More info about this article: http://www.ndt.net/?id=21351

EVALUATION D'UN NIVEAU D'ADHESION PAR DES METHODES ULTRASONORES SUR DES PIECES ETALONS ALUMINIUM-EPOXY.

MOYSAN Joseph (1), GALY Jocelyne (2), SIRYABE Emmanuel (3), GAUTHIER Camille (4), FOZE N'DJOMO Ludovic (5), ECH CHERIF EL KETTANI Mounsif (4), RENIER Mathieu (3), MEZIANE Anissa (3), LEDUC Damien (4), EL MAHI Aderrahim (5), CASTAINGS Michel (3), IZBICKI Jean Louis (4), PAYAN Cédric (1), POTEL Catherine, (5), BRUNEAU Michel (5)

1. Université Aix-Marseille, LMA, CNRS UPR 7051, Centrale Marseille
2. IMP UMR CNRS 5223

3. Université Bordeaux, I2M, UMR 5295 CNRS, Bordeaux INP, Arts et Métiers Paris Tech
4. LOMC, UMR CNRS 6294, Université du Havre, FANO, FR CNRS 3110,
5. LAUM, UMR CNRS 6613, Université du Maine, Le Mans, FANO, FR CNRS 3110

Conférencier Joseph Moysan

RESUME

Dans le projet ANR ISABEAU (2012-2016) nous avons développé une large série de pièces collées aluminium-époxy-aluminium dans le but de proposer des pièces dont les propriétés mécaniques et physico-chimiques soient connues avec une grande précision en vue d'avoir des éprouvettes de références pour l'évaluation non destructive du niveau d'adhésion. Le niveau d'adhésion est modifié par différents traitements de surface, les niveaux d'adhésion sont évalués par la limite à la rupture d'éprouvettes de cisaillement simple [1]. Ces mêmes traitements de surface sont appliqués à des géométries de type plaques en vue de développer des méthodes basées sur les ondes guidées avec des configurations tri-couches ou bi-couches. Le projet a fait progresser les connaissances sur la prise en compte de la rugosité pour les méthodes en ondes guidées. Les travaux ont également permis de faire progresser la réflexion sur l'emploi des méthodes non linéaires et la recherche de Kissings Bond pour lesquels la définition de pièces étalons pour la démonstration de performance reste un objectif à atteindre.

INTRODUCTION

Les structures collées sont de plus en plus utilisées dans les industries de transport, le besoin est croissant de mettre au point des méthodes d'essais non destructifs (END) pour assurer l'inspection après la fabrication, lors d'inspections périodiques ou pendant la vie des structures ou des composants (surveillance SHM) [2]. Trois types de défauts sont classiquement recherchés par des méthodes non destructives [3,4,5]: i. les défauts volumiques (vides, porosités, décollements) , ii. une mauvaise adhésion (une liaison faible entre la couche adhésive et un ou les deux adhérents), iii. une faible résistance à la cohésion (une faible couche adhésive). Dans le projet ISABEAU (Innovating for Structural Adhesive Bonding Evaluation and Analysis with Ultrasounds), nous avons étudié principalement le deuxième type de défauts. Ce défaut est encore extrêmement difficile à détecter, ce qui réduit le potentiel de l'utilisation des techniques de collage pour des applications structurelles en l'absence de méthodes éprouvées de contrôle. Une mauvaise adhésion est une réduction de la résistance du lien entre l'adhésif et l'adhérent - une réduction qui n'est pas due à la présence d'un autre type de défaut, comme la porosité, le décollement ou des corps étrangers. Lorsque l'adhésion est nulle, ce défaut est connu sous le nom de Kissing Bond. L'un des défis du projet est de créer des défauts d'adhésion de référence pour qualifier les mesures non destructives. Une recommandation d'un rapport récent de la FAA préconise le développement de telles pièces étalons à faible adhésion à fournir à la communauté des CND [2]. Le défaut d'adhésion faible est extrêmement difficile à détecter en utilisant des techniques ultrasoniques classiques, car les liaisons chimiques et mécaniques ont lieu dans une couche plus fine qu'une longueur d'onde ultrasonore pour des fréquences usuelles. Dans ce projet les traitements de surface ont été choisis pour modifier les propriétés d'adhésion. Le projet se concentre sur les assemblages aluminium / époxy / aluminium, qui sont représentatifs des difficultés qui existent dans des liaisons structurelles.
Nous décrivons tout d'abord la conception et la fabrication des spécimens de faible adhésion. Nous décrivons ensuite la procédure de validation des collages par une méthode de contrôle en transmission avant les essais mécaniques sur des éprouvettes de cisaillement simple. Deux méthodes en ondes guidées permettent de caractériser un niveau d'adhésion avec des résultats concordants. L'influence de la rugosité a fait aussi l'objet d'une étude théorique et expérimentale. Une discussion sur ces résultats et des perspectives sont présentées en conclusion.

