

Mesures de l'évolution des propriétés du CFUP en combinant les émissions acoustiques (passifs) et des ultrasons (actifs)

Numa Bertola¹, Thomas Schumacher², Ernst Niederleithinger³, Eugen Brühwiler¹

¹ Laboratoire de maintenance, construction et sécurité des ouvrages, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Suisse

² Civil and Environmental Engineering, Portland State University; Portland, OR, USA

³ Head of Non-destructive Testing Methods for Civil Engineering, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, Germany

RESUME Le composite cimentaire fibré ultra performant (CFUP) est devenu populaire en Suisse pour la conception de structures légères et durables. En raison de sa composition unique, le CFUP possède des propriétés mécaniques spécifiques. En particulier, le développement précoce des propriétés du CFUP, comme le module d'élasticité, est difficile à étudier, car il se produit lorsque les éléments sont encore dans leur coffrage. Cet article propose une nouvelle méthode de mesures combinant une surveillance passive grâce aux émissions acoustiques et une surveillance active via des ultrasons. Ce système de mesures a été intégré dans une poutre avec une section transversale en T qui a une longueur de 4,2 mètres. Le réseau de surveillance se compose de 24 transducteurs ultrasoniques ainsi que de 15 thermocouples, permettant la collecte de données en continu dès le début du processus de durcissement du CFUP. Après 28 jours, la poutre a été décoffrée puis testée en flexion quatre points. Cette campagne de mesures a permis de documenter avec précision l'évolution des propriétés du CFUP au jeune âge, ainsi que le comportement structurel et les processus d'endommagement de la poutre pendant l'essai de flexion jusqu'à la rupture.

Mots-clés Composite cimentaire fibré ultra performant ; Emission acoustique ; Onde de stress ultrasonique ; Propriétés au jeune âge du CFUP.

Key-words Ultra-High-Performance Fibre Reinforced Cementitious Composite; Acoustic emission monitoring; Ultrasonic stress wave monitoring; Early-age UHPFRC properties.

I. INTRODUCTION

Le composite cimentaire fibré ultra-performant (CFUP) est l'un des matériaux cimentaires les plus durables (Bertola et al., 2021a). Il se compose d'une matrice à forte teneur en ciment, de sable et de la fumée de silice (d'une taille maximale de 1 mm), d'eau (rapport eau/liant de 0,15 à 0,2), d'additifs, de superplastifiant et de fibres d'acier élancées (Brühwiler and Denarié, 2013). Ces fibres représentent au moins 3 % du volume du CFUP. Au cours des vingt dernières années, plusieurs centaines d'applications de ce matériau ont été réalisées dans l'ingénierie des ponts, à la fois pour la conception et la réhabilitation de structures existantes (Bertola et al., 2021b; Graybeal et al., 2020).

Les propriétés mécaniques du CFUP à 28 jours sont résumées dans (Brühwiler, 2020). Les valeurs maximales des résistances à la traction et à la compression atteignent respectivement 16 et 200 MPa. Le module d'élasticité est d'environ 45 GPa, et le matériau présente un comportement écrouissant en traction avec une déformation plus grande que 2%. La résistance à la traction peut encore être augmentée par l'ajout de barres d'armature (CFUP armé), de manière analogue aux structures en béton armé. Concernant les propriétés au jeune âge, il a été démontré que les résistances à la traction et à la compression ainsi que le module d'élasticité se développent beaucoup plus rapidement que le béton conventionnel (Habel et al., 2006).

La nouvelle méthode de surveillance proposée dans cet article implique un réseau de transducteurs ultrasoniques intégrés [modèle ACS S0807 (Niederleithinger et al., 2015)]. Ils sont capables d'enregistrer des émissions acoustiques (surveillance passive) et d'émettre des impulsions ultrasoniques pour une surveillance active (Schumacher and Niederleithinger, 2022). Le réseau est composé de 24 transducteurs intégrés dans une poutre de 4,2 mètres de long en CFUP armé. Tout d'abord, ce système de surveillance visait à mesurer l'évolution des propriétés du CFUP au jeune âge. Pendant l'essai de charge de flexion quatre points, les mesures visaient à quantifier les processus de dégradation et les niveaux de charge pendant toute la durée de l'essai.

