



Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
Eprints ID: 8848

To link to this article : <http://www.editocom.com/>

To cite this version:

Péronnet, Elodie and Eyma, Florent and Pastor, Marie-Laetitia and Weleman, Hélène *Caractérisation et comparaison des limites de détection de techniques de contrôle non destructif : méthodes ultrasonores et méthodes optiques*. (2011) Contrôles-Essais-Mesures, Vol. 37 . pp. 63-68. ISSN 1637-4657

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator:
staff-oatao@inp-toulouse.fr

Caractérisation et comparaison des limites de détection de techniques de contrôle non destructif : méthodes ultrasonores et méthodes optiques

E. Péronnet^{(1) (3) 1}, *F. Eyma*⁽²⁾, *M-L Pastor*⁽²⁾, *H. Weleman*⁽¹⁾

*(1) PRES Université de Toulouse, INP, ENIT-LGP
Av. Azereix, BP1629, 65016 Tarbes Cedex*

*(2) PRES Université de Toulouse, UT3, IUT-ICA
1, rue Lautréamont, BP 1624, 65016 Tarbes Cedex*

*(3) DAHER SOCATA
Aéroport Tarbes-Lourdes 65290 LOUEY*

1. Introduction

Le contexte de ce travail concerne le process d'Infusion de Résine Liquide (LRI) développé dans le cadre du projet « FUSelage COMPOSITE » par DAHER SOCATA. Ce process de fabrication permet de réaliser des pièces de formes complexes et des panneaux entiers de fuselage en composites, ce qui réduit considérablement les étapes d'assemblages et donc les temps de production.

Le but de ce travail est de caractériser et comparer plusieurs méthodes de contrôle sans contact, applicables aux structures réalisées en LRI, telles que les méthodes ultrasonores disponibles au laboratoire IUT-ICA et les méthodes optiques disponibles au laboratoire ENIT-LGP. Il s'agira de déterminer leurs limites de détection, leurs complémentarités et leurs champs d'applications spécifiques. Les premières méthodes testées seront les techniques ultrasonores imposées par les standards AITM dans l'aéronautique. Les différents tests sont réalisés sur des éprouvettes composites monolithiques et sandwichs, caractéristiques des éléments que l'on peut trouver sur un fuselage, en LRI et préimprégné, comportant différents types de défauts.

Pour chaque technique, nous nous sommes focalisés sur les deux points suivants dans l'exploitation des résultats :

- ✓ Définir les limites de détection des défauts (taille, localisation dans l'épaisseur), dans le but de connaître les limites des équipements par rapport à la taille critique des défauts (déterminée par les règles de l'aéronautique),
- ✓ Préciser les champs d'applications spécifiques pour chaque technique (pour différents process, différents types de défauts, différentes formes d'éprouvettes).

2. Les différentes techniques utilisées

Dans ces travaux nous avons utilisé deux types de méthodes de contrôle non destructif : des méthodes ultrasonores et des méthodes optiques. Le contrôle ultrasonore est le contrôle non destructif le plus utilisé et le plus performant sur les composites dans l'aéronautique [1]. Le but de cette étude est justement de comparer les résultats et performances obtenus par ce type de contrôle vis-à-vis de ceux obtenus à partir des techniques de thermographie infrarouge.

a. Contrôles ultrasonores

Dans les contrôles ultrasonores, nous avons testé trois techniques : l'écho ultrasonore par immersion, la transmission ultrasonore par immersion et la transmission ultrasonore dans l'air.

Concernant les 2 techniques par immersion, il s'agit de tests automatiques dans une cuve remplie d'eau. L'immersion totale de l'éprouvette et des capteurs assure une liaison acoustique constante et parfaite tout au long du test. Pour le test par écho ultrason, un seul capteur est utilisé (émetteur et récepteur). Le test par transmission nécessite deux capteurs, un émetteur et un récepteur de part et

¹ e-mail : elodie.peronnet@enit.fr

d'autre de la pièce inspectée [2]. La visualisation des résultats la plus utilisée est une cartographie des défauts en vue de dessus (vue C-Scan) [3].

Concernant la technique de transmission couplée par l'air, il s'agit du même principe que la transmission ultrasonore par immersion excepté que l'agent couplant est l'air [4].