CONCEPTION DES EPROUVETTES ETALONS POUR LES END

Un des premiers objectifs du projet a été de développer des traitements de surface pour créer au moins trois niveaux d'adhésion. Idéalement, ces niveaux devraient être bien séparés pour aider à la démonstration de la qualification des méthodes END. Les choix des géométries, des dimensions et des épaisseurs ont été guidé par les méthodes ultrasonores envisagées pour faire les essais Le tableau 1 résume les différentes géométries et les objectifs correspondants. Toutes ces éprouvettes ont été réalisés avec la même nuance d'aluminium de qualité aéronautique T2024. L'avancement de chaque étude est indiqué, avec des références des travaux publiés pour plus de détails. Le tableau précise les dimensions des éprouvettes: hauteur (h), largeur (L), épaisseur adhérente (e_a) et épaisseur du substrat (e_b).

Design	Dimensions (mm) De la surface collée $L*h*(e_s+e_a+e_s)$	Objectifs	Avancement
Eprouvette cisaillement simple (EN 332)	12.5*25* (1.6+0.2+1.6)	Qualification des traitements de surface et quantification de l'adhésion	terminé [1]
Sandwich A1 200X200X(2-1-2)	200*200* (2+1+2)	Propriétés matériaux (Cijkl) et étude des raideurs d'interfaces (k_L, k_T)	terminé [7,8,9]
Sandwich A3	200*200* (10+1+10)	Etude du Kissing Bond et des ondes de volume	Étude en cours
Joint collé de grande dimension à simple recouvrement	25*450 (4+0,3+4)	Etude des ondes de Lamb sur une géométrie de grande dimension 700x450 mm	terminé
Assemblages bi ou tri-couches	principalement 200*200* (5+0.5) ou((5+0.5+5)	Etude des interfaces étape par étape Etude de la rugosité	terminé [10] terminé [11]

Tableau 1. Géométries définies pour l'étude de l'adhésion par des méthodes ultrasonores.

Pour quantifier l'adhésion les échantillons de test de cisaillement ont été conçus conformément à la norme européenne EN 2243-1. D'autres éprouvettes sandwichs ont été définies pour la caractérisation du matériau. Ces échantillons peuvent être composés d'une couche (pour caractériser l'adhérent ou l'époxy), deux couches (couche adhérente-époxy) ou trois couches (assemblage collé). Un troisième type d'échantillon (sandwich A3) est conçu pour tester des ondes de volume de fortes amplitudes (à partir de capteurs multi-éléments par exemple).

TRAITEMENTS DE SURFACE

Plusieurs solutions ont été utilisées par différentes études pour créer des échantillons de référence pour la qualification d'END. Les défauts peuvent être créés artificiellement en ajoutant un corps étranger à l'interface entre deux adhérents [12] ou en changeant la nature des liaisons chimiques en incorporant un agent de démoulage [13] ou des particules [14,15]. Pour étudier le comportement adhésif d'un assemblage collé, l'approche la plus appropriée serait de modifier soit la préparation de surface, soit le traitement de surface [16]. De nombreux paramètres peuvent modifier le niveau d'adhésion, et donc le défi consiste à reproduire les mêmes étapes de préparation dans le même environnement [17]. Dans certaines études, la pollution chimique est utilisée pour reproduire la pollution générée au cours d'un processus industriel [18]. Pour obtenir une adhérence variable, une autre solution consiste à comprimer un assemblage [19].

