

Evaluation d'une méthodologie d'auscultation par acousto-ultrason de renforts composite collés sur béton

Cheikh Sarr¹

¹ Université Gustave Eiffel, SMC, Département MAST, Route de Bouaye, F-44341 Bouguenais

E-mails : cheikh.sarr@univ-eiffel.fr

RESUME

L'utilisation de renforts composite collés pour le renforcement ou la réparation des ouvrages du génie civil offre de nombreux avantages et est de plus en plus fréquente. Les techniques de contrôle non destructifs utilisées sur site pour l'auscultation de la qualité du collage ne permettent cependant jusqu'à présent que la détection des défauts de type « vide ». Il est donc nécessaire de développer une technique CND capable de détecter et d'identifier tous les types de défauts. Nous développons et évaluons dans cet article une méthodologie basée sur la technique des acousto-ultrasons via des investigations expérimentales en laboratoire. Dans un premier temps, la répétabilité de la méthode a été vérifiée en déterminant les coefficients de corrélation temporels des signaux mesurés sur différents échantillons. Ensuite, une comparaison des paramètres acoustiques des signaux mesurés est réalisée afin de vérifier la détectabilité de tous les défauts étudiés. Enfin, deux méthodes d'identification des défauts sont évaluées : une classification non supervisée par Analyse par Composantes Principales (ACP), et une méthode supervisée par forêt d'arbres décisionnels.

Mots-clefs Contrôle non-destructif, Acousto-ultrasons, Assemblage collé,

I. INTRODUCTION

L'utilisation de renforts composites collés dans le génie civil est en plein essor car elle permet d'accroître la capacité portante des structures, de prolonger leur durée de vie, ou de réparer des structures endommagées. Cependant, de nombreuses études (Srivastava & Prakash, 1988) (Tanary, et al., 1992), ont montré que la performance mécanique du joint de colle est fortement influencée par la présence de défauts. Il est primordial de pouvoir mettre à disposition des utilisateurs finaux des méthodes de contrôle et de suivi fiables et robustes leur permettant de vérifier la qualité des assemblages réalisés et de suivre leur évolution au cours du temps. La thermographie IR est actuellement l'une des méthodes les plus utilisées sur site pour l'inspection des assemblages collés du génie civil. Cependant, elle ne permet que la détection précise des défauts de types vide (vides, porosités, délamination, décollement, etc.) (Chauchois, et al., 2015). Dans le cas des zones faiblement adhérentes, (Tighe, et al., 2016) ont montré que la thermographie IR ne permettait la détection du défaut que lorsque celui-ci était simulé par l'insertion d'un téflon (polytétrafluoroéthylène, PTFE). Elle ne semble pas en mesure de détecter une contamination

liquide telle que de la graisse qui, d'après la littérature (Samann, 2019) est plus représentative que l'insertion de solide (téflon) pour matérialiser un défaut d'adhésion. La détection et l'identification des zones faiblement adhérentes ou des interfaces faibles dans un assemblage collé reste donc problématique.

Notre étude a pour objectif d'évaluer le potentiel qu'offre la technique des acousto-ultrasons (AU) pour la détection et l'identification de tous les types de défauts rencontrés dans un assemblage collé du génie civil. L'AU est une technique de contrôle non destructive qui combine les techniques de l'émission acoustique (EA) et des ultrasons (US). Elle consiste à envoyer une onde élastique au sein d'un matériau à l'aide de transducteurs piézoélectriques puis, après sa propagation, à la réceptionner en vue d'un traitement avec les méthodes de l'EA. L'AU a déjà montré d'énormes potentiels dans la caractérisation mécanique de matériaux composite (Srivastava & Prakash, 1988), (Vary & Bowles, 1978) et d'assemblages collés (Brahma & Murthy, 1988).

