



HAL
open science

Réseaux de sources pour le contrôle non destructif par ultrasons-laser

Maha Karam, Meriem Chrifi Alaoui, Frédéric Jenot, Rabih Tauk, Mohammadi Ouafrouh, Jihane Jabbour, Marc Duquennoy, Charbel Zgheib, Michel Kazan, Jamal Assaad

► **To cite this version:**

Maha Karam, Meriem Chrifi Alaoui, Frédéric Jenot, Rabih Tauk, Mohammadi Ouafrouh, et al.. Réseaux de sources pour le contrôle non destructif par ultrasons-laser. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. hal-03813746v1

HAL Id: hal-03813746

<https://hal.science/hal-03813746v1>

Submitted on 10 Nov 2022 (v1), last revised 13 Oct 2022 (v2)

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.



16^{ème} Congrès Français d'Acoustique
11-15 Avril 2022, Marseille

Réseaux de sources pour le Contrôle Non Destructif par Ultrasons- Laser

M. Karam^{a,b}, M. Chrifi Alaoui^a, F. Jenot^a, R. Tauk^b, M. Ouafitouh^a, J. Jabbour^b, M. Duquennoy^a, C. Zgheib^c, M. Kazan^d, J. Assad^a

^a Univ. Polytechnique Hauts-de-France, Univ. Lille, CNRS, UMR 8520 - IEMN - Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie, F-59313 Valenciennes, France

^b Université Libanaise, Fanar, Liban

^c Université Notre Dame, Louaizé, Liban

^d Université Américaine de Beyrouth AUB, Beyrouth, Liban

Meriem.chrifialaoui@uphf.fr



La génération et la détection d'ondes acoustiques par sources laser ont largement été exploitées ces dernières années pour le Contrôle Non Destructif sans contact de nombreuses structures comme celles intervenant dans le domaine du transport. Dans ce cadre, l'utilisation d'ondes de Rayleigh permet notamment la localisation et la caractérisation de défauts pouvant nuire au bon fonctionnement de nombreux systèmes. Généralement, une seule source thermoélastique est utilisée afin d'étudier l'interaction ondes de surface-défauts. Dans ce travail, nous considérons plusieurs sources séparées spatialement afin d'exciter simultanément différentes ondes de Rayleigh. Pour cela, un laser impulsif Nd:YAG doublé en fréquence et plusieurs dispositifs optiques sont mis en œuvre. Par ailleurs, la détection des ondes ultrasonores est effectuée à l'aide d'une sonde interférométrique hétérodyne de type Mach-Zehnder. L'échantillon étudié consiste en un bloc d'aluminium présentant un défaut débouchant de forme circulaire. Les résultats obtenus à partir des différentes configurations expérimentales sont d'abord présentés puis comparés afin de déterminer les avantages de chacune d'entre elles pour le Contrôle Non Destructif de la structure concernée.

1. Introduction

La méthode de contrôle non destructif par Ultrasons – Laser, par laquelle les ondes acoustiques sont générées et détectées optiquement, présente notamment l'avantage d'être sans contact. Elle permet l'étude de structures ayant des géométries complexes et la détection des défauts surfaciques et internes des matériaux métalliques ou plastiques [1] [2]. Le laser impulsif Nd:YAG est souvent utilisé dans ce cadre pour exciter ces ondes en mode thermoélastique ou ablation [3].

Dans un solide isotrope, homogène et semi-infini une onde acoustique de surface, décrite pour la première fois par Lord Rayleigh [4], peut se propager. Cette onde de Rayleigh, possède une polarisation elliptique et se propage avec une amplitude exponentiellement décroissante de la surface vers la profondeur du solide. En général, les effets de l'onde de Rayleigh s'étendent sur une profondeur de l'ordre de la longueur d'onde [5].

Dans la plupart des applications concernant les Ultrasons-Laser, l'onde de Rayleigh est générée par une source ligne thermoélastique pour la caractérisation des matériaux et la détection des défauts [5], [6]. Dans ce travail, nous nous intéressons à la génération simultanée de plusieurs ondes de Rayleigh pour le contrôle non destructif des structures. Un dispositif expérimental permettant l'obtention de plusieurs sources linéiques est mis en œuvre.

