



HAL
open science

Auscultation des assemblages collés par acousto-ultrasons : Application à des assemblages acier-composite du génie civil

Cheikh Sarr, Sylvain Chataigner, Laurent Gaillet, Nathalie Godin

► To cite this version:

Cheikh Sarr, Sylvain Chataigner, Laurent Gaillet, Nathalie Godin. Auscultation des assemblages collés par acousto-ultrasons : Application à des assemblages acier-composite du génie civil. 21ème Journées Nationales sur les Composites, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) - Bordeaux, Jul 2019, Bordeaux, Talence, France. hal-02420784

HAL Id: hal-02420784

<https://hal.science/hal-02420784>

Submitted on 20 Dec 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Auscultation des assemblages collés par acousto-ultrasons : Application à des assemblages acier-composite du génie civil

Assessment of steel-composite adhesively bonded joints by acousto-ultrasonic technique

Cheikh Sarr¹, Sylvain Chataigner¹, Laurent Gaillet¹ et Nathalie Godin²

1 : IFSTTAR, SMC
Département MAST
Route de Bouaye, F-44341 Bouguenais
E-mail : cheikh.sarr@ifsttar.fr, sylvain.chataigner@ifsttar.fr et laurent.gaillet@ifsttar.fr

2 : Université de Lyon, INSA Lyon, MATEIS
20 Avenue Albert Einstein, F- 69100 Villeurbanne
E-mail : nathalie.godin@insa-lyon.fr

Résumé

Le renforcement des structures (béton et acier) par collage de matériau composite est de plus en plus fréquent dans le domaine du génie civil depuis les années 80-90. Cependant, des défauts et/ou endommagements présents dans l'assemblage collé diminuent l'efficacité de cette solution technique. Dès lors, il est nécessaire de mettre à la disposition de ses futurs utilisateurs des outils pour détecter, voir identifier des défauts et/ou endommagements présents dans ces assemblages collés sans pour autant nuire à leur future utilisation.

Les techniques actuellement utilisées dans l'auscultation des assemblages collés ne permettent pas de détecter des zones mal polymérisées ou des défauts d'adhésion. La détection de ces types de défaut constitue donc un verrou important freinant l'utilisation du collage structural. Dans cette étude, nous éprouvons la potentialité de la technique des acousto-ultrasons à répondre à cette problématique.

Une série d'assemblages collés de renforts composites sur plaque métallique a été réalisée avec différents types de défauts maîtrisés. Des mesures par acousto-ultrasons ont permis d'évaluer dans un premier temps la répétabilité de la technique puis d'estimer sa capacité à détecter et discerner les défauts étudiés. Plusieurs méthodologies ont été évaluées : une analyse des coefficients de corrélation des spectres fréquentiels, une analyse paramétrique et enfin une Analyse par Composantes Principales (ACP).

L'analyse paramétrique s'est avérée efficace à déceler les défauts d'adhésion et de vieillissement de la colle. Une exploitation des données de type Analyse par Composantes Principales a été nécessaire afin de pouvoir détecter l'ensemble des défauts étudiés.

Abstract

Reinforcing structures (both concrete and steel) using adhesively bonded composite has been increasingly used in civil engineering since the 1980s. However, defects and / or damage present in the adhesive reduce their effectiveness. Therefore, it is necessary to provide future users of the solution with tools for detecting, or identifying defects and / or damage present in these bonded joints without affecting their future use.

The detection of poorly polymerized areas or lack of adhesion within the adhesively bonded joint is until now unworkable by the NDT currently used, and this is an important barrier to the development of the structural bonding. In this paper, we are testing the potential of the acousto-ultrasonic technique to answer this problem.

Measurements were done on steel-composite bonded joints with controlled defects and data was processed by an analysis of the frequency spectrum's correlation coefficients, a parametric analysis and with a multi-variable analysis called PCA (Principal Component Analysis).

We reveal efficiently the lack of adhesion and the aging defect with the parametric analysis. Further data processing in principal component analysis (PCA) validated the efficiency of the technique for all the studied samples.

Mots Clés : Acousto-ultrasons, Contrôle Non-Destructif (CND), Assemblage collé acier-composite

Keywords: Acousto-ultrasound, Non Destructive Technique (NDT), Adhesively bonded steel-composite joints

1. Introduction

L'utilisation de renforts composites collés dans le génie civil peut permettre d'accroître la capacité portante des structures métalliques, de prolonger leur durée de vie [1], ou de réparer des structures endommagées [2]. Cependant, de nombreuses études [3-5] ont montré que la performance mécanique du joint de colle est fortement influencée par la présence de défauts. Il est donc nécessaire de disposer d'outils permettant de vérifier la qualité des assemblages réalisés et de suivre leur évolution dans le temps, d'où le recours aux techniques de contrôle non-destructives (CND).