Cette étude est réalisée via une campagne expérimentale. Après avoir décrit les assemblages testés et le protocole de mesure utilisé, nous présenterons les résultats obtenus en terme de répétabilité et de reproductibilité des mesures. Puis, via une analyse des paramètres acoustiques mesurés, la détectabilité des différents défauts étudiés sera développée. Enfin, deux méthodes d'identification des défauts seront présentées et évaluées : une méthode basée sur une analyse par composantes principales, et une méthode supervisée par forêt d'arbres décisionnels.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Echantillons étudiés

Nous étudions des assemblages collés béton-composite du génie civil. Ils sont constitués de plaques de composite pultrudés unidirectionnels à fibres de carbone d'épaisseur 1.4 mm, de largeur 100 mm, et de module élastique axial 210 GPa collées sur des dalles de béton C25/30 de 110 mm d'épaisseur. L'adhésif utilisé pour le collage est une résine époxy bi-composante polymérisant à froid. Suivant le mode de rupture qu'ils peuvent occasionner, on rencontre en général deux catégories de défauts dans un joint de colle, des défauts adhésifs et des défauts cohésifs. Ces deux catégories de défauts peuvent être classées en trois types : les vides ou porosités, les défauts d'adhésion ou kissing-bonds, et les faibles forces de cohésion (Figure 1).

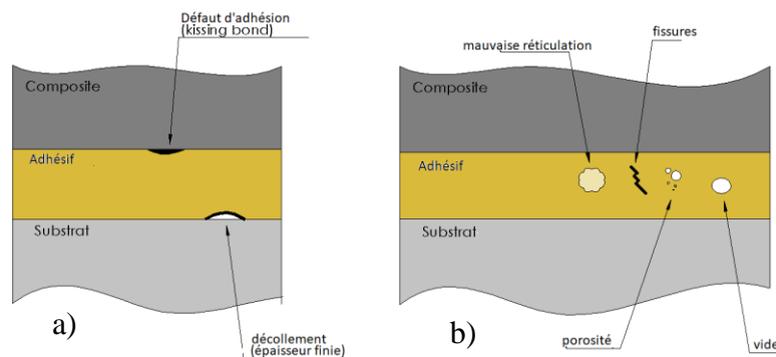


FIGURE1. Défauts de collage : a) défauts adhésifs, b) défauts cohésifs

Afin de représenter tous les défauts, nous avons confectionné cinq éprouvettes dont les caractéristiques sont recensées dans le TABLEAU 1. Tous les défauts sont placés au centre des éprouvettes.

TABLEAU 1. Caractéristiques des échantillons étudiés

Nomenclatures	Caractéristiques (défauts)	Epaisseur de la colle (mm)
N°1 : Sain	Echantillon sain de référence	0.95
N°2 : Vide centré	Vide centré de dimension 100 mm x 50 mm	1.39
N°3 : 1/3 Vide	Vide sur 1/3 de la surface collée au centre du joint	1.89
N°4 : 1/3 PU	Colle polyuréthane sur 1/3 de la surface du joint	1.87
N°5 : 1/3 graisse	Incorporation de fine couche de graisse à l'interface époxy/composite sue 1/3 de surface	1.60

B. Protocole de mesure et méthodes de traitement

Suite à une étude préliminaire, nous avons sélectionné pour les mesures trois capteurs piézoélectriques : un S9204 en émission et deux R15 en réception. L'émetteur et le récepteur n°1 sont distants de 230 mm, ils sont alignés parallèlement aux fibres du composite afin de limiter les effets de l'anisotropie du matériau (voir FIGURE2). Les trois capteurs présentent une sensibilité en réception et en émission sur une bande fréquentielle allant de 50 kHz à 200 kHz et sont centrés sur 150 kHz (fréquence de résonance). Du phényle salicylate (un cristal à bas point de fusion) a été utilisé comme couplant pour les fixer sur la surface des échantillons. Un préamplificateur IL40S-HT de bande passante [32 – 1100 kHz] est relié aux récepteurs nous permettant d'acquérir les signaux avec un gain de 40 dB.

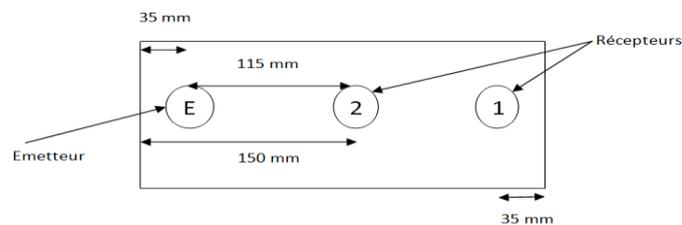


FIGURE2. Disposition des capteurs sur les échantillons.