Cet article comporte principalement deux parties. Dans la première partie nous décrivons d'une manière générale le principe de base de la génération multi-sources. Nous déterminons théoriquement la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh dans l'aluminium et nous précisons la directivité de celle-ci pour une source ligne. Ensuite, dans la seconde partie nous présentons une étude expérimentale pour la mesure de la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh dans le cas d'une source linéique et celui de plusieurs sources de ce type. Par la suite, certaines dimensions de l'échantillon sont obtenues ainsi que la localisation approximative d'un défaut.

2. Génération de plusieurs sources ultrasonores

Dans cette partie, nous décrivons de manière générale les phénomènes de base utilisés pour l'obtention de plusieurs sources ultrasonores. Nous déterminons théoriquement les distances séparant les différentes sources, la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh dans un matériau ainsi que la directivité de cette onde.

2.1 Mise en œuvre d'un réseau de diffraction

Le phénomène de diffraction est utilisé pour l'obtention de sources multiples. Un faisceau laser incident sur un réseau de diffraction permet de générer un ensemble de sources équidistantes à la surface d'un échantillon placé à une distance définie. En effet, cette dernière affecte directement la distance qui sépare les différentes sources thermoélastiques obtenues. L'interfrange entre les sources est déterminé par l'équation suivante :

$$i = \frac{\lambda D}{A} \quad (1)$$

Avec :

- λ : longueur d'onde du faisceau laser,
- D : distance séparant le réseau de diffraction de l'échantillon,
- A : pas du réseau.

Une simulation d'un système optique formé d'un réseau de diffraction utilisé en transmission de 600 traits/mm muni d'une lentille cylindrique de focalisation est réalisée. Les paramètres, utilisés dans la simulation, permettront de valider le choix de la configuration pour l'étude expérimentale. La figure 1 montre le trajet d'un faisceau laser de diamètre 6 mm représenté par les rayons extrêmes (1) et (2), traversant un réseau de 600 traits/mm puis focalisé par une lentille cylindrique ayant une distance focale de 7,5 cm. L'échantillon est

placé au foyer image de la lentille et la distance séparant la lentille du réseau est de 1 cm.

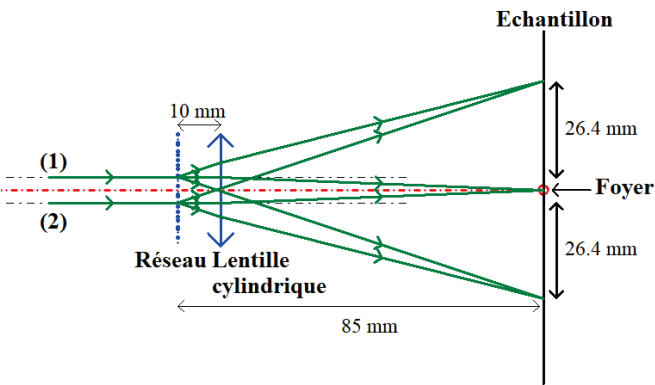


Figure 1 : Trajet d’un faisceau laser traversant un réseau de diffraction de 600 traits/mm, focalisé par une lentille ayant une distance focale de 7,5 cm.

La figure 1 montre que le système optique ainsi constitué permet d’obtenir trois sources optiques linéiques équidistantes séparées de 2,64 cm. Notons que l’interfrange calculé par l’équation (1) est en bon accord avec ce résultat. De plus, la distance entre la lentille et le réseau n’a aucun effet sur la distance entre les sources obtenues.

2.2 Caractéristiques de l’onde de Rayleigh

Chacune des sources linéiques génère une onde de Rayleigh à la surface de l’échantillon avec une vitesse de propagation qui dépend du matériau considéré. Théoriquement, la vitesse de propagation d’une onde de Rayleigh dans un matériau homogène et isotrope est approximativement donnée par la relation suivante [7] :

$$V_R = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} V_T \quad (2)$$

Avec :

- V_R : Vitesse de propagation de l’onde de Rayleigh,
- V_T : Vitesse de propagation de l’onde transversale,
- ν : Coefficient de Poisson du matériau.

Pour un échantillon d’aluminium, le coefficient de Poisson est 0,33 [8] et la vitesse de propagation de l’onde transversale est égale à 3130 m/s [9]. Par conséquent, la relation (2) donne une vitesse de propagation de l’onde de Rayleigh dans un échantillon d’aluminium d’environ 2917 m/s. Cette valeur théorique sera comparée à l’analyse de la vitesse via l’étude expérimentale du paragraphe (3.2).