Dans ce travail, nous avons choisi un système modèle à deux composants pour l'adhésif époxy détaillé dans le tableau 2 [6]. Les assemblages collés ont été réalisés au laboratoire IMP de Lyon.

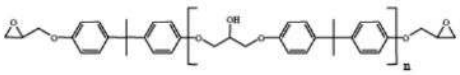
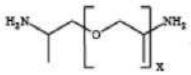
	DGEBA DER 331	Jeffamine D230
		
Etat à 25°C	Liquide visqueux	Liquide transparent
Fonctionnalité	2	4
Densité à 25°C (g/ml)	1.16	0.948
Viscosité à 25°C (Pa.s)	11 à 14	9.5
Equivalent (g/eq)	Epoxy : 185	Amino hydrogène : 60

Tableau 2 : Caractéristiques techniques des produits utilisés pour la formulation époxy [6]

La formulation bi-composant comporte le pré polymère époxy qui est une DGEBA (Diglycidyl Ether du Bisphénol A) provenant de chez DOW Chemical sous la référence DER 331 (pour Dow Epoxy Resin) et le durcisseur qui est une diamine aliphatique, la Jeffamine D 230, provenant de chez Huntsman. La résine époxy et le durcisseur ont été mélangés mécaniquement à température ambiante. Les formulations ont été réalisées avec un rapport stoechiométrique de 1 (même nombre de fonction époxy et d'amino hydrogène). Le mélange a été soigneusement dégazé par ultrasons pour empêcher la formation de bulles d'air. Un promoteur d'adhérence au silane a été utilisé pour modifier la résistance de l'adhésif.

Avant d'être réunis, les adhérents d'aluminium ont subi un traitement de surface en trois étapes: les substrats ont été dégraissés (D), en les essuyant avec un tissu imbibé d'alcool isopropylique; Ensuite, les substrats dégraissés ont été sablés avec des particules de corindon pour créer une rugosité de surface (D + S); Enfin, les substrats dégraissés et sablés ont été traités avec une solution de silane (D + S + Si).
Le traitement de surface a été arrêté à chaque étape, de sorte que trois ensembles d'éprouvettes avec différents niveaux d'adhérence ont été produits. La nomenclature adoptée pour ces traitements de surface est D, DS et DSSi.

RESULTATS DES ESSAIS MECANIQUES

Les substrats des éprouvettes de cisaillement simple ont été traités selon les trois procédures décrites ci-dessus et assemblés avec un chevauchement de 12,5 mm (EN 2243-1). Un moule spécifique permettant la préparation de sept spécimens a été réalisé. L'épaisseur de l'adhésif était comprise entre 0,2- 0,3 mm. Le cycle de polymérisation a été de 48 heures à température ambiante, suivi de trois heures à 160 ° C, ce qui a donné un adhésif complètement polymérisé. L'homogénéité des assemblages collés a été validée en utilisant un banc de contrôle ultrasonore par transmission au laboratoire LMA [20]. Nous avons choisi des transducteurs à haute fréquence avec un diamètre de 0,25 "afin que le faisceau reste extrêmement étroit. La zone focale était d'environ 0,0625" (1,59 mm). Tous les échantillons retenus pour les essais présentent une forte homogénéité : pas de défaut et une épaisseur constante

Des essais mécaniques ont été effectués sur une machine d'essai MTS standard d'une capacité de 100 kN au laboratoire LAUM du Mans. Une cale de même épaisseur que le substrat est glissée entre la mâchoire et l'éprouvette pour éliminer l'effet de flexion de l'éprouvette. La machine a été interfacée avec un ordinateur dédié au contrôle et à l'acquisition de données. Les échantillons ont été testés par des essais statiques à une vitesse constante de 0,1 mm / min. Un extensomètre a été utilisé pour surveiller la déformation réelle.
Le suivi de l'endommagement est réalisé à l'aide de l'émission acoustique. Un système d'acquisition comprenant 2 voies est utilisé. Les signaux d'émission acoustique sont enregistrés par 2 capteurs différentiels piézoélectriques de type Micro- de 10 mm de diamètre, positionnés sur les éprouvettes avec une graisse silicone. Ces signaux sont ensuite amplifiés par un préamplificateur avec un gain de 40 dB. Les signaux sont ensuite convertis par la carte PCI, qui les numérise et procède à l'extraction des paramètres d'émission acoustique. Les données de l'émission acoustique sont transmises au micro-ordinateur, permettant l'affichage en temps réel, le stockage et le post-traitement des données. Les analyses ont indiqué la présence de deux classes d'évènements: une première classe de signaux, correspondant à la rupture interfaciale (aluminium / époxy) et une deuxième classe de signaux d'amplitude supérieure apparaissant après et probablement résultant de la fissuration de la résine [1,6].