La consigne en émission a été faite à l'aide d'une carte électronique ARB1410 et la réception est gérée par une carte PCI2. Les critères de définition de salves sont configurés pour les valeurs suivantes : (Peak Definition Time 70 μ s, Hit Definition Time 200 μ s , Hit Lockout Time 300 μ s).

Chaque signal est numérisé avec une fréquence d'échantillonnage de 500 kSPS sur une longueur maximale de 15000 points.

Nous avons réalisé lors de notre campagne d'investigation sur chaque échantillon dix tirs pendant sept mesures indépendantes impliquant de décoller puis de recoller les capteurs entre chaque mesure. L'évaluation de la répétabilité de ces 70 signaux par échantillon passe par un calcul des 2485 coefficients de corrélation temporels inter-signaux (70×70) à travers l'équation suivante :

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad -1 \leq \rho_{xy} \leq 1 \quad (\text{Équation 1})$$

Avec : σ_{xy} la covariance des deux signaux,

σ_x et σ_y leur variance respective.

Une comparaison paramétrique est ensuite réalisée entre signaux reçus sur échantillon sain et signaux reçus sur échantillon défectueux, afin de diagnostiquer la détectabilité des défauts de la manière la plus simple possible.

Deux méthodes de classification sont ensuite proposées pour l'identification des défauts. La première est une analyse par composantes principales (ACP) qui permet de passer d'un espace à plusieurs dimensions à un espace plus réduit et peut donc permettre de proposer des critères de classification simplifiés à partir de l'ensemble des paramètres acoustiques. Cette ACP est réalisée pour 10 descripteurs par signal (temps de montée (μ s), nombre de coup, énergie (μ V.s/blow), énergie absolue (aJ), durée (μ s), amplitude (dB), nombre de coup au pic, force du signal (pV.s), barycentre fréquentiel (kHz), fréquence pic (kHz)). Le critère de choix du nombre de composantes est basé sur leur part d'inertie qui doit dépasser 80%. Cette part d'inertie est obtenue en faisant le rapport de la somme des variances des composantes choisies sur la somme des variances de toutes les composantes. La deuxième méthode est une classification par forêt d'arbres décisionnels (Godin, et al., 2005) qui permet de manière plus robuste de classer de manière supervisée les signaux selon leur signature suivant le type de défaut. Les quatre premières mesures réalisées servent à entraîner l'algorithme de classification, et les trois dernières à le tester. Cent arbres ont été ainsi générés et trois descripteurs choisis de manière aléatoire sur chaque nœud.

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A. Répétabilité des mesures

La méthodologie détaillée a été appliquée sur les signaux mesurés sur les cinq échantillons confectionnés. Pour une bonne visualisation des résultats, la dispersion des 2485 coefficients de corrélation entre 0 et 1 est représentée sous forme d'histogramme (figure FIGURE 3). Nous pouvons vérifier sur la figure 3 que, pour les signaux reçus du capteur n°1 sur l'échantillon sain béton-composite, les coefficients de corrélation temporels calculés varient entre 0.68 et 1 et que leur moyenne (pointillés en rouge) se situe aux environs de 0.86. Ceci a été réalisé pour tous les échantillons, et les valeurs minimales et moyennes sont résumées dans le tableau TABLEAU 2.

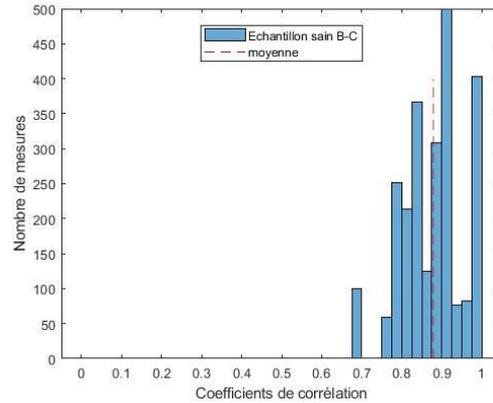


FIGURE 3. Dispersion des coefficients de corrélation temporels sur les signaux du capteur n°1 de l'échantillon sain béton-composite

TABLEAU 2. Valeurs minimales et moyennes des coefficients de corrélation temporels pour tous les échantillons étudiés