Par ailleurs, l’onde de Rayleigh générée par une source ligne thermoélastique se caractérise par son aspect directionnel. En effet, cette onde possède une direction de propagation privilégiée perpendiculaire au centre de la ligne [4]. En outre, la longueur de la source ligne a une influence directe sur la directivité de l’onde [5]. La figure 2 représente le diagramme de directivité théorique de l’onde de Rayleigh, en considérant une source ligne de longueur 2 mm en régime thermoélastique à une fréquence de 6 MHz.

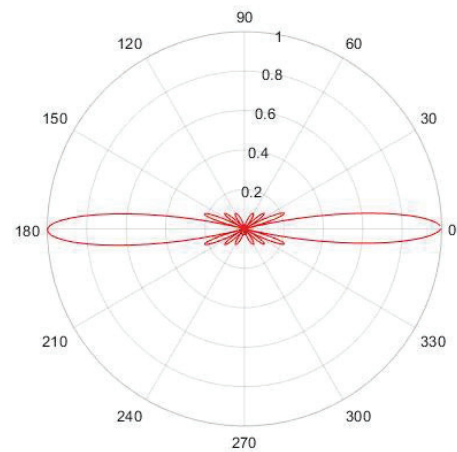


Figure 2 : Diagramme de directivité d’une onde de Rayleigh générée par une source ligne ayant une longueur égale à 2 mm dans l’aluminium.

3. Etude expérimentale

Dans cette partie, le dispositif expérimental utilisé est tout d’abord décrit. Une étude comparative de l’utilisation d’une source et de plusieurs sources pour la mesure de la vitesse de propagation est ensuite présentée. Finalement, le dimensionnement de l’échantillon et le positionnement du défaut sont abordés.

3.1 Dispositif de mesure

Un échantillon d’aluminium possédant un défaut circulaire débouchant de 2,3 mm de diamètre est étudié.

Nous utilisons un laser Nd:YAG, doublé en fréquence permettant d’obtenir une longueur d’onde de 532 nm, émettant des impulsions d’environ 10 nanosecondes. Le faisceau laser traverse un réseau de diffraction de 600 traits/mm. Une lentille cylindrique permet d’obtenir plusieurs sources linéiques thermoélastiques à la surface de l’échantillon. Le déplacement normal de la surface de l’échantillon aux passages des ondes de Rayleigh est détecté à l’aide d’un interféromètre hétérodyne de type Mach-Zehnder. La figure 3 représente le dispositif expérimental mis en œuvre.

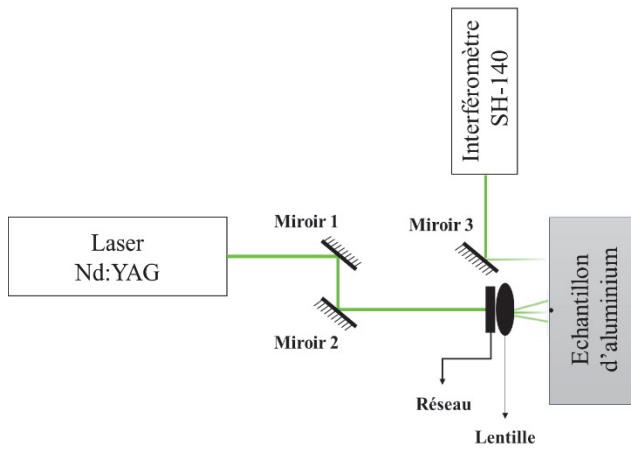


Figure 3 : Dispositif expérimental utilisé pour la génération et la détection des ondes de Rayleigh.

3.2 Mesure de la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh

Une étude comparative entre les résultats obtenus grâce à la mise en œuvre d'une source linéique et celle de plusieurs sources du même type est effectuée dans cette partie. Afin d'obtenir la vitesse de l'onde de Rayleigh, il faut procéder à la mesure du temps de vol. Pour cela, la distance de propagation doit être connue. Alors nous procédons au déplacement contrôlé du miroir 2 via une platine motorisée sur laquelle ce dernier est fixé (voir figure 3). La figure 4 ci-dessous représente les signaux obtenus suite à la génération de l'onde de Rayleigh par une seule source linéique avant et après le déplacement du miroir d'une distance de 3 mm.

