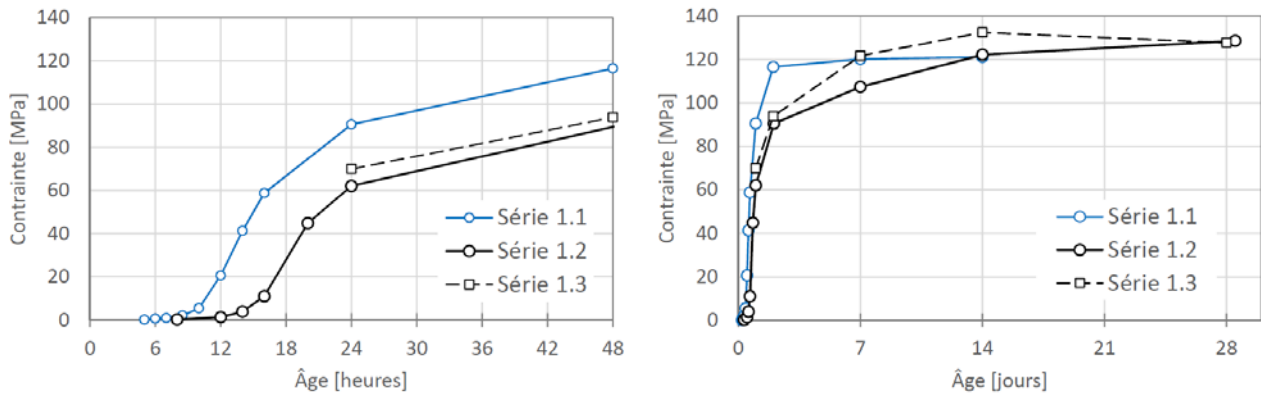


Fig. 10 Evolution de la résistance à la compression (sur cube de 100 mm) du BFUP de 0 à 48 heures (à gauche) et de 0 à 30 jours (à droite).

Pour toutes les séries d'essais, la résistance à la compression du BFUP sur cube de 100 mm se situe aux alentours de 130 N/mm² à 28 jours (Fig. 8). La montée en résistance plus rapide obtenue avec la série 1.1 résulte de la température ambiante (24°C) qui était plus élevée que pour les séries 1.2 et 1.3 (respectivement 18.7°C et 19.1°C). Les éprouvettes de contrôle qualité ont été stockés dans le laboratoire de structures, dans les mêmes conditions que les dalles d'essai.

Les résultats des essais de pull-off, illustrés par la figure 11, correspondent à la contrainte mesurée, indépendamment du mode de rupture. Cette valeur correspond à une borne inférieure de la résistance à l'arrachement au droit de la surface de contact BFUP/BO car elle inclue les ruptures qui se sont produites dans la colle ou le béton de support.

La résistance à l'arrachement obtenue dans le cadre des essais de la série 1 vaut environ 1.0 N/mm² 16 heures après la mise en place du BFUP et 2.0 N/mm² après 24 heures. Tout comme pour la résistance à la compression, l'évolution de la résistance à l'arrachement est fortement influencée par la température ambiante.