II. CONFIGURATION DE LA CAMPAGNE DE MESURES

Une poutre en CFUP (section en T) d'une longueur de 4200 mm et d'une hauteur de 400 mm a été coulée au laboratoire de l'EPFL. Le mélange de CFUP utilisé dans cette poutre contient 3,4 % de fibres d'acier (longueur de 13 mm et diamètre de 0,16 mm). Le rapport eau sur liant est de 0,18. 3,4 % de superplastifiant a également été ajouté.

Un réseau de capteurs, comprenant 24 transducteurs ultrasoniques (Niederleithinger et al., 2015) et 15 thermocouples, a été intégré dans l'âme de la poutre (Fig. 1), à des positions aléatoires. Les objectifs de cette étude étaient de surveiller (a) le développement des propriétés du CFUP au jeune âge et (b) les processus de dégradation pendant l'essai de flexion à 28 jours en utilisant à la fois de mesures passives d'émissions acoustiques (EA) et active via des ultrasons (US). Pour la surveillance passive et active, un système Vallen AMSY-6 a été utilisé, qui a la capacité de produire des impulsions homogènes pour la partie active de la surveillance.

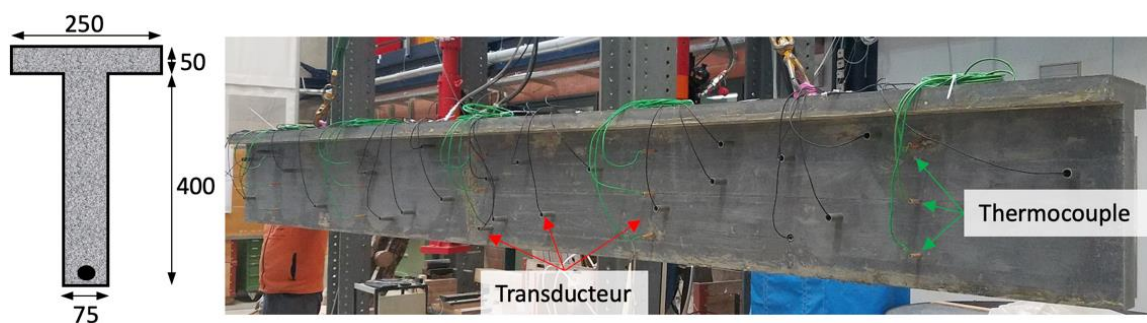


FIGURE 1 Dispositif de surveillance pour mesurer le développement des propriétés mécaniques du CFUP comprenant une surveillance passive et active avec des capteurs distribués dans l'âme de la poutre.

III. SUIVI DU JEUNE ÂGE (PHASE 1)

A. Introduction

La collecte de données sur le CFUP au jeune âge a commencé 2,7 heures après l'eau de l'eau à la pâte de ciment et elle a duré 20 jours. Pendant toute la phase de surveillance, la poutre est restée dans son coffrage et a été placée dans une zone calme du laboratoire.

Pendant la surveillance active, chaque transducteur a été utilisé comme dispositif d'impulsion, et les autres transducteurs ont enregistré la réponse. Quatre impulsions ont été produites par le transducteur émetteur à une fréquence de répétition des impulsions de 1 Hz. Les impulsions ont été émises toutes les 30 minutes pendant les 20 jours de surveillance. Les formes d'ondes transitoires sont stockées pour une analyse et un traitement ultérieur. La surveillance passive a consisté à capturer l'EA à l'aide des 24 transducteurs pendant la même durée.

B. Données collectées

Les mesures passives et actives sont présentées dans cette section. Dans la surveillance active par ultrason, le réseau de 24 transducteurs a permis d'enregistrer un total de 552 couples émetteur-récepteur. Plusieurs propriétés de ces signaux peuvent ensuite être analysées. Dans cette étude, la vitesse de l'onde P de l'impulsion ultrasonore est étudiée. La vitesse de l'onde P est calculée comme le rapport entre la distance euclidienne des couples de transducteurs et le temps de parcours de l'onde P. Le temps de parcours nécessite de choisir avec précision la position de l'onde et de déterminer avec précision l'instant d'arrivée de l'onde, ce qui peut s'avérer difficile pour les formes d'onde à faible amplitude. Un sélecteur automatique basé sur le critère d'information d'Akaike (AIC) a été utilisé (Kurz et al., 2022).