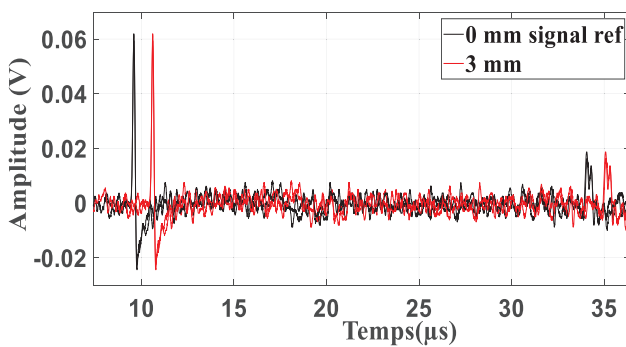


Figure 4 : Signaux obtenus à l'aide d'une source linéique pour deux distances de propagation présentant un écart de 3 mm.

D'après les deux signaux de la figure 4, la différence de temps de vol est de 1,01 µs. Ce qui correspond à une vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh de 2956 m/s. Celle-ci est cohérente avec la vitesse de propagation déterminée théoriquement dans la partie 2.

L'obtention de plusieurs sources linéiques équidistantes au niveau de l'échantillon permet la génération de plusieurs

ondes de Rayleigh tout en maîtrisant les différentes distances de propagation. Ceci permet d'obtenir la vitesse de propagation de l'onde de surface par deux méthodes :

- La première consiste à considérer la distance inter-source pour le calcul de la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh. Il n'est alors plus nécessaire de procéder à un déplacement ce qui peut permettre de simplifier le dispositif expérimental et d'améliorer la précision de mesure.
- La deuxième consiste à réaliser un déplacement pour récupérer un second signal comme dans le cas d'une seule source. En effet, le fait d'obtenir trois sources grâce au réseau nous permet de calculer trois vitesses de propagation de l'onde de Rayleigh et d'améliorer ainsi la fiabilité de mesure.

Pour cela, le réseau de diffraction est placé à une distance de 5,4 cm de l'échantillon. Trois sources linéiques espacées de 1,7 cm sont ainsi obtenues. La figure 5 représente le signal associé aux ondes de Rayleigh générés par ces trois sources et détectés pour l'échantillon d'aluminium.

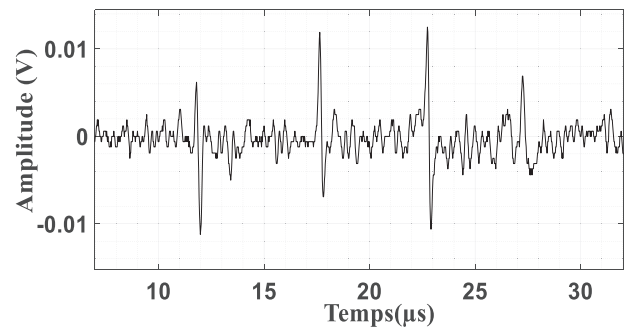


Figure 5 : Signal associé aux ondes de Rayleigh générées par les trois sources linéiques obtenues pour l'échantillon d'aluminium via le réseau de diffraction.

A partir de ce signal, nous calculons la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh pour l'échantillon considéré par la première méthode. En connaissant la distance séparant les sources et en calculant la différence de temps de vol entre les échos obtenus, nous déduisons une vitesse de propagation de 2890 m/s. Notons que l'association des échos à chacune des sources s'effectue en masquant chaque source séparément.

La deuxième méthode de mesure de la vitesse nécessite un déplacement du miroir 2. Ce qui provoque un décalage temporel du signal obtenu. La figure 6 représente les signaux avant et après un déplacement de 3 mm.