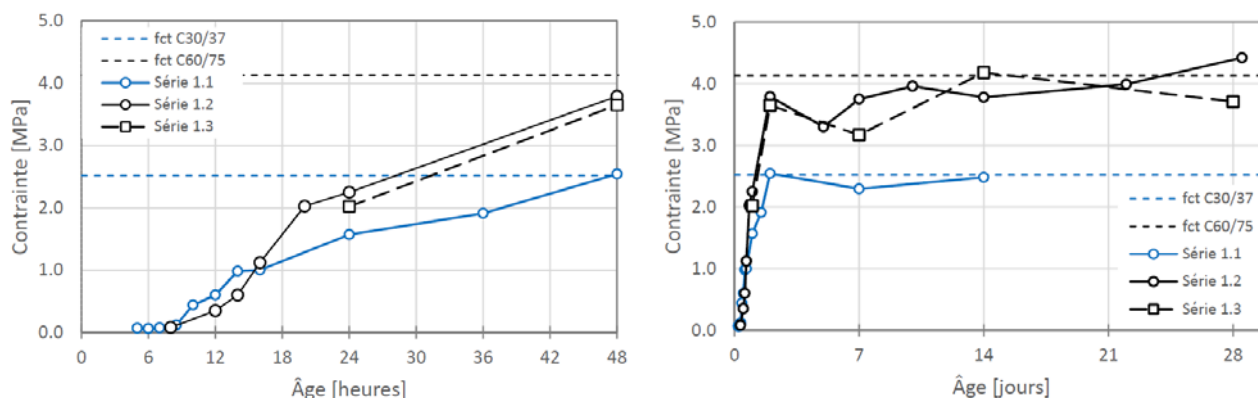


Fig. 11 Evolution de l'adhérence du BFUP au béton de support (essais de pull-off) de 0 à 48 heures (à gauche) et de 0 à 30 jours (à droite).

Pour les dalles de support en béton C30/37, les premières ruptures dans le béton de support ont été constatées déjà 24 heures après la mise en place du BFUP sous une contrainte de 1.6 N/mm². A partir de 48 heures, toutes les ruptures se sont produites dans le béton de support, sous une contrainte d'environ 2.5 N/mm².

Pour les dalles de support en béton C60/75, les premières ruptures dans le béton de support ont également été observées à partir de 24 heures, mais sous une contrainte supérieure à 3.0 N/mm². A partir de ce moment, les ruptures se sont produites alternativement dans l'interface ou dans le béton de support, pour des contraintes comprises approximativement entre 3.0 et 5.0 N/mm².

Pour des contraintes supérieures à 3.0-3.5 N/mm², des ruptures d'interface ont été observées à tous les âges du BFUP.

Comme on a pu le constater précédemment, la résistance de l'interface de la série 1.2 est bornée par la valeur de la résistance à la traction du béton de support (env. 4.1 N/mm²), obtenue approximativement à 48 heures.

En admettant cette valeur comme référence (100%) et en considérant exclusivement les résultats des ruptures d'interface BFUP/BO de la série 1.2 on obtient une assez bonne corrélation entre l'évolution de la résistance à la compression du BFUP et celle de l'adhérence au support (Fig. 12). On peut donc en déduire que le phénomène d'adhérence, tout comme la résistance à la compression, découle principalement du processus d'hydratation du ciment.

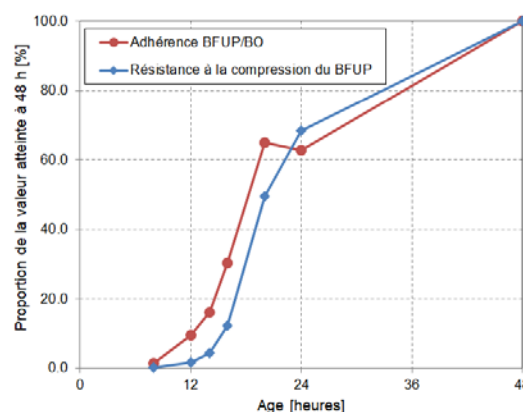


Fig. 12 Evolution de la résistance à la compression du BFUP et de l'adhérence BFUP/BO jusqu'à 48 h.

6 Essai de type 2 : effet des vibrations sur l'adhérence BFUP/BO

6.1 Objectif et principe des essais

Les essais de la série 1 ont montré qu'un comportement monolithique entre le BFUP et son support en béton ordinaire était atteint au pire environ 48 heures après la pose du BFUP. Passé ce délai les vibrations du trafic routier ne devraient pas avoir de conséquences néfastes sur les propriétés d'adhérence.

Le but de la présente série d'essais est d'évaluer l'influence de vibrations similaires à celles du trafic routier, agissant entre 0 et 48 heures après la pose du BFUP.