	Sain		Vide centré		1/3 vide		1/3 PU		1/3 grasse	
	moy	min	moy	min	moy	min	moy	min	moy	min
Capteur n°1	0.86	0.68	0.91	0.81	0.84	0.62	0.82	0.66	0.82	0.57
Capteur n°2	0.93	0.78	0.76	0.49	0.74	0.42	0.93	0.77	0.92	0.7

Le tableau TABLEAU 2 révèle des valeurs de coefficients de corrélation temporels très hautes dont les moyennes varient entre 0.74 et 0.93. Selon la littérature (Bousseljot & Kreisele, 2000), ces valeurs de coefficients de corrélation temporels sont très significatives et elle nous permettent dans le cadre d'une classification d'affecter ces signaux à une même classe. Pour notre étude, nous pouvons a priori affirmer que les mesures effectuées sur un même échantillon sont bien reproductibles. De plus, nous noterons également que les valeurs les plus faibles pour ces coefficients de corrélation sont obtenues pour les défauts de type « vide » (vide centré, 1/3 de vide) surtout pour le capteur 2.

Un calcul des coefficients de corrélations temporels entre signaux reçus dans deux échantillons différents montre que ces valeurs varient entre 0.2 et 0.57 pour le capteur n°1 et entre 0.17 et 0.55 pour le capteur n°2. La diminution de ces valeurs montre la potentialité qu'offre la technique pour la distinction des signaux reçus dans les échantillons sains des signaux reçus dans les échantillons défectueux.

B. Détection des défauts

La méthodologie proposée pour la détection des défauts est une comparaison des paramètres acoustiques des signaux reçus dans les différents échantillons. Cette comparaison est représentée sous forme de boîte à moustache comme illustré sur la figure FIGURE 4.

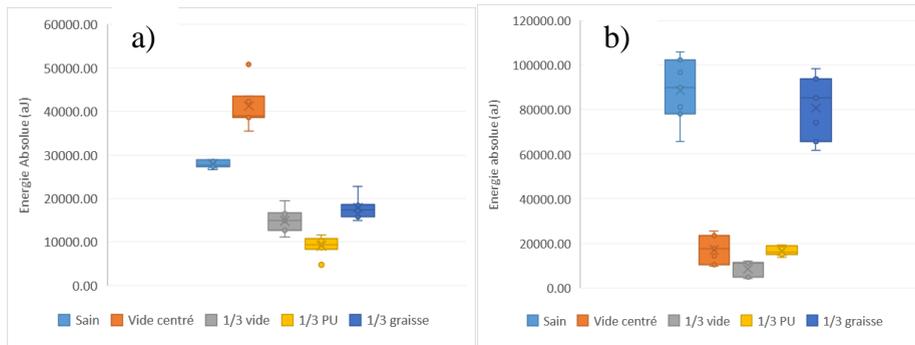


FIGURE 4. Comparaison des valeurs d'énergie absolue (a) entre différents échantillons : a) capteur n°1, b) capteur n°2

Sur la figure FIGURE 4, nous présentons en exemple la comparaison faite entre les valeurs d'énergie absolue de différents échantillons. Nous pouvons y remarquer une différence de -48% des valeurs moyennes d'énergie absolue entre l'échantillon sain et l'échantillon avec un vide centré. La différence la plus négligeable étant celle avec l'échantillon « 1/3 graisse » (36%), ce paramètre semble en mesure de détecter tous les défauts avec un critère de détection assez sévère de 20%. L'énergie absolue est le paramètre le plus discriminant parmi ceux étudiés suivi de la force du signal et de la durée. Les différences observées entre l'échantillon sain et les échantillons défectueux des valeurs moyennes de ces trois descripteurs sont répertoriés dans le tableau TABLEAU 3.