D'après un rapport de YANG *et al.* [6], les défauts les plus souvent rencontrés dans les assemblages collés sont de trois types (Figure 1):

- des vides complets, des décollements ou de la porosité;
- une mauvaise adhérence, c'est-à-dire une liaison faible entre l'adhésif et l'adhérent;
- une faible force de cohésion, c'est-à-dire une couche adhésive faible.

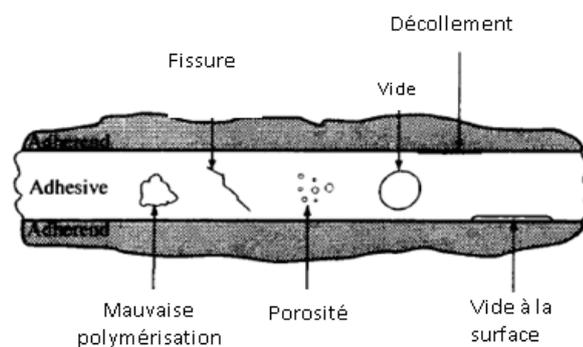


Figure 1 : Défauts dans un assemblage collé [7]

La thermographie IR est l'une des techniques CND les plus utilisées pour l'inspection des assemblages collés [8,9]. Dans une étude de MONTINERO *et al.* [9], il est démontré qu'elle permet de détecter la position, la taille et dans une certaine mesure la forme des défauts inter-laminaires d'un GLARE (*Glass Reinforced Aluminum*). Combinée à une quantification par calcul de l'impédance thermique dans une étude de CHAUCHOIS *et al.* [10], elle permet de détecter des vides sans toutefois être en mesure de détecter d'autres types de défauts.

L'objectif de notre étude est d'éprouver la technique des acousto-ultrasons quant à sa capacité à détecter tous types de défauts dans les assemblages collés acier-composite. La technique d'acousto-ultrason est une combinaison des techniques de l'émission acoustique et des ultrasons. Elle consiste à envoyer une onde élastique au sein d'un matériau puis à la réceptionner après sa propagation à l'aide de transducteurs piézoélectriques. Elle a déjà montré d'énormes potentialités dans la caractérisation de résistances mécaniques de matériaux tels que les blocs de polymères solides [11], les plaques de polymères à fibres de verre [4] et de carbone [5]. Dans une étude de Haddad *et al.* [11], les auteurs ont également décliné les différentes spécificités de la technique notamment les paramètres qui affectent la répétabilité des mesures, telles que la distance, le type de couplant utilisé pour fixer les capteurs à l'échantillon ainsi que les pressions exercées sur ces derniers.

Cette technique a fait l'objet de plusieurs applications telles que dans la caractérisation du ratio W/C d'un mortier de ciment [12] et d'un béton [13], la détermination de la signature sonore d'une rupture de fibre due à un impact [14] ou par traction simple [15], ou encore la caractérisation d'assemblages béton/composite collés [16].

Dans notre étude, la technique des acousto-ultrasons est appliquée à des assemblages de plaques composites pultrudées à fibres de carbone collées sur une plaque d'acier de construction métallique. Dans un premier temps, nous présenterons les caractéristiques des matériaux et des assemblages étudiés, ainsi que le protocole d'acousto-ultrasons utilisé. Des investigations préliminaires pour vérifier la répétabilité de la méthodologie seront également détaillées. Dans un second temps, nous décrirons les résultats obtenus et les exploitations réalisées en s'appuyant sur trois méthodologies : l'étude de la corrélation spectrale, une analyse paramétrique, et une analyse par composantes principales.

2. Description des échantillons et du protocole de mesure

2.1 Assemblages collés acier-composite

Les échantillons étudiés sont des assemblages de composites pultrudés unidirectionnels FOREVA LFC de dimensions 300 mm x 50 mm x 1,4 mm et de module élastique longitudinal $E_1 = 210$ GPa collés sur des plaques d'acier de construction de nuance S355, de 20 mm d'épaisseur et de module élastique $E = 210$ GPa. La colle utilisée est une résine époxy bi-composant polymérisant à froid Sikadur30 de module $E = 12,8$ GPa. Les proportions massiques du mélange de résine et de durcisseur appliquées lors de la conception des assemblages sont celles recommandées par les fournisseurs: 75% de résine + 25% de durcisseur. Les préparations de surface réalisées pendant l'assemblage sont celles préconisées par les recommandations de l'AFGC [17] i.e. sablage et dégraissage des surfaces métalliques, puis légère abrasion et dégraissage du renfort composite.