Les éprouvettes d'essais, constituées de 6 dallettes en béton ordinaire C60/75 recouverte par une couche de BFUP (Fig. 13), ont été soumises à des vibrations durant une période maximale de

48 heures, tout en variant l'âge de début des vibrations dans la plage probable de réouverture d'un pont au trafic routier (0h, 4h, 6h, 8h, 12h, 24h après la mise en place du BFUP).

L'adhérence BFUP/BO a été mesurée par des essais d'adhérence par traction directe selon SN EN 1542, réalisés 28 jours après l'application du BFUP, à raison de 5 essais par dalle. Les résultats ont été comparés à ceux d'une 7^{ème} dalle de référence, non soumise aux vibrations.

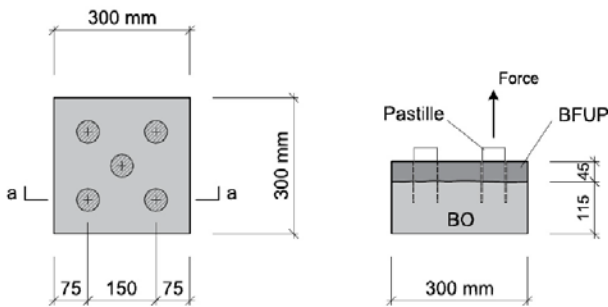


Fig. 13 Géométrie des éléments d'épreuve de type 2.

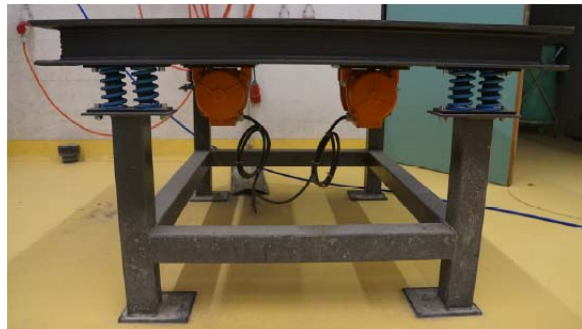


Fig. 14 Table vibrante du laboratoire de structures de l'HEIA -FR.

La table vibrante employée pour les essais permet de choisir la fréquence des impulsions entre 0 et 100 Hz, mais ne permet pas d'apporter des réglages ultérieurs quant à l'accélération, la vitesse ou le déplacement du mouvement oscillatoire de la table vibrante, qui dépendent de la rigidité des ressorts et de la masse oscillante. Le comportement vibratoire de la table vibrante, chargée avec six échantillons d'essais, a été mesuré par des capteurs dynamiques et est donné dans la figure 15.

Fréquence [Hz]	Vibration verticale mesurées (valeurs maximales)		
	Accélération [mm/s ²]	Vitesse [mm/s]	Déplacement [mm]
< 5.0	Vibration essentiellement horizontale		
5.4 - 5.5	0.25 - 0.30	8 - 10	0.2 - 0.3
5.8	0.60 - 0.70	15 - 20	0.5 - 0.6
6.0	1.50 - 1.60	> 40	1.1 - 1.2
> 6.0	Vibration jugée trop importantes		

Fig. 15 Comportement de la table vibrante.

Pour correspondre au mieux au comportement vibratoire mesuré des viaducs de Fornaci (chapitre 3), il a été décidé d'appliquer un cycle de vibrations d'une durée de 15 minutes (figure 16) toutes les heures durant les 2 jours suivants la mise en place du BFUP.

Durée [min]	Fréquence [Hz]	Vitesse verticale [mm/s]
10	5.4 - 5.5	≈ 8
4	5.8.	≈ 15 - 20
1	5.4 - 5.5	≈ 8

Fig. 16 Cycle usuel de 15 minutes, répété une fois par heure.