Tous ces résultats de CND complémentaires assurent la qualité des résultats mécaniques issus de cette série d'éprouvettes étalons très contrôlées. La figure 1 montre que trois niveaux d'adhérence ont été obtenus pour une conversion à 100 % (x=100%) comme prévu, même s'il existe un léger chevauchement des barres d'erreur pour les deux classes supérieures.

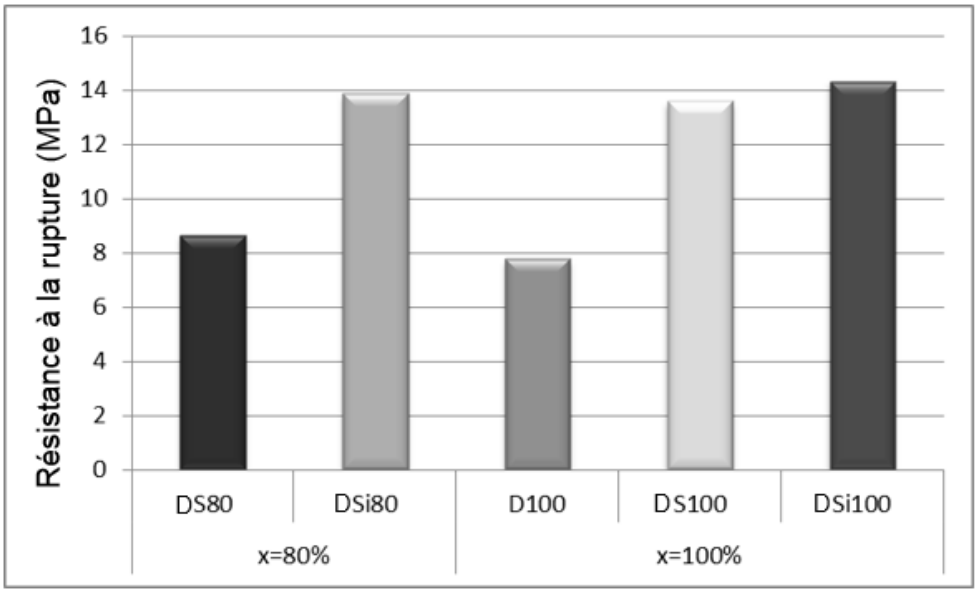


Figure 1. Synthèse des résultats des essais mécaniques (x=% conversion).

EVALUATION DE L'ADHESION A L'AIDE D'UN MODELE RHEOLOGIQUE.

Pour analyser les données expérimentales, nous avons utilisé un modèle ressort pour décrire le comportement mécanique des joints collés. Il existe plusieurs modèles possibles, selon que les propriétés cohésives et / ou adhésives sont représentées [21].
La première méthode est basée sur la mesure du coefficient de transmission d'une onde ultrasonore [22] à travers une plaque tri-couche immergée dans l'eau. Une étude de l'influence des conditions interfaciales sur l'évaluation des modules élastiques de la couche adhésive entre les deux substrats a été effectuée à la fois de manière numérique (étude de sensibilité) et expérimentale au laboratoire I2M de Bordeaux. Pour cette approche, le modèle comprenait 5 couches: les deux substrats, la colle époxy et les deux interphases entre les substrats et la colle. Une routine d'optimisation *(méthode du simplex)* est utilisée pour évaluer quatre modules élastiques C_{11}, C_{22}, C_{12} *et* C_{66} qui caractérisent la couche adhésive à partir de mesures effectuées pour différents angles d'incidence ($0° \leq \theta \leq 50°$).
En supposant des conditions aux interphases parfaites, les modules mesurés peuvent démontrer la présence d'une anisotropie apparente anormale, révélant la présence d'interphases non parfaites. Ainsi cette méthode permet de différencier un problème de cohésion d'un problème d'adhésion. Si les propriétés élastiques de la couche adhésive sont connues, grâce aux mesures préliminaires effectuées dans le projet ISABEAU, une caractérisation ultrasonore des propriétés mécaniques des interphases est possible.
Une telle caractérisation a été effectuée à I2M sur des assemblages avec 4 traitements de surface différents en ajoutant un assemblage sans sablage mais avec le traitement de silane (DSi100). Deux rigidités longitudinales et transversales sont déduites en supposant que les épaisseurs d'interphase, e_{int}, sont toutes deux égales à 1 µm et que $K_L = C_{11}/e_{int}$ et $K_T = C_{66}/e_{int}$ [23]. Ce modèle de liaison collée peut être schématiser comme sur la figure 2. Les résultats de la rigidité sont présentés dans le tableau 3 pour les quatre traitements de surface.