Dans notre étude, le matériel utilisé est le suivant :

- ✓ L'Omniscan permettant d'enregistrer et d'analyser les ondes ultrasonores à hautes fréquences (fournisseur : OLYMPUS)
- ✓ Pour l'écho ultrasonore, un transducteur multiélément de 64 éléments de fréquence 5 MHz
- ✓ Pour la transmission ultrasonore par immersion, 2 mono-éléments de fréquence 2,25 MHz
- ✓ Pour la transmission ultrasonore dans l'air, 2 mono-éléments de fréquence 400 kHz

b. Contrôle par thermographie infrarouge

Le principe de la thermographie infrarouge active est l'envoi d'un flux thermique par des lampes halogènes sur une face de la pièce inspectée pendant une durée qui dépend de l'épaisseur du matériau, du type de matériau et de son émissivité. Le champ de température au sein de l'éprouvette est mesuré en surface à l'aide d'une caméra infrarouge [5]. Il existe deux configurations de test, le travail en réflexion et en transmission (Cf. figure 1) [6].

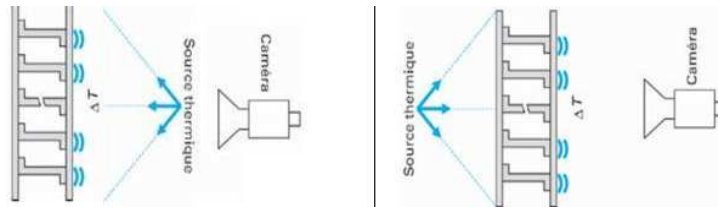


Figure 1 : Thermographie infrarouge par réflexion (à gauche) et par transmission (à droite)

La visualisation des résultats est une cartographie thermique. Cette technique ne permet pas la localisation directe du défaut dans l'épaisseur de la pièce mais peut s'obtenir par post traitements des résultats en utilisant notamment la transformation de Fourier rapide (FFT) [5, 7]. Notons que cette méthode s'avère davantage adaptée à la détection de défauts sur de fines épaisseurs [6].

Dans notre étude, le matériel utilisé est le suivant :

- ✓ 2 halogènes 230V 1000W
- ✓ Un amplificateur de signal (fournisseur : PULSAR)
- ✓ Une caméra infrarouge (fournisseur : FLIR)
- ✓ Logiciel ALTAIR

3. Résultats expérimentaux

Dans le but de déterminer les limites de détection et les champs d'applications spécifiques pour chaque technique, nous avons utilisé les quatre éprouvettes suivantes :

- ✓ Une éprouvette monolithique avec des inserts Téflon ;
- ✓ Une éprouvette monolithique avec des trous à fonds plats ;
- ✓ Une éprouvette sandwich ayant des peaux de 0,66 mm d'épaisseur avec inserts Téflon ;
- ✓ Une éprouvette sandwich ayant des peaux de 1,08 mm d'épaisseur avec inserts Téflon.

Les défauts artificiels utilisés dans ces éprouvettes sont soit des inserts Téflons qui simulent du délaminage, soit des trous à fonds plats qui simulent des porosités. Ce sont deux types de défauts prépondérants et critiques dans les pièces en composites [8]. En ce qui concerne leur taille, on se place dans le cadre des exigences de l'aéronautique, à savoir que les techniques de contrôle doivent identifier des défauts d'au moins 6 mm de diamètre. Ceci dit, afin d'aller plus loin dans l'analyse de leurs performances, des défauts de 4 mm voire 3 mm de diamètre ont également été insérés.

Les résultats des techniques utilisées sont visualisés sous la forme d'une cartographie des défauts en vue de dessus (Cf. figure 2).

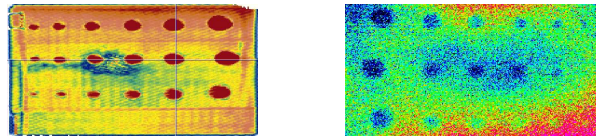


Figure 2 : C-scan ultrasonore (à gauche) et cartographie thermique (à droite)

Pour chaque éprouvette, nous avons analysé les erreurs de mesure de chaque technique. Cette erreur de mesure est la différence entre la valeur mesurée et la taille réelle connue du défaut. Dans chaque graphique, le « ND » (=Non Détecté) dans l'échelle des erreurs de mesure signifie que le défaut n'a pas été détecté.

a. Eprouvette monolithique avec inserts Téflon

Cette éprouvette monolithique en préimprégné (Cf. figure 3) est constituée de 18 inserts téflons de différents diamètres situés à différentes profondeurs (Cf. figure 4).