Deux cycles plus longs et plus intenses (figure 17) ont été appliqués juste avant deux pauses nocturnes de 3 heures chacune. La dalle positionnée sur la table vibrante immédiatement après la mise en place du BFUP et celle positionnée après 24 heures, ont ainsi été sollicitées respectivement par 42 et 20 cycles de vibrations.

Afin de garder un comportement vibratoire constant, les dalles d'essais positionnées ultérieurement sur la table vibrante, sont substituées provisoirement par des éléments de même masse.

Durée [min]	Fréquence [Hz]	Vitesse verticale [mm/s]
10	5.4 - 5.5	≈ 8
4	5.8.	≈ 15 - 20
1	6.0	≈ 40
4	5.8.	≈ 15 - 20
10	5.4 - 5.5	≈ 8

Fig. 17 Cycles longs et intenses de 29 minutes (2 cycles appliqués, nr.16 et 40).

6.2 Résultats des essais de type 2

Pour la majorité des échantillons soumis aux vibrations (21 résultats sur 30), la rupture s'est produite dans le béton ordinaire de la dalle de support. Dans 9 cas la rupture a impliqué la zone d'interface entre BFUP et BO, mais toujours de façon très marginale car seule 10% de la surface de rupture, au maximum, impliquait l'interface BO/BFUP (90% de la section de rupture dans le BO).

Les 5 résultats de pull-off de la dalle de référence, non vibrée, se sont produits dans le béton de support.

L'occurrence des ruptures impliquant partiellement l'interface est indépendante de l'échéance de début d'application des sollicitations vibratoires (Fig. 18).

Les résultats numériques des 35 essais de pull-off, ainsi que le type de rupture sont synthétisés dans la figure 19.

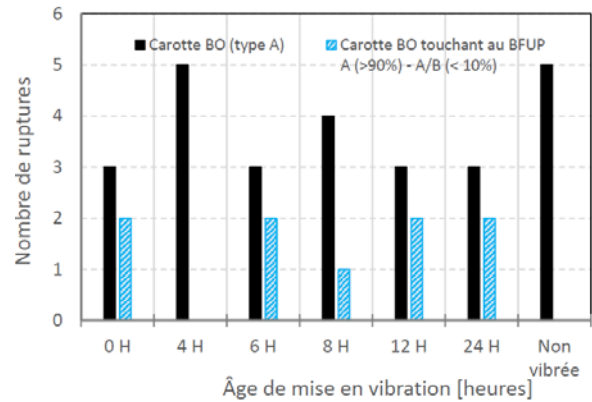


Fig. 18 Synthèse des modes de rupture.

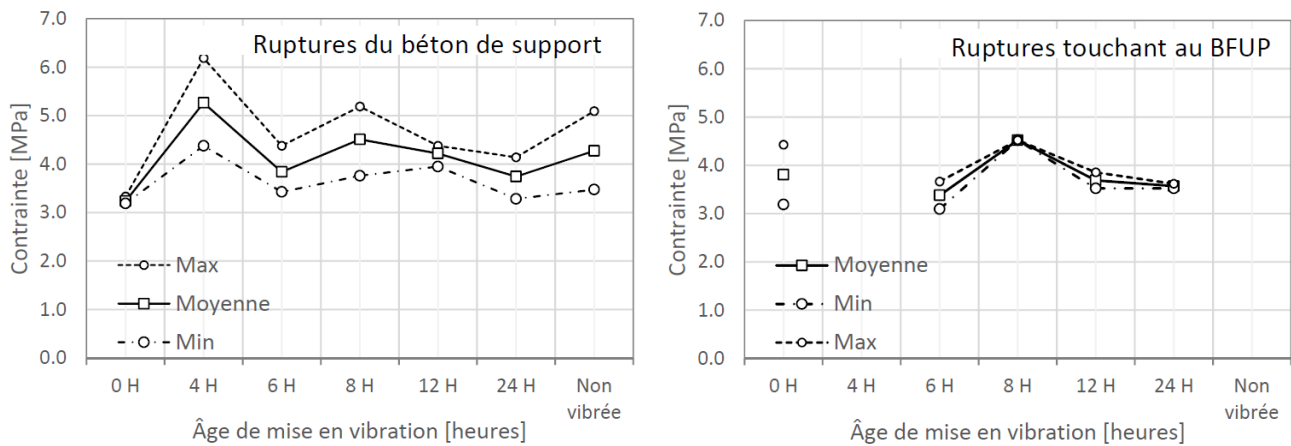


Fig. 19 Contrainte et mode de rupture en fonction de l'âge de mise en vibration.