La vitesse de l'onde P pour chaque couple de transducteurs en fonction l'âge du CFUP est présenté à la Fig.2. Plusieurs couples de transducteurs ont produit des vitesses de l'onde P en dehors de la plage obtenue par la majorité des couples. Ces valeurs de vitesse d'onde P ont été considérées comme déraisonnables et ces couples ont été éliminés de l'analyse. La vitesse de l'onde P augmente de manière significative au cours des 40 premières heures et reste ensuite pratiquement constante. La plupart des couples mesurent une vitesse finale stable de l'onde P entre 4200 et 5000 m/s (valeurs moyennes de 4680 m/s, écart-type de 170 m/s).

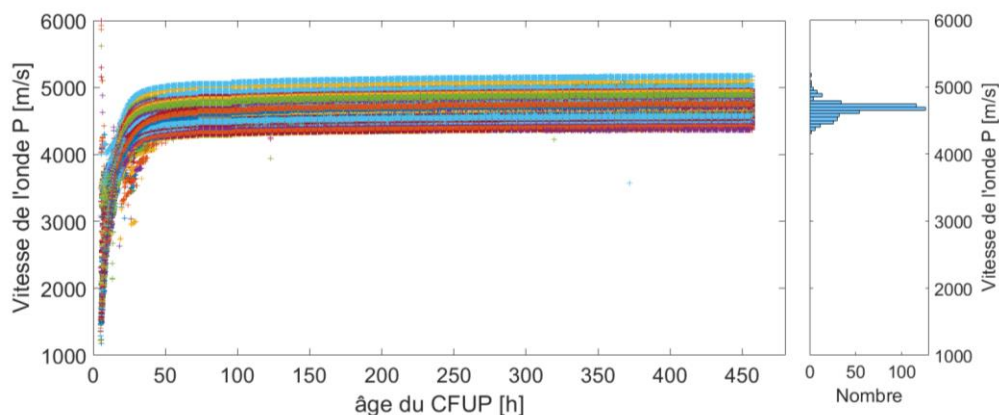


FIGURE 2 Vitesses estimées de l'onde P en fonction de l'âge de l'UHPFRC pour les couples de transducteurs après élimination des valeurs aberrantes.

Le système de surveillance a également enregistré des EA tout au long du développement des propriétés du CFUP. Les EA sont des ondes de contrainte qui résultent d'une libération soudaine d'énergie à l'intérieur d'un matériau en raison d'une fissure. Dans cette première partie de l'étude, la réponse à la microfissuration du CFUP au jeune âge est étudiée.

La figure 3 présente le nombre d'occurrences d'EA en fonction de l'âge du CFUP. Le taux d'EA augmente de manière significative au cours des premières 24 heures et reste élevé jusqu'à environ 200 heures. Un changement de phase est observé après 7 à 8 jours. Le taux d'EA avec la température moyenne enregistrée peut être comparé au retrait endogène mesuré empiriquement par (Hajiesmaeili and Denarié, 2021). Le premier pic du taux d'EA qui se produit vers 30 heures, correspond à la température maximale enregistrée et au taux de retrait endogène le plus élevé. Cette technique de mesure permet donc d'identifier le début du processus de retrait.

Deux régimes principaux se produisent dans le processus d'hydratation du CFUP (Kazemi-Kamyab et al., 2019). Le premier est dominé par l'hydratation du clinker au cours des sept premiers jours. Ensuite, l'augmentation de la résistance provient de la réaction de la fumée de silice. Les sept premiers jours, soit 185 heures, correspondent raisonnablement à la fin du taux élevé d'EA observé au cours de cette campagne de mesures. Ainsi, les taux d'EA pourraient potentiellement identifier le changement de régime d'hydratation entre le clinker et la fumée de silice dans le CFUP.