Figure 3 : Plaque monolithique

| N° des défauts | Epaisseur | Diamètre |
|----------------|-----------|----------|
| 1 | 2,1 | 15 |
| 2 | 2,1 | 12 |
| 3 | 2,1 | 10 |
| 4 | 2,1 | 8 |
| 5 | 2,1 | 6 |
| 6 | 2,1 | 4 |
| 7 | 1,4 | 15 |
| 8 | 1,4 | 12 |
| 9 | 1,4 | 10 |
| 10 | 1,4 | 8 |
| 11 | 1,4 | 6 |
| 12 | 1,4 | 4 |
| 13 | 0,7 | 15 |
| 14 | 0,7 | 12 |
| 15 | 0,7 | 10 |
| 16 | 0,7 | 8 |
| 17 | 0,7 | 6 |
| 18 | 0,7 | 4 |

Figure 4 : Localisation des défauts

D'après la figure 5, seule la technique d'écho ultrasonore par immersion détecte la totalité des défauts. Il s'agit donc de la méthode la plus efficace sur cette éprouvette parmi les cinq testées. En termes de précision de détection, si l'on exclut les défauts non détectés, la méthode la plus précise est en revanche la thermographie par transmission avec une erreur de mesure de 0,1 mm sur la quasi-totalité des défauts détectés.

De plus, on note globalement que les plus mauvais résultats sont concentrés à la profondeur de 1,4 mm, soit la profondeur médiane de l'éprouvette. Le défaut est donc à mi-chemin de la surface de détection et de la surface de fond de l'éprouvette. De ce fait, les phénomènes de dispersion d'ondes, probablement dus à un problème de fabrication, sont amplifiés et donc le pouvoir de détection est d'autant plus diminué. A contrario, les meilleurs résultats sont obtenus à 0,7 mm de profondeur, au plus proche de la surface de détection.

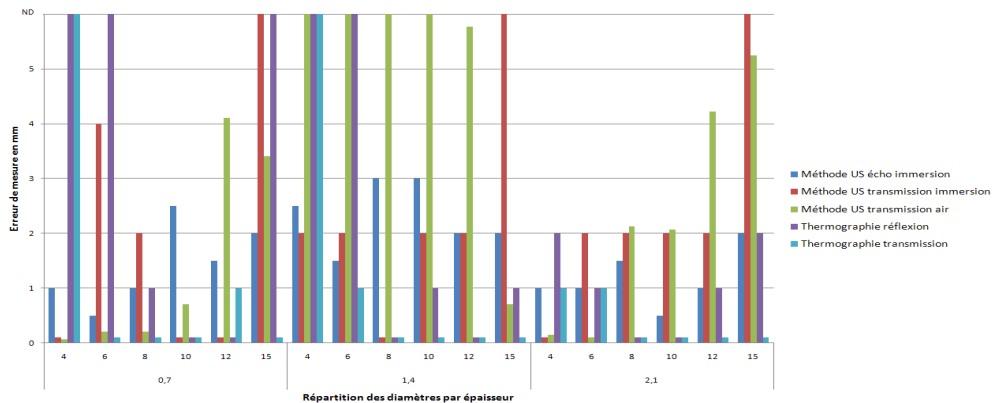


Figure 5 : Récapitulatif des erreurs de mesure par technique pour chaque défaut

b. Eprouvette monolithique avec des trous à fonds plats

Cette éprouvette monolithique en préimprégné à épaisseur variable (Cf. figure 6) est constituée de 15 trous à fonds plats de diamètres différents à différentes profondeurs (Cf. figure 7).

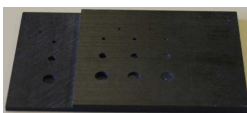


Figure 6 : Plaque monolithique

| N° des défauts | Epaisseur | Diamètre |
|----------------|-----------|----------|
| 1 | 7,48 | 10 |
| 2 | 7,48 | 6 |
| 3 | 7,48 | 3 |
| 4 | 7,48 | 2 |
| 5 | 5,2 | 10 |
| 6 | 5,2 | 6 |
| 7 | 5,2 | 3 |
| 8 | 5,2 | 2 |
| 9 | 2,8 | 10 |
| 10 | 2,8 | 6 |
| 11 | 2,8 | 3 |
| 12 | 1 | 2 |
| 13 | 0,52 | 10 |
| 14 | 0,52 | 6 |
| 15 | 0,52 | 3 |

Figure 7 : Localisation des défauts

Dans le graphique ci-dessous (Cf. figure 8), seule la méthode d'écho ultrasonore par immersion détecte la totalité des défauts présents dans cette éprouvette. Comme pour la précédente éprouvette, c'est la technique la plus efficace. Notons que la transmission ultrasonore couplée à l'air est complètement inappropriée puisqu'elle ne détecte aucun défaut. De plus on observe que, hormis la technique d'écho ultrasonore par immersion, toutes les autres méthodes sont moins efficaces que pour l'éprouvette précédente car plus la profondeur des défauts augmente et plus la taille des défauts diminue, plus le nombre de défauts non détectés augmente. Ces 4 techniques atteignent leurs limites de détection à partir de 5,2 mm de profondeur où elles deviennent incapables de détecter les défauts (Cf. figure 8).