Six échantillons ont été réalisés représentant chacun un défaut particulier pouvant être rencontré dans un assemblage collé (voir Figure 2) :

- un échantillon de référence dit « sain » avec une résine époxy comme joint de colle (échantillon 1),
- deux échantillons avec des vides dans le joint de colle (incorporation d'un vide sur 1/3 de la surface collée au centre de l'assemblage pour l'échantillon 2, « 1/3 vide » ou sur une zone centrale de 25 x 50 mm, « vide centré » pour l'échantillon 3),
- un échantillon confectionné avec de la colle polyuréthane sur 1/3 de la surface (échantillon 4), « 1/3 de colle polyuréthane (PU) » (la présence de la colle polyuréthane représente un défaut de polymérisation ou un assouplissement de la résine qui pourrait être par exemple dû à un vieillissement en présence d'humidité),
- puis deux échantillons avec un défaut d'adhésion du joint de colle en résine époxy sur le substrat composite (incorporation de graisse à l'interface résine époxy/composite sur 1/3 de la surface collée, « 1/3 graisse » pour l'échantillon 5, ou sur une zone centrale de 25 x 50 mm, « graisse centrée » pour l'échantillon 6).

Les épaisseurs des joints de colle varient entre 0,5 et 0,8 mm.

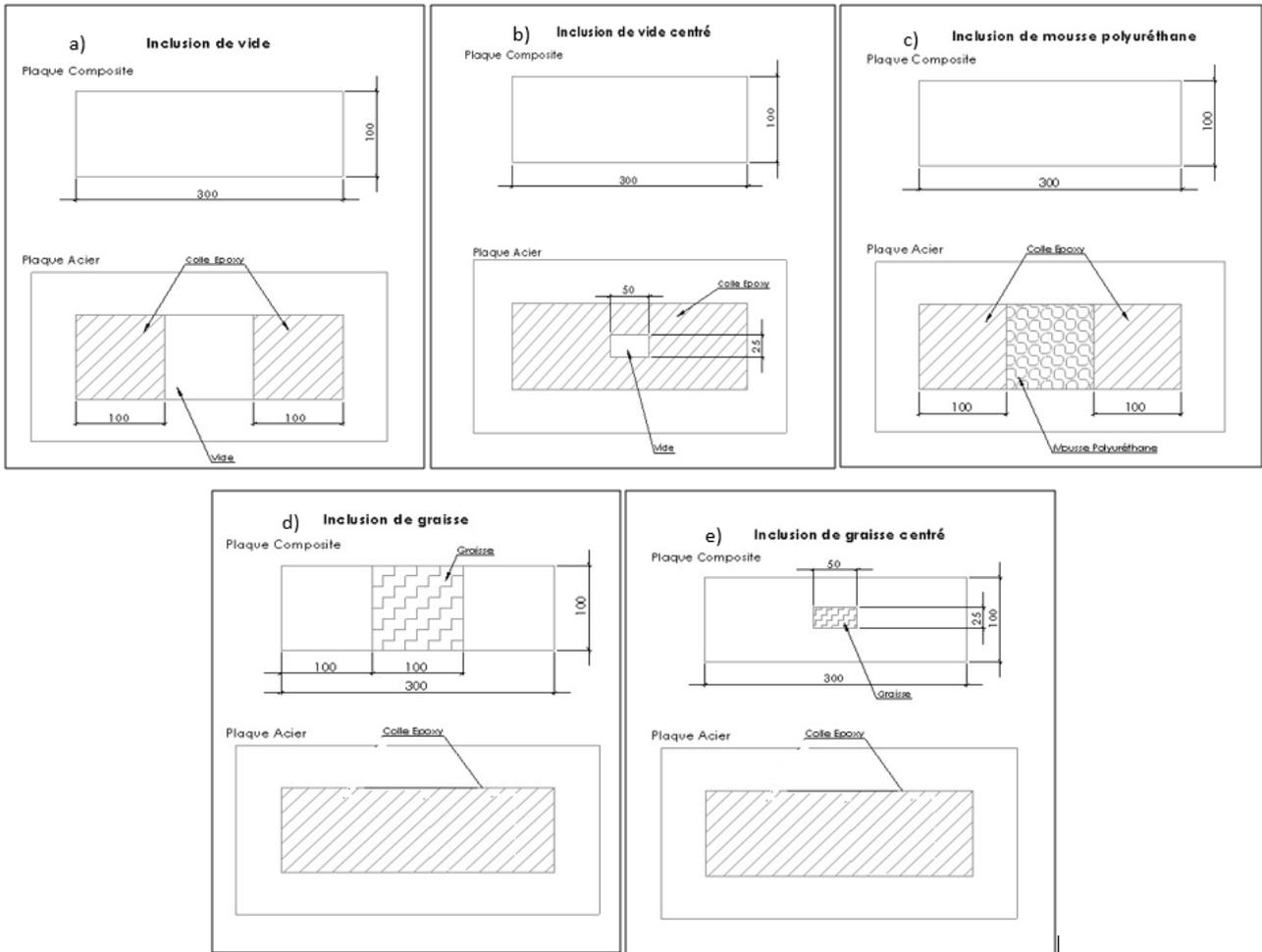


Figure 2 : Echantillons à défauts d'assemblage collé acier-composite a - 1/3 de vide (n°2) b - vide centré (n°3), c - 1/3 de colle PU (n°4), d - 1/3 d'inclusion de graisse (n°5), e - inclusion de graisse centrée (n°6)

2.2 Protocole de mesure par acousto-ultrasons