TABLEAU 3. Différences des valeurs moyennes de trois paramètres (Energie absolue, Force du signal, Durée) entre l'échantillon sain et les échantillons avec défaut

		Vide centré	1/3 vide	1/3 PU	1/3 graisse
Energie absolue (a)	Capteur n°1	-48%	47%	67%	36%
	Capteur n°2	81%	90%	81%	9%
Force du signal (pV.s)	Capteur n°1	-21%	25%	39%	16%
	Capteur n°2	58%	70%	64%	14%
Durée (µs)	Capteur n°1	-7%	12%	12%	10%
	Capteur n°2	7%	19%	30%	4%

Le tableau TABLEAU 3 révèle une nette amélioration de la détection au niveau du capteur n°2 de tous les défauts excepté la graisse. Le défaut semble plus détectable lorsque le capteur récepteur est situé au-dessus de celui-ci. Cependant, le positionnement du capteur n°1 est plus proche de la réalité car les positions des défauts sont inconnues sur site.

On notera qu'il est cependant difficile de distinguer les différents types de défauts à partir de l'analyse d'un seul paramètre (Figure 4). Il est donc nécessaire d'étudier d'autres méthodologies pour cette identification.

C. Identification des défauts : Analyse par Composantes Principales

Nous avons dans un premier temps évalué l'ACP en réalisant une analyse pour chacun des deux capteurs récepteurs (1 et 2) de tous les signaux reçus sur les échantillons. Sur la figure FIGURE 5,

nous représentons l'ensemble des signaux suivant les deux premières composantes ayant une part d'inertie de 86% pour le capteur n°1 et de 85% pour le capteur n°2.

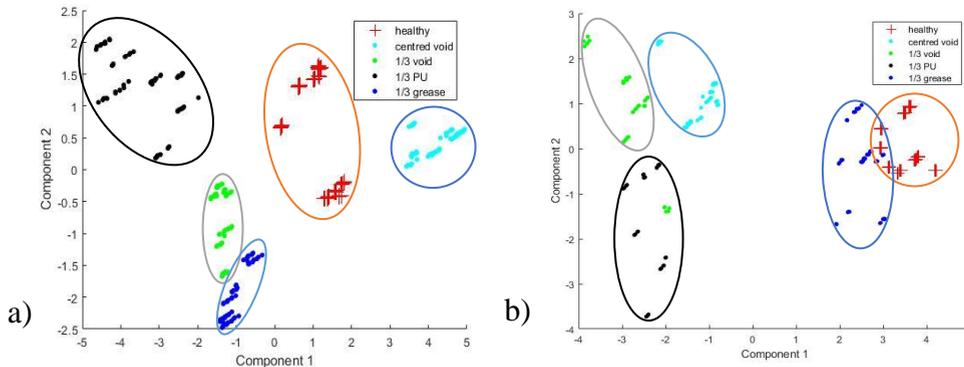


FIGURE 5. Résultats ACP : a) capteur n°1, b) capteur n°2

Dans les deux cas, il semble possible de distinguer les groupes de signaux représentant un seul et même défaut étudié. On notera que les composantes 1 sont majoritairement portées par l'énergie absolue, l'énergie et la force du signal. Les composantes 2 sont majoritairement portées par le temps de montée et le nombre de coups au pic. L'expression de critères d'identification basés sur une ACP semble donc envisageable pour la population étudiée.

D. Identification des défauts : Classification supervisée par forêt d'arbres décisionnels

Afin de disposer, d'une méthode plus robuste et plus facilement adaptable à des procédés différents, nous avons également évalué la pertinence d'une classification supervisée de type forêt d'arbres décisionnels. Cette classification a été réalisée en tenant compte du vote majoritaire des 100 arbres votant, les résultats sont présentés dans le tableau TABLEAU 4.

TABLEAU 4. Résultats du classement des signaux reçus lors des 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} mesures

	Classe "Sain"	Classe "Vide centré"	Classe "1/3 vide"	Classe "1/3 PU"	Classe "1/3 graisse"
Sain (05 06 07)	101 (97.1%)		1 (1%)		2 (1.9%)
Vide centré (05 06 07)		84 (60.4%)	1 (0.7%)	48 (34.5%)	6 (4.3%)
1/3 vide (05 06 07)			77 (96.2%)		3 (3.8%)
1/3 PU (05 06 07)		1 (1%)		104 (99%)	
1/3 graisse (05 06 07)			20 (22.7%)	11 (12.5%)	57 (64.8%)

Le tableau 4 montre un bon classement des signaux avec un meilleur score obtenu pour les signaux reçus sur l'échantillon avec 1/3 de PU qui ont été bien identifiés à hauteur de 99%. Le moins bon des classements est celui des signaux reçus sur l'échantillon avec vide centré qui ne comptabilise que 60.4% de signaux bien identifiés. Nous notons toutefois qu'aucun des signaux reçus dans un échantillon défectueux n'a été classé parmi la classe « sain », ce qui démontre que la totalité des défauts restent tout de même détectable. En outre, les « faux négatifs » trouvés peuvent être réduits voir totalement évité en accentuant la sévérité sur les règles de vote de la classe.