Concernant la précision de détection, deux méthodes sont très proches en termes de performances pour des mesures de diamètres de 6 à 10 mm et des profondeurs de détection de 0,52 à 5,2 mm : il y a l'écho ultrasonore par immersion avec une valeur moyenne de 0,50 mm d'erreur de mesure et la thermographie par transmission avec une valeur moyenne de 0,57 mm d'erreur de mesure.

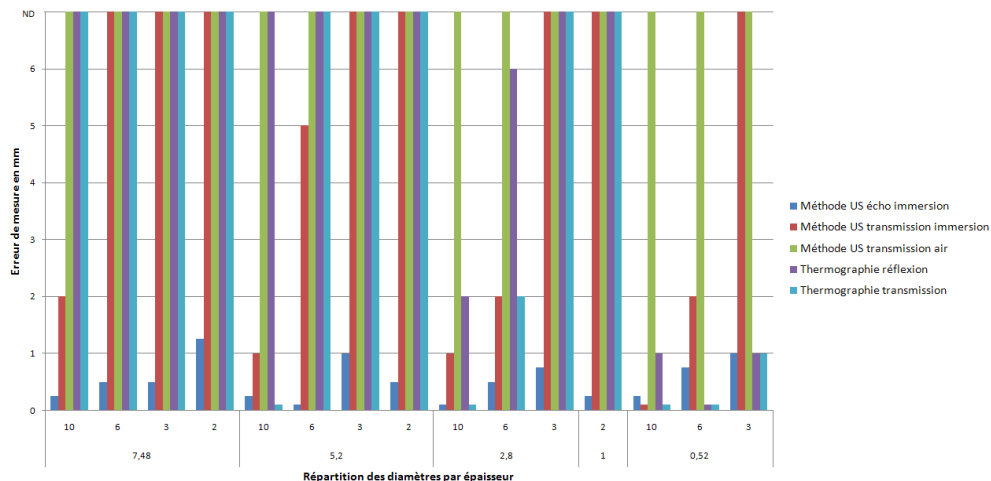


Figure 8 : Récapitulatif des erreurs de mesure par technique pour chaque défaut

c. Eprouvette sandwich ayant des peaux de 0,66 mm d'épaisseur avec inserts Téflon

Cette éprouvette sandwich d'épaisseur de peaux 0,66 mm en préimprégné (Cf. figure 9) est constituée de 18 inserts téflons de différents diamètres situés à différentes profondeurs du coté tissu d'arrachage (Cf. figure 10).



Figure 9 : Plaque sandwich

| N° des défauts | Epaisseur | Diamètre |
|----------------|-----------|----------|
| 1 | 0,66 | 6 |
| 2 | 0,66 | 6 |
| 3 | 0,66 | 6 |
| 4 | 0,66 | 3 |
| 5 | 0,66 | 3 |
| 6 | 0,66 | 3 |
| 7 | 0,44 | 3 |
| 8 | 0,44 | 3 |
| 9 | 0,44 | 3 |
| 10 | 0,44 | 3 |
| 11 | 0,44 | 3 |
| 12 | 0,44 | 3 |
| 13 | 0,22 | 6 |
| 14 | 0,22 | 6 |
| 15 | 0,22 | 6 |
| 16 | 0,22 | 6 |
| 17 | 0,22 | 6 |
| 18 | 0,22 | 6 |

Figure 10 : Localisation des défauts

La figure 11 démontre que les méthodes ultrasonores sont inadaptées à ce type de matériau. En ce qui concerne les 3 techniques par transmission, cela s'explique par le fait que l'âme du sandwich est en mousse qui est un isolant à la fois thermique et acoustique. Concernant l'écho ultrasonore, il s'agit d'une méthode par réflexion. Etant donnée la finesse de la peau (0,66 mm), l'écho de défaut de l'onde ultrasonore est confondu soit avec l'écho d'entrée soit avec l'écho de fond. De ce fait, les signaux sont très bruités et cela devient impossible de distinguer l'écho de défaut des autres échos.