Le choix des capteurs a été réalisé 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 les deux récepteurs sont distants de 250 mm, ils sont alignés parallèlement aux fibres du composite afin de limiter les effets de l'anisotropie du matériau (voir Figure 3). 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. Le couplant se solidifiant à température ambiante, il ne semble pas nécessaire d'exercer une pression supplémentaire sur les capteurs. 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.

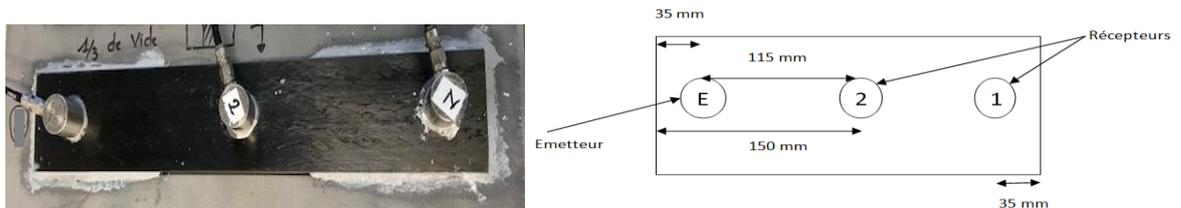


Figure 3 : Disposition des capteurs sur les échantillons d'assemblage collé acier-composite.

La consigne en émission a été faite à l’aide d’une carte électronique ARB1410 : signal carré d’amplitude 4V et de fréquence 150 kHz (Figure 4). En réception, les critères de définition de salves sont configurés pour les valeurs suivantes : Peak Definition Time (PDT) de 300 μ s, Hit Definition Time (HDT) de 800 μ s et Hit Lockout Time (HLT) de 1000 μ s. Chaque signal est numérisé avec une fréquence d’échantillonnage de 500 kSPS sur une longueur maximale de 15k points.

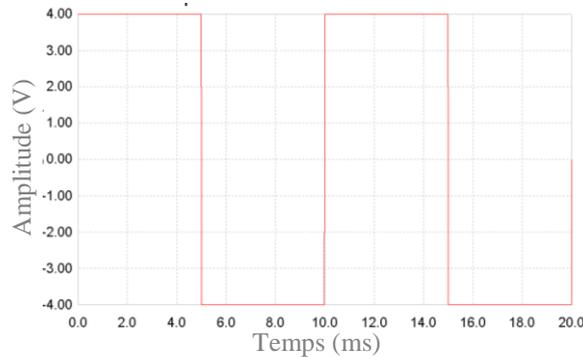


Figure 4 : Représentation du signal en émission.

2.3 Répétabilité de la méthodologie

Nous avons effectué sur chaque échantillon sept mesures en décollant et recollant les capteurs à chaque essai, afin de s’assurer de la répétabilité du protocole de mesures.

Afin de vérifier la reproductibilité de notre procédure d’essai, nous avons déterminé les coefficients de corrélation entre les spectres fréquentiels des signaux enregistrés dans l’échantillon sain pour les sept mesures indépendantes. Le coefficient de corrélation ρ_{xy} de deux signaux X(t) et Y(t), est calculé à l’aide de l’équation 1 suivante :

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

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

Et σ_x et σ_y leur variance respective.