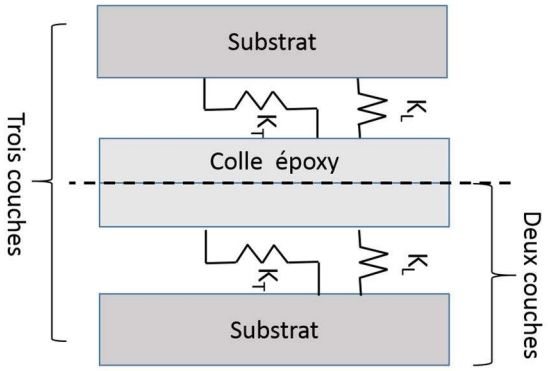


Figure 2. Modèle rhéologique de la liaison collée.

En ce qui concerne les mesures par ondes de Lamb au Laboratoire LOMC du Havre deux échantillons bi-couches ont été conçus, fabriqués avec les mêmes matériaux, et deux traitements de surface ont été appliqués (DSSi100 et D100, voir le tableau 2).

Une étude expérimentale a été menée au LOMC à l'aide d'un transducteur de contact avec une fréquence centrale de 1 MHz placée sur un coin PMMA de 45° degrés agissant comme émetteur et un vibromètre laser agissant comme récepteur. Le déplacement normal de l'onde de propagation a été mesuré pour plusieurs positions à la surface de l'échantillon, dans le sens de propagation, par pas de 0,1 mm. Une double transformée de Fourier rapide (FFT) a été effectuée sur les données espace-temps pour déterminer les courbes de dispersion expérimentales. Le modèle mécanique bi-couche correspond également à un modèle rhéologique avec deux raideurs, K_L, K_T. Un modèle d'éléments finis semi-analytiques (SAFE) a été développé permettant la prédiction des courbes de dispersion à partir de la connaissance des densités de matériaux, des vitesses ultrasonores et des épaisseurs [24]. La comparaison entre les courbes de dispersion expérimentales et théoriques permet d'évaluer les raideurs correspondantes [24]. Les valeurs de rigidité sont données dans le tableau 3 en PentaPascal par mètre (10^{15} Pascal). L'obtention de ces résultats est une première étape dans la caractérisation de la résistance à l'adhérence.

Mesures obtenues en transmission				**Mesures par ondes de Lamb**		
Traitements de surface	K_L(PPa/m)	K_T (PPa/m)		Traitements des surface	K_L(PPa/m)	K_T (PPa/m)
DSSi100	5.86	1.64		DSSi100	10	10
DSi100	4,2	1,5				
DS100	0.21	0.1				
D100	0.10	0.01		D100	0.316	0.316

Tableau 3. Synthèse des raideurs mesurées expérimentalement en fonction des traitements de surface.