IV. CONCLUSIONS

L'objectif de notre étude était d'évaluer les capacités d'une méthodologie de mesures acousto-ultrasoniques à détecter et identifier plusieurs défauts classiquement rencontrés dans les assemblages collés béton-composite du génie civil. Pour cela, après avoir confectionné un ensemble d'éprouvettes représentatives, nous avons réalisé, des séries de mesures sur chaque échantillon (incluant le décollement/recollement des capteurs) selon un protocole établi au travers d'études préliminaires.

Des calculs des coefficients de corrélation dans le domaine temporel ont permis de vérifier la répétabilité des mesures pour le protocole et les assemblages étudiés. Ensuite, une comparaison des valeurs paramétriques mesurées nous a permis de vérifier la capacité de la méthode à détecter les défauts étudiés. En ce qui concerne leur identification, il a été démontré qu'une analyse paramétrique seule n'était pas suffisante et qu'il était nécessaire de prendre en compte plusieurs paramètres acoustiques. Ceci peut être réalisé via une analyse de type ACP qui semble pertinente pour discerner les différents types de défauts étudiés. Pour plus de robustesse et d'adaptabilité à différentes configurations sur site, une seconde méthode basée sur classification supervisée par forêt d'arbres décisionnels a également été mise en œuvre et montre de bons résultats.

Des études supplémentaires sont en cours afin de vérifier la pertinence de la méthode sur un plus grand nombre de données pour d'autres géométries et procédés, et pour finaliser les procédures de détection et d'identification des défauts. En parallèle, des travaux de compréhension de l'influence des défauts sur la propagation des ondes sont nécessaires pour conforter cette approche.

V. REFERENCE

Bousseljot, R. & Kreisele, D., 2000. Waveform Recognition with 10,000 ECGs. *IEEE Computers in Cardiology proceedings*, Volume 27, pp. 331 - 334.

Brahma, K. K. & Murthy, C. R. L., 1988. Bond quality evaluation of bimetallic strips : Acousto-ultrasonic approach. Dans : *Acousto-Ultrasonics : Theory and application*. Virginia : Springer Science+Business Media, LLC, pp. 337-344.

Chauchois, A. et al., 2015. Evaluation of gluing of CFRP onto concrete structures by infrared thermography coupled with thermal impedance. *Composites : Part B*, Volume 69, pp. 350 -358.

Godin, N., Huguet, S. & Gaertner, R., 2005. Integration of the Kohonen's self-organising map and k-means algorithm for the segmentation of the AE data collected during tensile tests on cross-ply composites. *NDT & E International*, 38(4), pp. 299-309.

Samann, F. E., 2019. Detecting Kissing Disbond Defect in Adhesively Bonded Structures : A Review. *Zakho - Duhok, Iraq, IEEE*.

Srivastava, V. K. & Prakash, R., 1988. Acousto-ultrasonic evaluation of the strength of composite material adhesive joints. Dans : *Acousto-Ultrasonics : Theory and application*. Virginia : Springer Science+Business Media, LLC, pp. 345-353.

Tanary, S., Haddad, Y. M., Fahr, A. & Lee, S., 1992. Nondestructive Evaluation of Adhesively Bonded Joints in Graphite/Epoxy Composites Using Acousto-Ultrasonics. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 114(3), pp. 344 - 352.

Tighe, R. C., Dulieu-Barton, J. M. & Quinn, S., 2016. Identification of kissing defects in adhesive bonds using infrared thermography. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Volume 64, pp. 168 - 178.

Vary, A. & Bowles, K. J., 1978. Use of an Acousto-ultrasonic technique for nondestructive evaluation of fiber composite strength. *Washington, s.n.*