Les coefficients sont répertoriés dans le Tableau 1, ils varient entre 81% et 97%. Ainsi nous pouvons conclure sur la bonne répétabilité de la procédure d’essai.

Mesures	1ere	2eme	3eme	4eme	5eme	6eme	7eme
1ere	1	0,93	0,89	0,93	0,95	0,96	0,93
2eme	0,93	1	0,81	0,90	0,88	0,92	0,88
3eme	0,89	0,81	1	0,89	0,88	0,91	0,94
4eme	0,93	0,90	0,89	1	0,95	0,97	0,95
5eme	0,95	0,88	0,88	0,95	1	0,97	0,92
6eme	0,96	0,92	0,91	0,97	0,97	1	0,96
7eme	0,93	0,88	0,94	0,95	0,92	0,96	1

Tableau 1 : Coefficients de corrélation des spectres fréquentiels pour les mesures effectuées sur l’échantillon sain

3. Résultats et Discussions

Chacun des signaux reçus après leur propagation dans l'assemblage est exploité à l'aide de descripteurs extraits dans le domaine temporel et fréquentiel. Les principaux descripteurs sont :

- le temps de montée (μs)
- le nombre de coups
- l'énergie ($\mu\text{V.s/coup}$) et l'énergie absolue (aJ)
- la durée (μs)
- l'amplitude maximale du signal (dB)
- le nombre de coups au pic
- la force du Signal (pV.s)
- le barycentre Fréquentiel (kHz)
- le pic fréquentiel (kHz)

Nous déterminons dans un premier temps les coefficients de corrélation des spectres fréquentiels entre les signaux reçus dans l'échantillon sains et ceux reçus dans les échantillons avec défaut. Puis, par analyse paramétrique nous comparons les signaux à l'aide des principaux descripteurs (analyse mono-paramètre). Enfin, par analyse multi-variable telle que l'Analyse par Composantes Principales (ACP) qui prend en compte les dix descripteurs listés ci-dessus, nous évaluons la capacité de détection de la méthode pour l'ensemble des défauts étudiés.

3.1 Analyse spectrale

Nous avons effectué une analyse spectrale dans le domaine fréquentiel sur les signaux numérisés reçus du capteur n°1 positionné à 22 cm du capteur émetteur. Les différences dans la représentation des spectres fréquentiels ont été mis en évidence par le calcul des coefficients de corrélation entre eux à partir de l'équation 1 (Tableau 2).

Echantillons	Sain	1/3 de vide	Vide centré	1/3 de colle PU	1/3 de graisse	Graisse centré
Sain	1	0,72	0,78	0,75	0,74	0,73
1/3 de vide	0,72	1	0,70	0,73	0,75	0,67
Vide centré	0,78	0,70	1	0,74	0,75	0,76
1/3 de colle PU	0,75	0,73	0,74	1	0,75	0,84
1/3 de graisse	0,74	0,75	0,75	0,75	1	0,77
Graisse centré	0,73	0,67	0,76	0,84	0,77	1

Tableau 2 : Coefficients de corrélation des spectres fréquentiels obtenus pour les différents échantillons

Les coefficients de corrélation entre échantillon sain et échantillon avec défaut varient de 72 à 78%. Nous remarquons qu'ils sont inférieurs à ceux réalisés entre les mesures sur l'échantillon sain (Tableau 1). Cette diminution constatée des coefficients de corrélation due à la présence de défauts nous permet de statuer sur la possibilité qu'offre la méthodologie (technique CND associée à un traitement) de déterminer la présence de défauts en se basant sur la valeur du coefficient de corrélation des spectres fréquentiels. Ainsi, lorsque nous aurons une base de données importante des signaux

qu'il est possible d'obtenir dans un assemblage collé, nous pourrions escompter établir un algorithme de classification basé sur ces coefficients afin de détecter voire identifier les différents types de défaut.

3.2 Analyse paramétrique

Pour apporter une valeur quantitative à la notion de défaut, nous avons comparé les valeurs moyennes des descripteurs enregistrés sur chaque échantillon après sept mesures indépendantes. Sur la Figure 5, les descripteurs les plus discriminants sont représentés, à savoir la durée (μs) et l'énergie absolue (aJ).