La figure de gauche concerne exclusivement les ruptures du support et la figure de droite celles touchant l'interface BFUP/BO.

Comme nous pouvons le constater, aucune diminution évidente de l'adhérence entre BFUP et BO de support induite par les vibrations n'a été observée sur les échantillons d'essais. Ceci quel que soit l'âge du BFUP lors du début de l'application des vibrations.

7 Essais de type 3 : effet de sollicitations mécaniques sur l'adhérence BFUP/BO

7.1 Problématique et principe des essais

Dès qu'une voie est ouverte au trafic, des charges ponctuelles engendrées par les roues de véhicules lourds sont appliquées à proximité immédiate de la zone de BFUP fraîchement mis en place (Fig. 3). Ces charges, estimées à 60 kN par roue (max. 12 tonnes par essieu), induisent des effets dynamiques, mais également une déformation et des courbures de la dalle de support, potentiellement dommageables au développement de l'adhérence BO/BFUP.

L'objectif de la série d'essais de type 3 est donc d'évaluer sur un système statique simplifié les effets d'une charge quasi-statique appliquée sur un support déformable.

Le calcul de l'état d'effort et de déformation induit par les charges d'essieu dans l'ouvrage réel est affecté par de nombreuses incertitudes, liées à la rigidité effective de la dalle de roulement (module d'élasticité du béton, état de fissuration), mais également au fait que la rigidité du système évolue

progressivement entre celle du béton seul et celle du système mixte BO/BFUP. Pour ces raisons, il a été décidé de se limiter à une modélisation linéaire élastique, de l'ouvrage réel et de la dalle d'essai.

Le choix a été d'appliquer, durant les essais, une force de même intensité que la charge réelle d'une roue. Selon les modèles numériques, une telle force induit dans la dalle d'essai des sollicitations (effort tranchant et moments de flexion) plus sévères que celles induites dans l'ouvrage réel.

7.2 Descriptif des essais

Les dalles d'essais en béton C60/75 armé, sont appuyées sur 4 points (portée de 1.24 m) et recouvertes d'une couronne en BFUP (Fig. 20).

La charge est appliquée au centre de la dalle, sur une surface de 100x100 mm, à raison d'un cycle de chargement/déchargement de 0 à 60 kN toutes les 5 minutes.

Cinq dalles ont été confectionnées. L'une d'elles n'a pas été sollicitée et sert de référence. Les autres ont été sollicitées respectivement dès 1, 4, 6 et 12 h après le coulage du BFUP.

Pour les 4 dalles testées, les cycles de chargement ont été interrompus 48 heures après la mise en place du BFUP.

L'évaluation a été faite 28 jours après la pose du BFUP par des essais d'arrachements au droit des points 1 à 8 (Fig. 20). Les efforts tranchants sont maximaux aux points 1 ou 5 et les moments de flexion aux points 4 ou 8.