Seule donc la thermographie par réflexion semble adaptée à cette éprouvette. Néanmoins, il faut signaler la faible précision des résultats liée en grande partie à une saturation thermique très rapide de la surface de détection lors de l'essai.

D'après les résultats expérimentaux, la détection de défauts au sein de peaux ayant des épaisseurs inférieures à 1 mm est très difficile et, d'autant plus, lorsqu'il s'agit d'une structure

sandwich avec âme en mousse et avec une surface de détection qui ne soit pas lisse et plane comme pour la présente éprouvette.

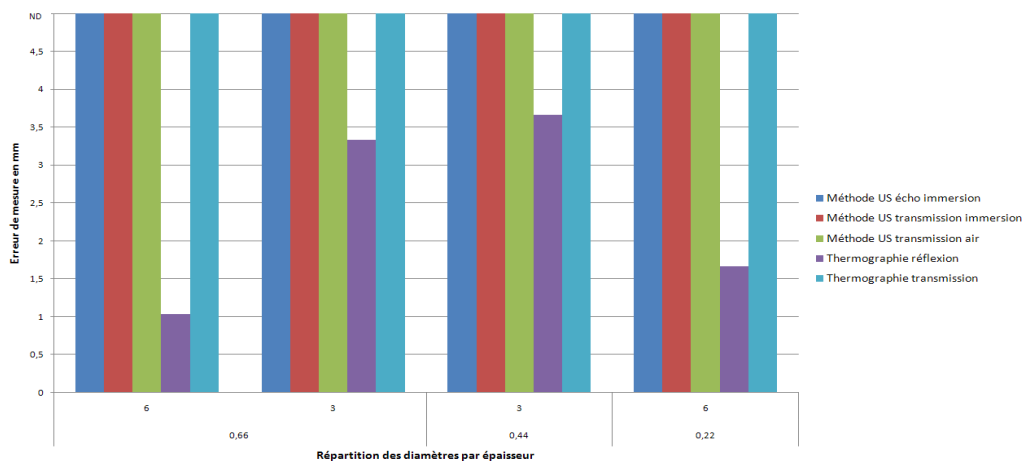


Figure 11 : Récapitulatif des erreurs de mesure par technique pour chaque défaut

d. Eprouvette sandwich ayant des peaux de 1,08 mm d'épaisseur avec inserts Téflon

Cette éprouvette sandwich d'épaisseur de peaux 1,08 mm en LRI (Cf. figure 13) est constituée de 6 inserts téflons de différents diamètres à différentes profondeurs du coté moule (Cf. figure 14).



Figure 13 : Plaque sandwich

| N° des défauts | Epaisseur | Diamètre |
|----------------|-----------|----------|
| 1 | 1,08 | 6 |
| 2 | 0,72 | 6 |
| 3 | 0,36 | 6 |
| 4 | 1,08 | 3 |
| 5 | 0,72 | 3 |
| 6 | 0,36 | 3 |

Figure 14 : Localisation des défauts

Comme le montre le graphique 15, nous retrouvons les mêmes écueils des techniques par transmission dans le cas de structure sandwich. La structure présentant une surface lisse et des défauts à contrôler sur des épaisseurs supérieures à 1 mm, la technique d'écho ultrasonore par immersion fonctionne bien avec une identification de la totalité des défauts. En termes de précision, on observe néanmoins que les résultats obtenus par cette technique sont beaucoup plus précis pour les défauts de 6 mm de diamètres que pour ceux de 3 mm. Dans la gamme d'exigences aéronautiques, la thermographie par réflexion conduit quant à elle à des résultats très précis avec une erreur de mesure de 0,1 mm pour la totalité des défauts (Cf. figure 15).