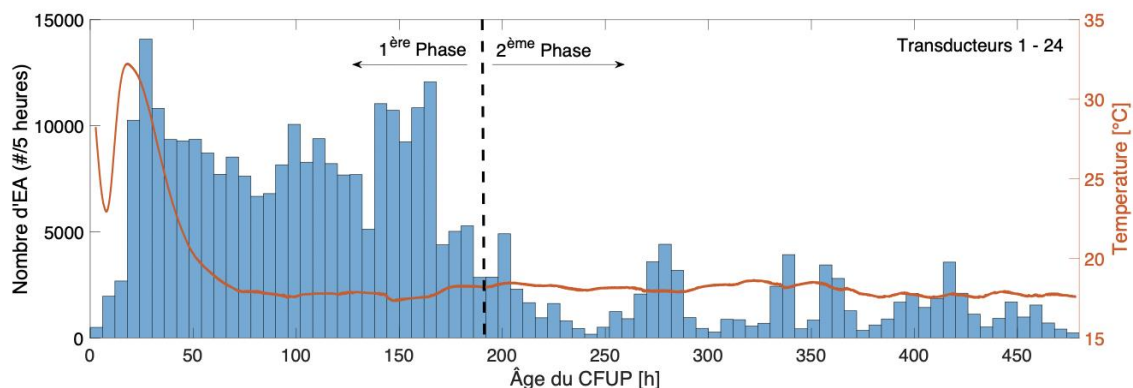


FIGURE 3 Nombre d'occurrences d'émissions acoustiques en fonction de l'âge du CFUP.

C. Analyse inverse - module d'élasticité

Dans cette section, les mesures des ultrasons sont utilisées pour déduire l'évolution du module d'élasticité du CFUP. La vitesse de l'onde P entre deux transducteurs est ainsi utilisée pour déduire la valeur du module d'élasticité dans le temps.

La vitesse de l'onde P dépend de trois paramètres du matériau : le module d'élasticité dynamique, la densité et le coefficient de Poisson (Equation (1)). Sur la base du poids de la poutre, qui a été déterminée lors du levage de la poutre, la densité a été évaluée à $\rho_U = 2598 \text{ kg/m}^3$ et assumé constante pendant toute l'expérience. Cette valeur a été supposée constante partout dans l'échantillon. Le coefficient de Poisson du CFUP ν diminue rapidement de 0,5 à 0,2 au cours des premières 24 heures, et cette évolution a été prise en compte dans les estimations du module d'élasticité (Kazemi Kamyab, 2013).

$$V_p(t) = \sqrt{\frac{E_U(t)}{\rho_U} * \frac{(1-\nu(t))}{(1+\nu(t))(1-2\nu(t))}} \quad (1)$$

Les résultats de l'analyse inverse sont présentés dans la figure 4. Les estimations moyennes du module d'élasticité dynamique, ainsi que les quantiles à 5 % et 95 %, sont très proches des valeurs présentées dans l'étude empirique (Hajiesmaeili and Denarié, 2021). Bien qu'une certaine variabilité des estimations soit observée (écart-type de 2,5 GPa), ce résultat valide le fait que la méthode novatrice de surveillance proposée dans cet article peut être utilisée pour déduire le module d'élasticité du CFUP au jeune âge, alors même que l'élément est encore à l'intérieur du coffrage.

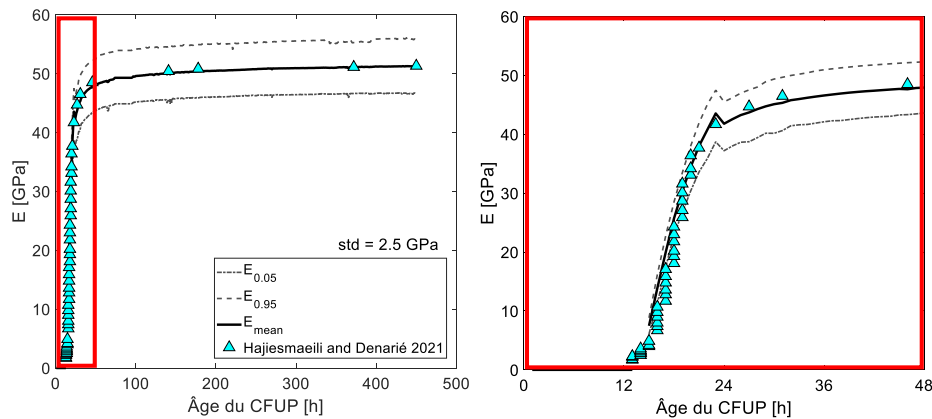


FIGURE 4 Développement du module d'élasticité dynamique en fonction de l'âge du CFUP.