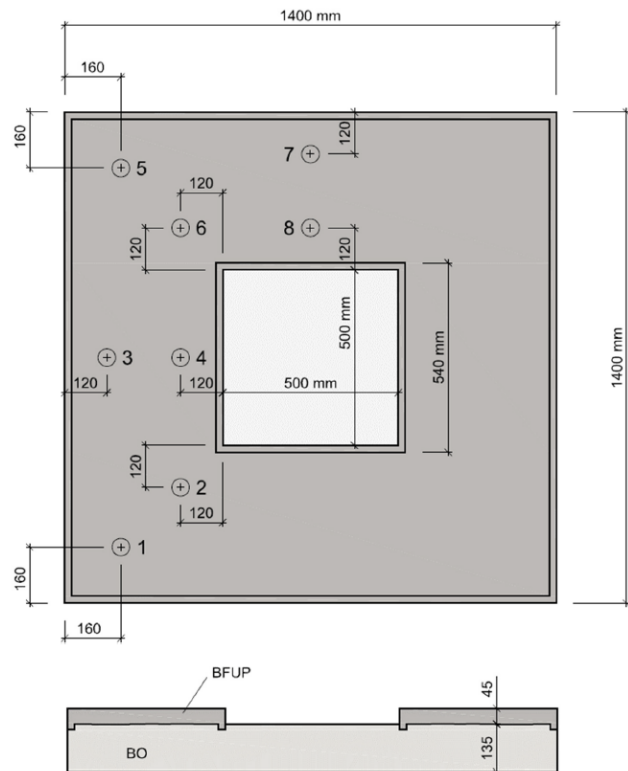


Fig. 20 Dalle d'essai de type 3.

7.3 Résultats des essais de type 3

La figure 21 montre un exemple de diagramme force - flèche mesuré durant la phase de chargement. Il s'agit de la dalle sollicitée à partir de 4 h, donc durant 44 h (528 cycles).

On constate une déformation irréversible associée à la fissuration de la dalle de support.

On observe également une augmentation de pente entre les premiers et les derniers cycles de chargement, ce qui confirme l'activation progressive d'un comportement mixte BO/BFUP pendant la prise du BFUP.

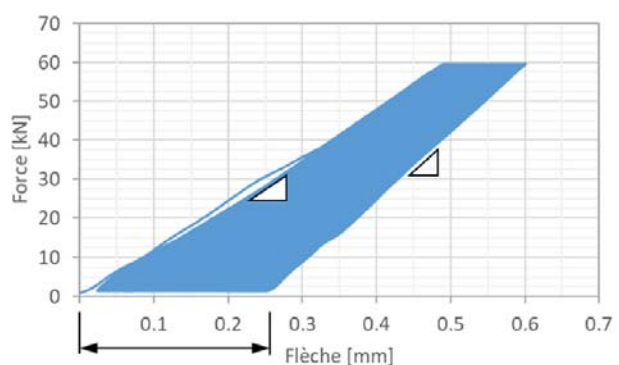


Fig. 21 Diagramme force - flèche de la dalle sollicitée 4 h après la pose du BFUP.

La plupart des ruptures se sont produites dans le béton ordinaire (BO) de la dalle de support (Fig. 22). Cependant, chaque dalle a présenté au moins une rupture à l'interface BO/BFUP, mais sous une contrainte relativement élevée d'env. 3.0 à 4.0 N/mm² (Fig. 23).

La rupture d'interface était généralement plus nette que dans les essais de type 2. La surface de rupture localisée à l'interface BO/BFUP variait entre 10% et 80% pour les échantillons sollicités mécaniquement (le solde étant dans le BO). Elle était même de 100% pour les deux ruptures observées sur la dalle de référence non chargée.

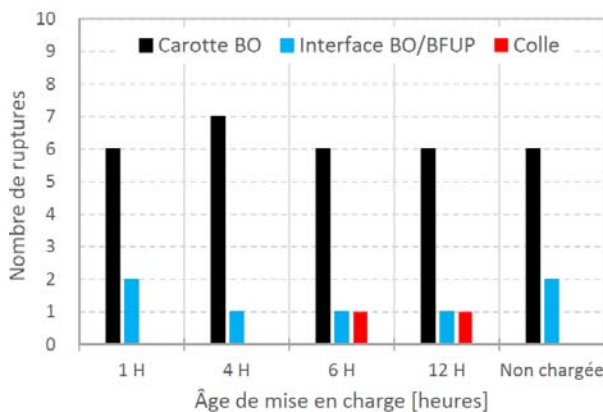


Fig. 22 Mode de rupture en fonction de l'âge de mise en charge.