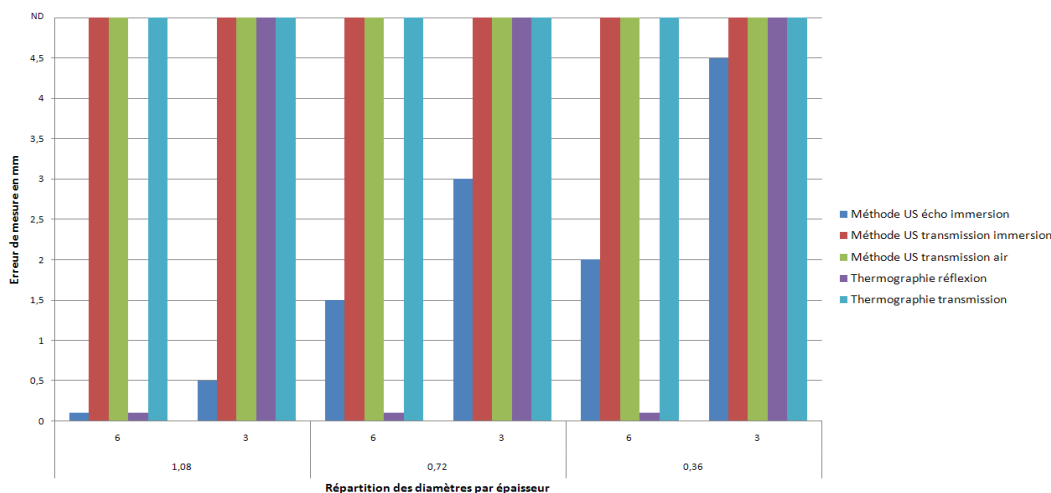


Figure 15 : Récapitulatif des erreurs de mesure par technique pour chaque défaut

4. Conclusion

Cette étude avait pour objectif la comparaison de différentes techniques ultrasonores et optiques pour la localisation de défauts existants au sein de diverses structures composites. Au vu des performances mesurées, ce travail permet de proposer une procédure de contrôle non destructif pour l'aéronautique. Elle suggère en premier lieu d'utiliser d'abord une technique de thermographie infrarouge pour obtenir une visualisation globale des défauts sur la totalité d'une structure et d'employer ensuite localement sur des zones endommagées une technique ultrasonore pour une analyse plus fine. En effet, la thermographie infrarouge permet de repérer des défauts dans le plan, alors que les ultrasons sont plus adaptés pour localiser ceux-ci dans l'épaisseur du matériau.

Concernant les structures monolithiques, nos résultats montrent que l'écho ultrasonore par immersion et la thermographie infrarouge par transmission sont parfaitement adaptées. Pour les structures sandwichs, la problématique consiste surtout à être capable de contrôler des peaux fines. D'après les résultats obtenus dans cette étude, seules les méthodes fonctionnant sur le principe de la réflexion (écho ultrasonore par immersion et thermographie par réflexion) sont adaptées à ce type de structures. Lorsque l'on est en présence de peaux d'épaisseur inférieure à 1 mm et présentant un mauvais état de surface, seule la thermographie par réflexion est efficace.

Si ces premiers résultats sont encourageants, certaines questions restent ouvertes telles que la détection de défauts dans des structures complexes comme les têtes de clous ou les pieds d'omégas. A cette fin, des techniques complémentaires telles que la radiographie, la tomographie ou encore d'autres méthodes optiques seront testées dans une prochaine étape.

5. Bibliographie

1. R D Adams, B. W. Drinkwater, « Nondestructive testing of adhesively-bonded joints », NDT & E International, Vol. 30, n° 2, pp. 93-98, 1997
2. Y. Bar-Cohen, A. K. Mal, C. J. Hellier, W. Plumstead, K. Fowler, R. Grills, G. Anderews, M. C. Tsao, J. J. Snyder, J. F. Cook, D. A. Aldrich, R. W. Pepper, « Non destructive evaluation and quality control », ASM International, chapter Ultrasonic Inspection, Vol 17, pp. 231-277, 1996
3. J. Perdijon, « Le contrôle non destructif par ultrasons », Ed Hermès, 1993
4. E. Robert, Jr.Green, « Non-contact ultrasonic techniques », Ultrasonics, Vol 42, pp 9–16, 2004
5. C. Ibarra Castanedo, « Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography : depth retrieval with the phase », thesis, University of Laval, 2005
6. Y. Bar-Cohen, A. K. Mal, C. J. Hellier, W. Plumstead, K. Fowler, R. Grills, G. Anderews, M. C. Tsao, J. J. Snyder, J. F. Cook, D. A. Aldrich, R. W. Pepper, ASM International, « Non destructive evaluation and quality control », chapter Thermal Inspection, Vol 17, pp. 397-404, 1996.
7. S. Guibert, « La thermographie infrarouge à détection synchrone appliquée aux matériaux composites », mémoire, Université de Laval, 2007
8. Y. Boyer, « Caractérisation de la porosité de composite carbone-résine minces par l'étude de la réflexion des ondes ultrasonores », Thèse de l'université de technologie de Compiègne, 1993