EFFETS D'UNE INTERFACE RUGUEUSE SUR LA PROPAGATION DE L'ONDE ACOUSTIQUE HORIZONTALE DE CISAILLEMENT

L'effet de la rugosité de surface à l'interface dans une structure bi-couche collée a fait aussi l'objet de travaux au laboratoire LAUM dans le projet ISABEAU. Une contribution analytique a été proposée dans le cas des ondes guidées par cisaillement (SH) [26]. L'épaisseur de la couche de liaison est supposée non négligeable et les interfaces entre cette couche et les plaques sont considérées comme rugueuses, avec des formes complexes et des profils de rugosité. La hauteur moyenne de rugosité est supposée petite devant les épaisseurs des plaques collées. Les changements induits par la rugosité dans les caractéristiques des champs créés par une source harmonique établie au bord d'entrée de la structure sont obtenus en utilisant le calcul 2D des déplacements et des perturbations de contraintes. La base de l'approche théorique est la formulation intégrale qui a été développée précédemment [27] pour la propagation des ondes SH le long de la surface d'une plaque de surface rugueuse. La rugosité implique une modification des modes SH dans le guide d'ondes. Le comportement du champ acoustique est présenté principalement en termes de couplage de modes SH à la fois à l'intérieur de chaque plaque et entre les plaques à travers la couche de colle.

Le comportement de la colle est exprimé en utilisant le modèle classique avec une rigidité de type ressort. Si un mode de propagation rentre dans une zone rugueuse le modèle peut prédire comment l'énergie se divise en plusieurs modes de propagation ou en mode rétro-propagatif. Une autre possibilité intéressante de cette modélisation est la prédiction des effets de phonons en raison de la périodicité spatiale de la rugosité. Une démonstration expérimentale a été effectuée au LOMC avec un profil périodique en dents de scie. Les paramètres ont été réglés sur un pas de rugosité de 3,7 mm pour une longueur totale de 37 mm, et la hauteur de la rugosité était de 0,1 mm. L'ensemble tri-couche était composé de deux adhérents en aluminium (5 mm d'épaisseur) et la couche de liaison était une colle Araldite d'une épaisseur de 0,5 mm. La fréquence de travail a été réglée à 480 KHz. Le champ incident SH0 (nombre d'onde SH0 incident est de 958 m^{-1}. Le mode de phonon rétro-propagatif (mode SH2) mesuré a un nombre d'onde égal à 738m^{-1}. Compte tenu des résultats expérimentaux sur le même profil en dents de scie, l'énergie des ondes est répartie dans un domaine plus vaste dans le plan nombre d'onde - fréquence, mais les résultats confirment la relation de phonon. Des études sont effectuées pour évaluer l'énergie transmise à travers le profil brut en fonction des paramètres de rugosité et de la fréquence d'ondes SH incidentes [28].

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le projet ISABEAU a répondu à ses objectifs pour proposer des échantillons collés de référence afin de développer des méthodes innovantes de contrôle non destructif par ultrasons. Les difficultés ont été surmontées pour obtenir des éprouvettes qualifiées avec plusieurs niveaux d'adhésions. Les joints collés ne devaient présenter absolument aucun défaut afin de certifier la qualité des études non destructives qui suivaient. Le challenge a été relevé de proposer aussi de nombreuses géométries avec le même système adhésif car plusieurs modes de propagation des ondes ultrasonores ont été utilisés: les ondes de volumes, les ondes de Lamb, les ondes de cisaillement SH.
Les travaux ont montré que l'utilisation d'un modèle rhéologique de type ressort est la meilleure voie pour analyser les variations d'adhésions par des mesures ultrasonores. La mesure des raideurs K_L et K_T permettent d'obtenir une grandeur physique en lien avec un niveau d'adhésion évalué plus classiquement par des essais mécaniques destructifs.
Des expériences plus récentes à I2M sur les grandes éprouvettes à simple recouvrement pour les traitements de surface DS80 et DSi80 ont donné des valeurs cohérentes pour les raideurs K_L et K_T mesurées pour les autres traitements. Le sablage a été supprimé pour éviter les trop grandes déformations des substrats [29]. Ces résultats confirment la validité de la démarche générale. Il sera possible de terminer la réticulation de ces assemblages et d'obtenir aussi des résultats pour des traitements DS100 et DSi100.
D'autres expériences récentes au LOMC ont prolongé les résultats obtenus sur les bi-couches par des résultats sur des assemblages tri-couches. Un assemblage a été obtenu de plus faible adhésion en remplaçant le silane par du silicone. La valeur de la raideur chute à 0,001 PPa, cette interface peut être considérée comme un Kissing Bond [30].