III. ESSAI DE CHARGE (PHASE 2)

A. Introduction

Dans la deuxième phase de l'étude, un essai de flexion à quatre points est effectué sur la poutre (distance entre appuis de 800 mm). La configuration de l'essai est similaire à celle de (Bertola et al., 2022). Plusieurs cycles de chargement et de déchargement ont été imposés à différents niveaux de charge (Fig. 5) et les déplacements ont été mesurés sous les vérins via deux LVDT. Le chargement a été augmenté jusqu'à la rupture de la poutre. Un mode de rupture ductile a été observé. La fissure de rupture est apparue dans la région de flexion maximale de la poutre (Fig. 6).

Les EA (surveillance passive) ont été enregistrés tout au long de l'essai. Des US (surveillance active) ont été émis à chaque étape des cycles de chargement/déchargement, ainsi qu'après la rupture. À nouveau, quatre impulsions ont été émises pour chaque transducteur à chaque niveau de chargement. L'approche de surveillance combinée a été utilisée pour identifier certaines des propriétés les plus pertinentes du comportement de la poutre pendant l'essai de charge.

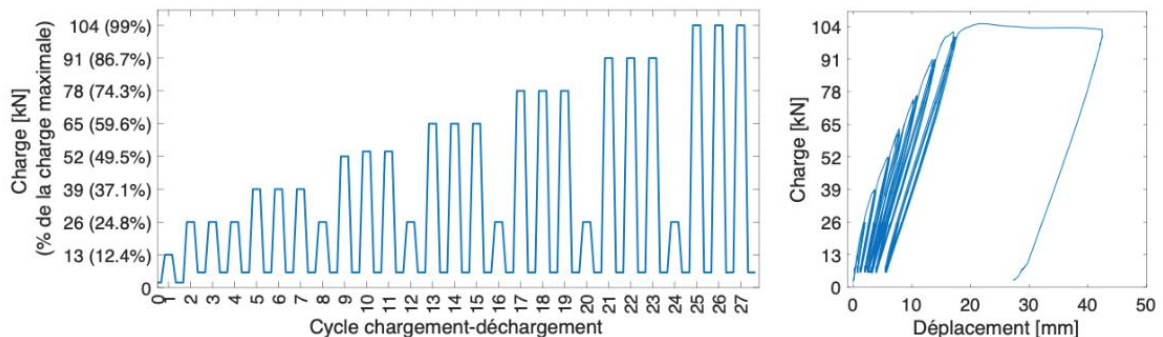


FIGURE 5 Cycle de chargement-déchargement idéalisé et relation charge-déplacement.