Il est intéressant de noter que toutes les ruptures d'interface se sont produites au droit des points 3, 4 et 7 (Figure 20). Une explication basée sur l'état d'effort induit par la charge de 60 kN est injustifiable car la dalle qui a montré le plus de ruptures dans ces zones n'a pas été chargée. Cette faiblesse apparente découle plus probablement de l'état d'autocontraintes engendré par le retrait entravé, ou par le mode de mise en place (BFUP étalé au râteau).

Le diagramme de la figure 23 (gauche) illustre les contraintes de ruptures mesurées en fonction de l'âge du BFUP lors du début du chargement cyclique. La figure de droite montre exclusivement les résultats des ruptures impliquant l'interface BO/BFUP.

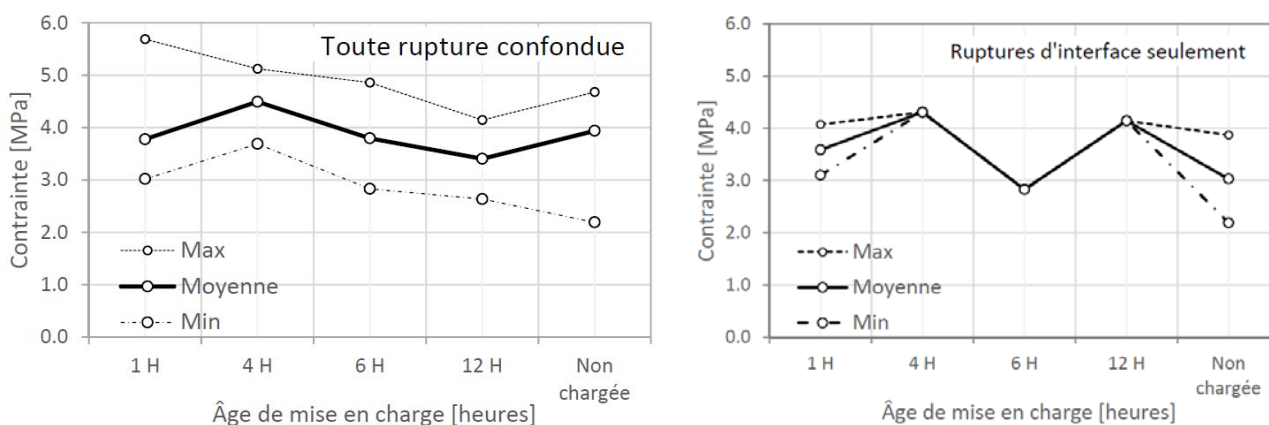


Fig. 23 Contrainte et mode de rupture en fonction de l'âge du BFUP lors de la mise en vibration. La figure de gauche présente les résultats de toutes les ruptures et la figure de droite exclusivement celles touchant l'interface BFUP/BO.

Quel que soit le début du chargement, les ruptures d'interface se produisent sous une contrainte du même ordre de grandeur que les ruptures du support. L'interface ne constitue donc pas un point faible pour le comportement mixte BO/BFUP.

Aucune corrélation ne peut être établie entre l'âge de mise en charge et la résistance à l'arrachement, ni en termes de nombre de ruptures d'interface, ni en termes de résistance mesurée.