Dans la dernière étape de ce projet, des assemblages de type Kissing Bonds ont été également fabriqués en ajoutant une fine couche d'agent démoulant. Une très fine couche est indispensable pour rendre indétectable les Kissing Bonds par un contrôle ultrasonore en transmission. Un assemblage de ce type a été aussi obtenu avec des substrats en Titane (collaboration avec Safran). Les mesures ultrasonores sont en cours pour ce type de défaut cette fois ci localisé. L'acoustique non linéaire et des mesures ultrasonores à plus forte énergie font partie des candidats à mettre en œuvre pour ce type de défaut de collage.

References

[1] Galy J., Moysan J., El Mahi A., Ylla N., Massacret N., Controlled reduced-strength epoxy-aluminium joints validated by ultrasonic and mechanical measurements, International Journal of Adhesion & Adhesives 72 (2017) 139–146

[2] Michel D. Bode, Michael J Holle, and David Westlund, Literature Review of Weak Adhesive Bond Fabrication and Nondestructive Inspection for Strength Measurement, DOT/FAA/TC-14/39, Federal Aviation Administration, William J. Hughes Technical Center, Aviation Research Division, Atlantic City International Airport, New Jersey 08405, August 2015

[3] Adams, R. D., Adhesive bonding: Science, technology and applications, Wood head Publishing Ltd., University of Bristol, UK, 2005.

[4] Guyott, C. C. H., Cawley, P., and Adams, R. D., The Non-destructive Testing of Adhesively Bonded Structure: A Review, J. Adhes. 20, 129–189 ,1986.

[5] Michaloudaki, M., Lehmann, E., and Kosteas, D., Neutron imaging as a tool for the non-destructive evaluation of adhesive joints in aluminium, J. Adhes. Adhes. 25, 257–267, 2005

[6] J Galy, N Ylla, J Moysan, A El Mahi. Evaluation of the level of adhesion in epoxy-aluminum joints combining mechanical and NDT measurements. Thermosets 2015, 16-18 September 2015, Berlin (D)

[7] E. Siryabe, M. Renier, A. Meziane, M. Castaings, The transmission of Lamb waves across adhesively bonded lap joints to evaluate interfacial adhesive properties. Physics Procedia 70, 541-544, 2015.

[8] E. Siryabe, M. Renier, A. Meziane, J. Galy, M. Castaings, Characterization of cohesive and adhesive properties of adhesive bonds using transmitted ultrasonic plane waves. To be published in Review of Progress in Quant. NDE Evaluation, Ed. Thompson D.O. and Chimenti D.E., Plenum Press, New York, Minneapolis, USA, 2015.

[9] E. Siryabe, M. Renier, A. Meziane, J. Galy, M. Castaings, Ultrasonic characterization of cohesive and adhesive properties of adhesive bonds, ASA, November, 2015

[10] C. Gauthier, D. Leduc, J. Galy, M. Echcherif Elkettani and J.-L. Izbicki, Discrimination of Curing Epoxy by High Lamb Modes Order, Physics Procedia, Volume 70, 300-304, 2015

[11] C. Potel, M. Bruneau, L. C. Foze N'Djomo, D. Leduc, M. Echcherif Elkettani, J.L. Izbicki Shear horizontal acoustic waves propagating along two isotropic solid plates bonded with a non-dissipative adhesive layer: Effects of the rough interfaces, Journal of Applied Physics 118, 224904, 2015; doi: 10.1063/1.4937150

[12] Smith, N. R., Kollgaard, J. R., and Dickinson, L., Pitch-Catch (Low, frequency) Bontesters, SAMPE J. 47, 25–31, 2011.