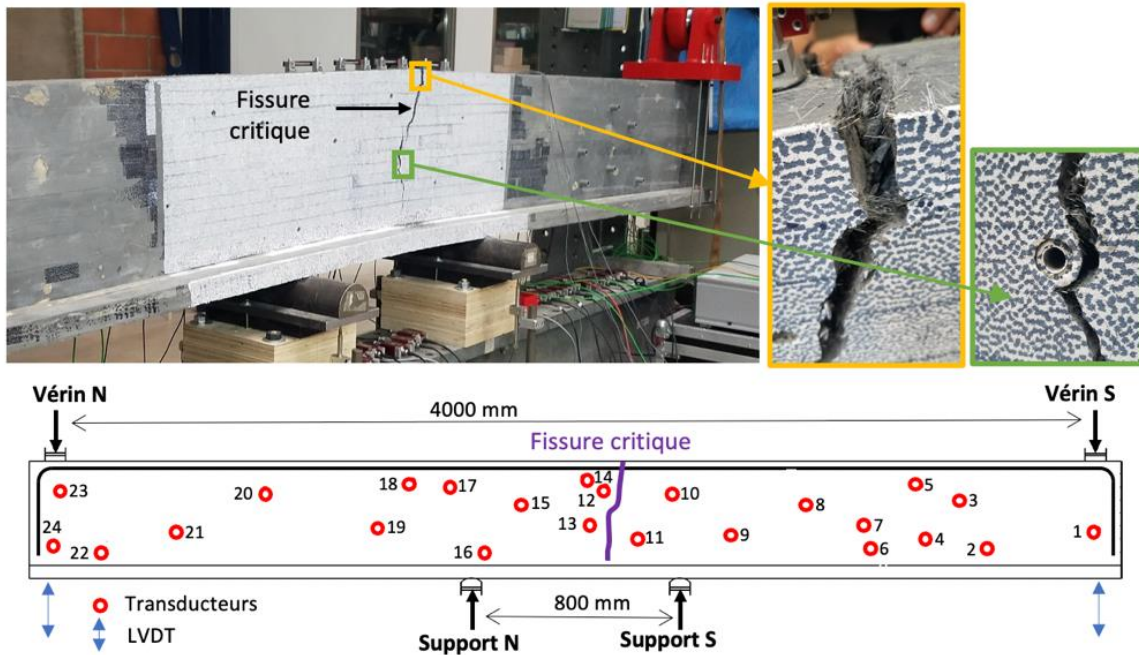


FIGURE 6 Photo de la fissure critique sur la poutre et emplacement lié au réseau de transducteurs.

B. Détermination de l'emplacement des fissures

Les EA détectées ont été utilisés pour déduire l'emplacement de la fissure de rupture. La figure 7 montre le nombre de coup d'EA enregistré par chaque transducteur individuellement. Le transducteur 12 a enregistré un nombre significativement plus élevé d'impacts d'EA que les autres transducteurs. En outre, les capteurs voisins (n° 10 et 14) ont également enregistré une activité d'EA significative. Une forte corrélation est observée entre le nombre d'impacts d'EA enregistré par chaque capteur et la distance au transducteur 12 (R^2 de 0.89). La fissure de rupture s'est développée dans l'âme de la poutre entre les transducteurs 12 et 10. Ce résultat a été confirmé par l'observation visuelle de l'emplacement de la fissure de rupture (fig. 5). La surveillance par EA peut donc permettre d'identifier le développement des fissures critiques dans les éléments en CFUP armé.

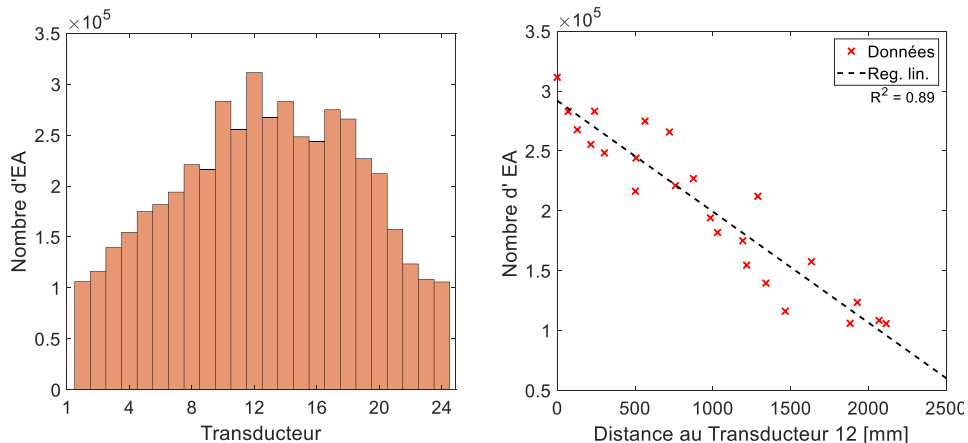


FIGURE 7 Emissions acoustiques détectées par chaque transducteur (gauche); Relation entre le nombre d'émissions acoustiques et la distance au transducteur 12 (droite).