8 Conclusions

Les essais de type 1 (éprouvettes non sollicitées) ont mis en évidence l'évolution de l'adhérence BFUP/BO en fonction du temps. Celle-ci est affine à la montée en résistance à la compression du BFUP. On peut donc en déduire que le phénomène d'adhérence est prioritairement influencé par les mécanismes d'hydratation du ciment. Pour le BFUP utilisé dans cette campagne expérimentale, et sous une température ambiante d'environ 20°C, des résistances à l'arrachement de 1.0 et 2.0 N/mm² ont été obtenues respectivement 16 et 36 heures après la mise en place du BFUP. Dans le cas d'un

béton support de résistance usuelle (C30/37), les premières ruptures du support sont observées 24 heures après la mise en place du BFUP. Dès l'âge de 48 heures, toutes les ruptures se produisent dans le support. Pour un béton de support de plus haute résistance (C60/70), les premières ruptures du support ont également été observées à l'âge de 24 heures, mais pour des contraintes supérieures à 3.0 N/mm². Ensuite, et jusqu'à 28 jours, les ruptures du support et d'interfaces sont apparues de façon alternée, mais toujours sous des valeurs de contrainte élevées.

Pour les essais de type 2 (vibrations imposées), aucune corrélation n'a pu être identifiée entre l'âge du BFUP lors du début des vibrations et la résistance à l'arrachement, ni en termes de mode de rupture, ni en termes de résistance mesurée.

Pour les essais de type 3 (efforts et déformations cycliques imposés), des ruptures d'interface avec séparation nette entre le BFUP et le BO ont été observées (7 ruptures d'interface sur 40 essais). Celles-ci se sont produites sur toutes les dalles, y compris la dalle de référence non sollicitée. Elles ne peuvent donc pas être expliquées par les sollicitations imposées, mais plus probablement par le phénomène de retrait entravé ou par le mode de mise en place. A noter que ces ruptures se sont produites toujours dans la même zone, et sous des contraintes d'arrachement élevées (3.0 à 4.0 N/mm²). Aucune corrélation n'a pu être identifiée entre l'âge du BFUP lors du début des sollicitations cycliques et la résistance à l'arrachement, ni en termes de mode de rupture, ni en termes de résistance mesurée.

En résumé, l'adhérence BFUP/BO ne semble pas avoir été affectée de manière évidente, ni par les vibrations, ni par les efforts et déformations qui ont été imposés durant la prise du BFUP.

Une réouverture au trafic à proximité du BFUP récemment mis en place, tel que souhaité dans le cadre du projet des viaducs de Fornaci, paraît en conséquence possible.

Il va de soi que les conclusions du présent rapport se limitent aux matériaux testés et aux sollicitations de la campagne d'essais.

9 Références

- [1] STUCKI E., HOFACKER H., *Der Viadotto delle Fornaci der N2 bei Lugano*, Schweizerische Bauzeitung, Band 86, Jahr 1968.
- [2] Consortium TraCiA EP19, CSD INGENIEURS+, ANDREOTTI & PARTNER SA, SCIARINI SA, *N02 Viaducs de Fornaci – Concept d'intervention (MK)* -août 2015.
- [3] Consortium TraCiA EP19, CSD INGENIEURS+, ANDREOTTI & PARTNER SA, SCIARINI SA, *N02 Viaducs de Fornaci - Projet d'intervention (MP)* - « Bozza Rossa », octobre 2016.
- [4] FLEURY B., *N02 Viaducs Fornaci - Expertise pour la conception, le dimensionnement et la mise en œuvre de BFUP*, 31.01.2017.
- [5] CORDIER D., CEPILOV N., *Monitoraggio vibrazioni viadotto Fornaci*, IFEC ingegneria SA, 24.05.2017
- [6] REDAELLI D., *Viaducs de Fornaci - Rapport d'essais*, HEIA Fribourg iTEC, projet AGP 72'292, février 2018.
- [7] JAKOBS F., *Erschütterungseinwirkungen auf jungen Beton*, Bau und Wissen, TFB AG Wildegg, Veranstaltung 194361 vom 16.05.2019.
- [8] Cahier technique SIA 2052, Béton fibré ultra-performant (BFUP) – Matériaux, dimensionnement et exécution, 2016
- [9] SN EN 1542, Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Mesurage de l'adhérence par traction directe, 1991