[13] Vijaya Kumar, R. L., Bhat, M. R., Murthy, C. R. L., Some studies on evaluation of degradation in composite adhesive joints using ultrasonic techniques Ultrasonics 53, 1150–1162, 2013.
[14] Challis, R. E., Holmes, A. K., Tebbutt, J. S., and Cocker, R. P., Scattering of ultrasonic compression waves by particulate filler in a cured epoxy continuum, J. Acoust. Soc. Am. 103, 1413–1420, 1998.
[15] May, M., Wang, H. M., Akid, R., Effects of the addition of inorganic nanoparticles on the adhesive strength of a hybrid sol–gel epoxy system, Int. J. Adhes. Adhes. 30, 505–512, 2010.
[16] da Silva, L. F. M., Carbas, R. J. C., Critchlow, G. W., Figueiredo, M. A. V., and Brown, K., Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints, Int. J. Adhes. Adhes. 29, 621–632, 2009
[17] Baldan, A., Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymersand composite materials: adhesives, adhesion theories and surface pretreatment, J. Mater. Sci. 39, 1–49, 2004
[18] Jastrzebski, M. U., Sinclair, A. N., Raizenne, D. D., and Spelt, J. K., Development of adhesive bonds with reduced fracture strength as NDE benchmarks, Int. J. Adhes. Adhes. 29, 372–379, 2009
[19] Brotherhood, C. J., and Drinkwater, B. W., Dixon, S., The detectability of kissing bonds in adhesive joints using ultrasonic techniques, Ultrasonics 41, 521–529, 2003
[20] A.Baudot, J. Moysan, C. Payan, N. Ylla, J. Galy, B. Verneret, A. Baillard, Improving Adhesion Strength Analysis by the Combination of Ultrasonic and Mechanical Tests on Single-Lap Joints, The Journal of Adhesion, 90:5-6, 555-568, 2014, DOI: 10.1080/00218464.2013.868806
[21] V. Vlasie, S. de Barros, M. Rousseau, L. Champaney, Ultrasonic rheological model of cohesive and adhesive zones in aluminum joints: validation by mechanical tests ,Arch Appl Mech, 75: 220–234, 2006, DOI 10.1007/s00419-005-0401-x,
[22] M. Castaings, B Hosten, T Kundu, Inversion of ultrasonic, plane-wave transmission data in composite plates to infer viscoelastic material properties, NDT&E 33, 377–392, 2000
[23] E. Siryabe, M. Rénier, A. Meziane, J. Galy, M. Castaings, Characterization of Cohesive and Adhesive Properties of Adhesive Bonds Using Transmitted Ultrasonic Waves, WCNDT 2016, Münich, 13-17 June 2016
[24] A. Marzani, E. Viola, I. Bartoli, L. d. Scaela and P. Rizzo, "A semi-analytical finite element formulation for modeling stress wave propagation in axisymmetric damped waveguides," J. Sound Vib., vol. 318, pp. 488-505, 2008
[25] C. Gauthier, M. Ech Cherif El Kettani, J. Galy, D. Leduc, M. Predoi, J.-L. Izbicki, Discrimination of Different Levels of Adhesion in a Bi Layer Aluminum/Epoxy Structure Using Lamb Waves, WCNDT 2016, Münich, 13-17 June 2016
[26] Catherine Potel, Michel Bruneau, Ludovic C. Foze N'Djomo, Damien Leduc, Mounsif Echcherif Elkettani, and Jean-Louis Izbicki Shear horizontal acoustic waves propagating along two isotropic solid plates bonded with a non-dissipative adhesive layer: Effects of the rough interfaces, Journal of Applied Physics 118, 224904 , 2015; doi: 10.1063/1.4937150
[27] T. Valier-Brasier, C. Potel, and M. Bruneau, “Modes coupling of shear acoustic waves polarized along a one-dimensional corrugation on the surfaces of an isotropic solid plate,” Appl. Phys. Lett. 93, 164101, 2008

[28] Ludovic N'Djomo Cardin Foze, thèse de doctorat Université du Maine, Analyse acoustique et physico-chimique du couplage de solides élastiques : Etude de l'adhésion dans les collages structuraux, 16 juillet 2015
[29] Emmanuel Syriabe, thèse de doctorat Université de Bordeaux, Évaluation non destructive par ultrasons de l'adhésion aux interfaces de joints collés, 13 décembre 2016
[30].Camille Gauthier, thèse de doctorat Université du Havre, Analyse acoustique et physico-chimique du couplage de solides élastiques : Etude de l'adhésion dans les collages structuraux, 8 décembre 2016