C. Détermination du niveau de chargement

Une surveillance active par ultrasons a été effectuée aux niveaux maximum et minimum de charge lors des multiples cycles de chargement et de déchargement. En comparant les vitesses des ondes P obtenues par ultrasons pendant les cycles de chargement et de déchargement, il est possible d'examiner le comportement de la poutre pendant l'essai de flexion.

Quelques couples de transducteurs sélectionnés ont été analysés tout au long du processus de chargement (Fig. 8). Après chaque cycle de chargement-déchargement, les valeurs de vitesse des ondes P ont été calculées pour le niveau de charge minimum. Les couples 1 et 2 sont situés près du point d'application d'une charge (Fig. 6), où le moment de flexion est faible. Pour ce couple, la vitesse reste relativement inchangée tout au long de l'essai de charge. Par conséquent, ce capteur peut être utilisé comme référence pour représenter les propriétés d'une poutre non endommagée.

Les mesures de la vitesse de l'onde des autres couples sont relativement peu affectées pendant les trois premiers cycles de chargement-déchargement (13 % de la charge maximale). Ensuite, on peut observer une chute significative qui correspond au début du comportement non-linéaire du CFUP armé. En outre, le couple de transducteurs 10-12 présente des baisses significatives (cycles 12 et cycles 25) après les premiers cycles à 50 % et 95 % de la charge maximale respectivement. Ces niveaux correspondent au moment où la fissure de rupture est visible pour la première fois à l'œil nu et à sa propagation significative dans l'âme de la poutre. En comparant les couples de transducteurs 10-12 et 12-15 (distances similaires), la propagation de la fissure pourrait donc être responsable de cette chute soudaine et locale de la vitesse de l'onde P, car les vitesses du couple 12-10 sont généralement moins élevées au cycles 12-14 (50% de la charge maximale) et 25-27 (95%).

Un autre résultat est la relation entre la différence de vitesse des ondes P et l'augmentation de la charge (Fig. 8 droite). En utilisant le couple de transducteurs 1-24, qui couvre presque toute la longueur de la poutre, on peut observer que la diminution de la vitesse de l'onde P pendant le déchargement est directement proportionnelle à la diminution du niveau de charge (R^2 de 0.95).

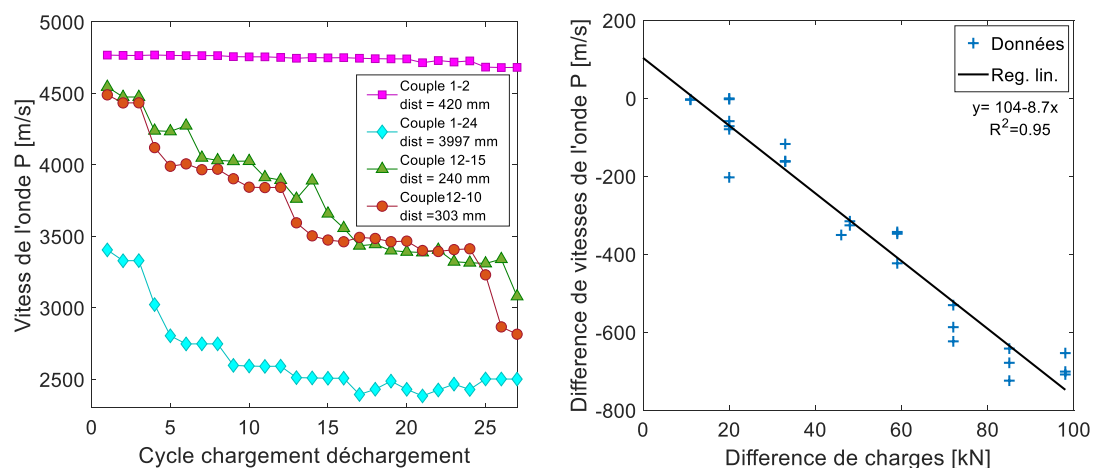


FIGURE 8 Evolution de la vitesse de l'onde P en fonction des cycles de chargement et de déchargement pour certains couples de transducteurs (gauche) ; Relation entre l'augmentation de la charge pendant les cycles et l'augmentation de la vitesse de l'onde P pour le couple de transducteurs 1-23 (droite).