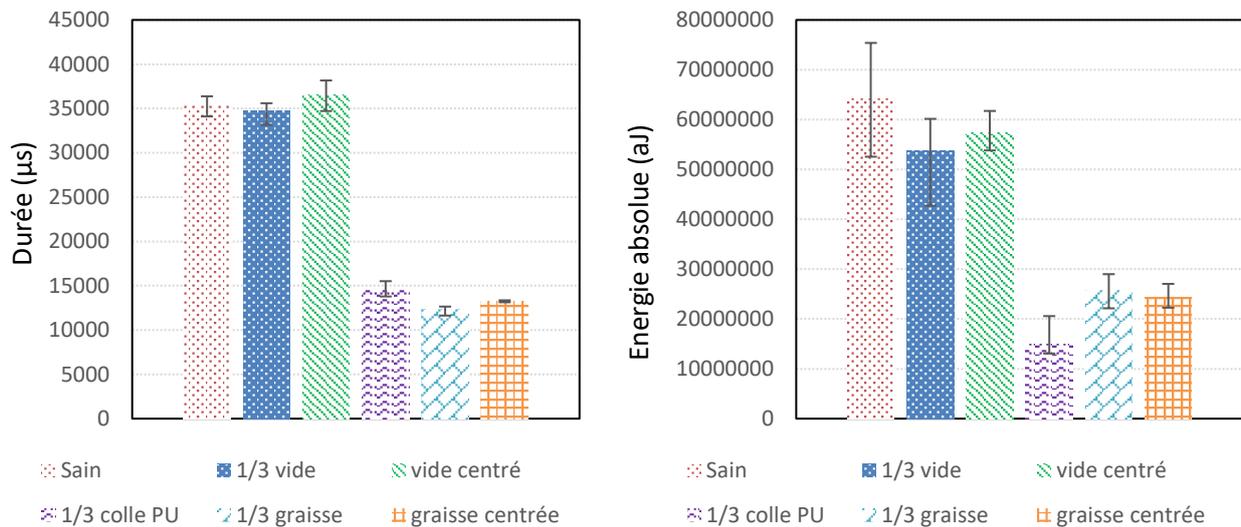


Figure 5 : Comparaison des valeurs des durées (μs) (gauche) et des énergies absolues (aJ) (droite) des signaux

Nous pouvons noter que les assemblages collés avec des défauts de type assouplissement de l'adhésif (échantillon n°4) et des défauts d'adhésion (échantillon n°5 et n°6) semblent bien discernables de l'échantillon sain. Cependant cette conclusion n'est pas valable pour les échantillons présentant un vide (n°2 et n°3), en raison du rapprochement de leurs valeurs moyennes avec celle de l'échantillon sain (graphique des durées), ou par le chevauchement des barres d'erreur (graphique des énergies absolues). Pour ces deux derniers échantillons, il est donc nécessaire de recourir à d'autres techniques d'analyse comme l'ACP dissertée dans le paragraphe suivant.

3.3 Analyse par Composantes Principales (ACP)

L'ACP est une méthode statistique essentiellement descriptive permettant une représentation graphique, à une dimension d'ordre q , d'informations contenues dans un tableau de p données, observées sur n individus, tel que q soit inférieur à p . En d'autres termes, l'objectif de l'ACP est de revenir à un espace de dimension réduite (par exemple 2 ou 3) en déformant le moins possible la réalité. Il s'agit donc, dans notre cas, d'obtenir le résumé le plus pertinent possible des p données initiales représentant les différents descripteurs (amplitude, temps de montée, fréquence, etc.) observés sur les n différents signaux qui font office d'individus. Les composantes principales seront obtenues en maximisant l'inertie c'est-à-dire la dispersion de la projection des nuages de points sur la droite passant par leur centre de gravité.

L'ACP a été réalisée sur les données des signaux enregistrés sur l'échantillon sain, combinées à celles des signaux mémorisés sur un échantillon défectueux. Nous avons au total cinq résultats d'ACP, et nous en présentons deux à savoir ceux de l'échantillon sain avec l'échantillon à 1/3 de vide ou vide centré (Figure 6), ces deux défauts étant ceux indétectables à l'issue de l'analyse paramétrique.

Dans ces représentations, les populations des signaux reçus dans l'échantillon sain (points rouges) semblent discernables des populations des signaux reçus dans les échantillons avec une zone vide (croix bleues et astérisques verts). Ce résultat ouvre des perspectives intéressantes afin d'établir des critères de classification des échantillons. Il sera cependant nécessaire de disposer d'un nombre de mesures plus important avant d'établir ces critères.