IV. CONCLUSIONS

Cette étude a examiné une nouvelle approche de surveillance pour capturer les propriétés de CFUP au jeune âge ainsi que pendant l'essai de flexion. L'instrumentation comprend 24 transducteurs ultrasoniques intégrés dans une poutre de 4,2 mètres de long. La surveillance continue à l'aide de cette nouvelle approche à la fois passive (émission acoustique) et active (ultrason) a permis une caractérisation précise de l'évolution des propriétés du matériau, telles que le module d'élasticité lors de la prise du CFUP, avec une méthode non-destructive sur un spécimen de grande taille. De plus, le comportement structurel (niveau de charge) et les processus de dégradation (localisation et propagation de la fissure critique) de la poutre pendant l'essai de charge sont également mesurés. Cette nouvelle méthode de surveillance permet de suivre l'ensemble du comportement d'une structure pendant toute la durée d'utilisation.

REFERENCES

- Bertola, N., Küpfer, C., Kälin, E., Brühwiler, E., 2021a. Assessment of the Environmental Impacts of Bridge Designs Involving UHPFRC. *Sustainability* 13, 12399. <https://doi.org/10.3390/su132212399>
- Bertola, N., Schiltz, P., Denarié, E., Brühwiler, E., 2021b. A Review of the Use of UHPFRC in Bridge Rehabilitation and New Construction in Switzerland. *Frontiers in Built Environment* 7, 155. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.769686>
- Bertola, N., Trinh, N.T., Garcia, E., Brühwiler, E., 2022. Experimental investigation of a keying joint cast in UHPFRC between precast UHPFRC bridge elements. *Mater Struct* 55, 86. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01931-x>
- Brühwiler, E., 2020. UHPFRC technology to enhance the performance of existing concrete bridges. *Structure and Infrastructure Engineering* 16, 94–105. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1605395>
- Brühwiler, E., Denarié, E., 2013. Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete. *Structural Engineering International* 23, 450–457. <https://doi.org/10.2749/101686613X13627347100437>
- Graybeal, B., Brühwiler, E., Kim, B.-S., Toutlemonde, F., Voo, Y.L., Zaghi, A., 2020. International Perspective on UHPC in Bridge Engineering. *Journal of Bridge Engineering* 25, 04020094.
- Habel, K., Viviani, M., Denarié, E., Brühwiler, E., 2006. Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC). *Cement and Concrete Research* 36, 1362–1370. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.009>
- Hajiesmaeili, A., Denarié, E., 2021. Capillary flow in UHPFRC with synthetic fibers, under high tensile stresses. *Cement and Concrete Research* 143, 106368. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106368>
- Kazemi Kamyab, M., 2013. Autogenous Shrinkage and Hydration Kinetics of SH-UHPFRC under Moderate to Low Temperature Curing Conditions. EPFL, Lausanne.
- Kazemi-Kamyab, H., Muller, A.C.A., Denarié, E., Brühwiler, E., Scrivener, K., 2019. Kinetics of mixing-water repartition in UHPFRC paste and its effect on hydration and microstructural

development. *Cement and Concrete Research* 124, 105784.

Kurz, J.H., Schumacher, T., Linzer, L., Schechinger, B., Grosse, C.U., 2022. Source Localization, in: Grosse, C.U., Ohtsu, M., Aggelis, D.G., Shiotani, T. (Eds.), *Acoustic Emission Testing: Basics for Research – Applications in Engineering*. Springer International Publishing, Cham, pp. 117–171.

Niederleithinger, E., Wolf, J., Mielentz, F., Wiggerhauser, H., Pirskawetz, S., 2015. Embedded Ultrasonic Transducers for Active and Passive Concrete Monitoring. *Sensors* 15, 9756–9772.

Schumacher, T., Niederleithinger, E., 2022. Combining Passive and Active Ultrasonic Stress Wave Monitoring Techniques: Opportunities for Condition Evaluation of Concrete Structures. NDT-CE 2022 - *The International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering* Zurich, Switzerland, August 16-18, 2022.