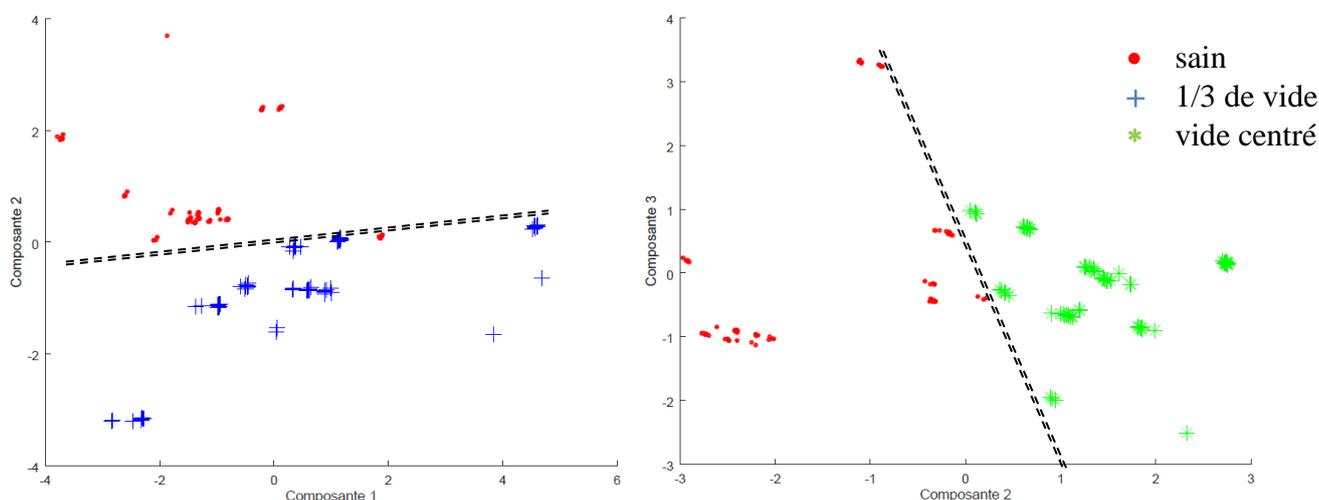


Figure 6 : Répartition des données dans le plan des deux premières composantes pour les échantillons sain ($N^{\circ}1$) et 1/3 de vide ($N^{\circ}2$) « gauche » et pour les échantillons sain ($N^{\circ}1$) et vide centré ($N^{\circ}3$) « droite »

4. Conclusion

La présente étude a pour objectif d'éprouver la potentialité qu'offre la technique de contrôle non-destructif par acousto-ultrasons afin de détecter les défauts les plus souvent rencontrés dans des assemblages collés acier-composite. Ces défauts sont de trois types : les vides, les défauts d'adhérence et les assouplissements locaux. Nous les avons matérialisés en confectionnant cinq échantillons comportant des défauts contrôlés en plus d'un échantillon témoin dit « sain ». Le défaut d'adhérence a été obtenu en incorporant de la graisse à l'interface composite/adhésif, et l'assouplissement local qui peut être dû à un vieillissement prématuré d'une partie de l'adhésif est représenté par une incorporation de colle polyuréthane.

Des séries de mesures indépendantes (incluant le décollement/recollement des capteurs) selon un protocole établi au travers d'études préliminaires, ont été réalisées sur chaque échantillon. La répétabilité des mesures réalisées sur l'échantillon sain a été validée à l'aide des coefficients de corrélation des spectres fréquentiels.

Nous avons ensuite traité l'ensemble des mesures en calculant dans un premier temps les coefficients de corrélation entre spectres fréquentiels des signaux reçus lors des mesures réalisées sur l'échantillon sain et sur les échantillons avec défaut. La diminution de ces coefficients de corrélation nous a permis de constater la présence des défauts dans l'assemblage. Cette observation semble conforter les potentialités de la technique à détecter les défauts présents dans le joint de colle.

Une analyse paramétrique a ensuite été réalisée en comparant les descripteurs des salves (les valeurs moyennes et les écarts-types). Les descripteurs les plus pertinents au vu de cette étude sont la durée du signal et l'énergie absolue. L'étude de ces paramètres semble permettre la détection des défauts d'adhérence et des assouplissements locaux pour les échantillons étudiés.

Enfin, une Analyse par Composantes Principales (ACP) a été menée afin de vérifier la potentialité de la technique à la détection de l'ensemble des défauts étudiés. Celle-ci a été concluante, notamment pour les défauts de type vide dont l'analyse paramétrique seule n'avait pas démontré de capacité de détection. Ainsi, dans cette étude, tous les types de défauts ont pu être détectés pour la géométrie, les matériaux et les défauts étudiés et en utilisant le protocole d'acousto-ultrasons proposé.

Des investigations supplémentaires sont nécessaires afin de définir les limites de la technique en terme de distance d'auscultation et de sensibilité (taille et type de défaut). Un travail additionnel est également envisagé afin de vérifier les capacités de la méthode à l'identification fiable de chacun des défauts.

Références

- [1] S. CHATAIGNER, K. BENZARTI, G. FORET, J. ., F. CARON, G. GEMIGNANI, M. M. BRUGIOLO, I. CALDERON, I. PINERO, V. BIRTEL et F. LEHMANN, «Design and evaluation of an externally bonded CFRP reinforcement for the fatigue reinforcement of old steel structures,» *Engineering Structures*, vol. 177, pp. 556 - 565, 2018.
- [2] E. LEPRETRE, S. CHATAIGNER, L. DIENG et L. GAILLET, «Fatigue strengthening of cracked steel plates with CFRP laminates in the case of old steel materials,» *Construction and Building Materials*, vol. 174, pp. 421 - 432, 2018.
- [3] S. TANARY, «Characterization of adhesively bonded joints using acousto-ultrasonics,» University of Ottawa, Ottawa, 1988.
- [4] V. K. SRIVASTAVA, «Acousto-ultrasonic evaluation of interface bond strength of coated glass fibre-reinforced epoxy resin composites,» *Composite Structures*, vol. 30, pp. 281-285, 1995.
- [5] V. K. SRIVASTAVA et R. PRAKASH, «Acousto-ultrasonic evaluation of the strength of composite material adhesive joints,» *Acousto_Ultrasonics :Theory and application by John DUKE*, pp. 345-353, 1988.
- [6] S. YANG, L. GU et R. F. GIBSON, «Nondestructive detection of weak joints in adhesively bonded composite structures,» 2001.
- [7] R. D. ADAMS et B. W. DRINKWATER, «Nondestructive testing of adhesively-bonded joints». Department of Mechanical Engineering,» *NDT&E International*, vol. 30, n° 12, p. 93-98, 1997.
- [8] J. DUMOULIN, C. IBARRA-CASTANEDO, M. QUIERTANT, F. TAILLADE, A. BENDADA et M. MALDAGUE, «Evaluation of FRP gluing on concrete structures by active infrared thermography,» chez *10th International Conference on Quantitative Infrared Thermography*, 2010.
- [9] N. MONTINARO, D. CERNIGLIA et G. PITARRESI, «Detection and characterisation of disbands on Fibre Metal Laminate hybrid composites by flying laser spot thermography,» 2017.
- [10] A. CHAUCHOIS, F. BRACHELET, D. DEFER, E. ANTCZAK et H. CHOI, «Evaluation of gluing of CFRP onto concrete structures by infrared thermography coupled with thermal impedance,» *Composites : Part B*, vol. 69, pp. 350 -358, 2015.
- [11] Y. M. HADDAD et S. S. IYER, «An acousto-ultrasonics pattern recognition approach for the mechanical characterization of engineering materials,» *Departement of mechanical engineering, University of Ottawa*, 1994.
- [12] Y. WANG, H. X. HU, S. J. LIU, S. J. CHEN et Z. Z. XU, «The Effect of Water-Cement Ratio on Acousto-Ultrasonic Characteristics in Mortar,» *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 53, n° 12, pp. 148 - 158, 2017.
- [13] T. P. PHILIPPIDISA et D. G. AGGELIS, «An acousto-ultrasonic approach for the determination of water-to-cement ratio in concrete,» *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 525 - 538, 2003.
- [14] C. BARILE, C. CASAVOLA et G. PAPPALETTERA, «Acousto-ultrasonic evaluation of interlaminar strength on CFRP laminates,» *Composite Structures*, vol. 208, pp. 796 - 805, 2019.
- [15] Y. Z. PAPPAS, A. KONTOS, T. H. LOUTAS et V. KOSTOPOULOS, «On the characterization of continuous fibres fracture by quantifying acoustic emission and acousto-ultrasonics waveforms,» *NDT&E International*, vol. 37, pp. 389 - 401, 2004.
- [16] S. CHATAIGNER, L. GAILLET et E. LE GAL LA SALLE, «Contrôle non destructif d'assemblages composite/béton collés par acousto-ultrasons,» chez *JNC19*, Lyon, 2015.

- [17] AFGC, Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites, Association Française de Génie Civil, 2007.