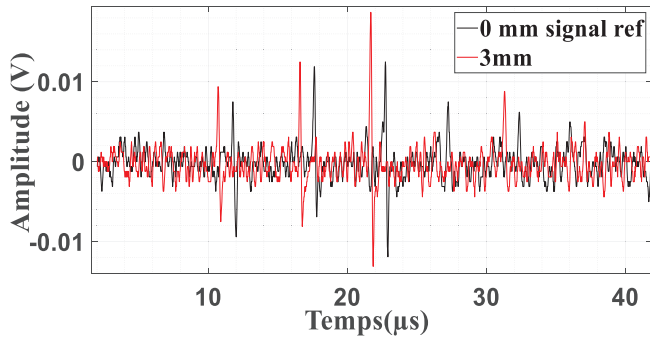


Figure 6 : Signaux obtenus à l'aide de trois sources linéiques pour deux distances de propagation présentant un écart de 3 mm.

Pour un déplacement de 3 mm, la différence de temps de vol entre les échos d'une même source est de 1,04 µs. Nous en déduisons que la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh est égale à 2885 m/s. Le tableau 1 présente les mesures obtenues dans les cas d'une source et de plusieurs sources linéiques.

Tableau 1 : Vitesses de propagation de l'onde de Rayleigh obtenues pour les différentes configurations envisagées.

Configuration	Vitesse m/s
Une source linéique avec déplacement	2956
Plusieurs sources linéiques sans déplacement	2890
Plusieurs sources linéiques avec déplacement	2885

Les vitesses de propagation obtenues pour les différentes configurations sont cohérentes. La configuration multi-sources peut donc être appliquée au contrôle non destructif par ondes de surface de différentes structures.

3.3 Dimensionnement de l'échantillon et localisation d'un défaut

Les sources linéiques obtenues par le réseau de diffraction sont réparties sur toute la longueur de l'échantillon. Compte-tenu de la directivité de l'onde de Rayleigh associée à chaque source linéique le dimensionnement et la détection d'un défaut débouchant peut-être envisagée.

Pour pouvoir déterminer la longueur de l'échantillon, ce dernier et le système optique sont distants de 8,5 cm. Trois sources équidistantes sont ainsi obtenues comme détaillé précédemment. La figure 1 de la partie (2.1) représente la simulation optique de cette configuration expérimentale.

Nous en déduisons que la distance théorique séparant les sources est de 2,64 cm.

La figure 7 précise les positions respectives entre les sources et par rapport aux bords de l'échantillon.

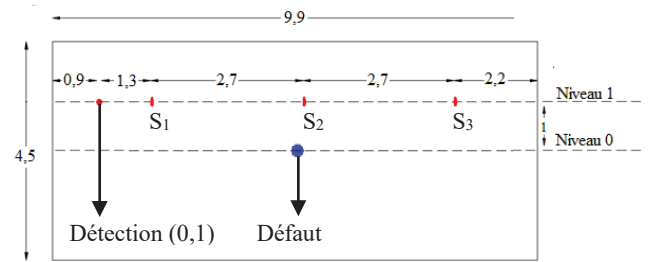


Figure 7 : Echantillon d'aluminium (vue de face) précisant les positions des différentes sources. Les distances indiquées sur le schéma sont en cm.

Chaque source a une largeur de 0,5 mm et une longueur de 2 mm approximativement. La figure 8 représente le signal obtenu lorsque la détection et les sources linéiques sont alignées au niveau 1 défini à la figure 7.

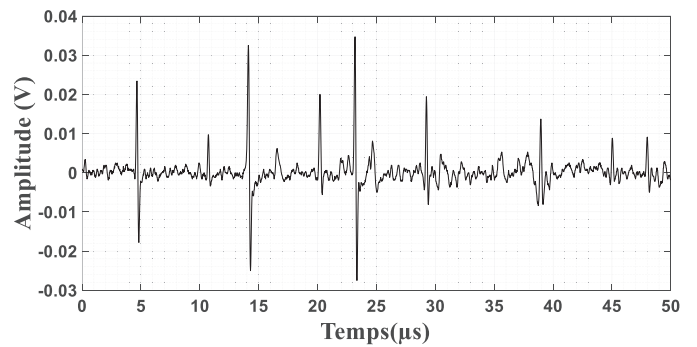


Figure 8 : Signal obtenu lorsque les trois sources linéiques et la détection sont alignées au niveau 1.

Afin d'associer les échos du signal, aux sources linéiques, un masquage de chacune est effectué au niveau de l'échantillon. Dans le tableau 2 le temps de vol et la distance entre chaque source et la détection sont donnés. La vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh considérée est de 2890 m/s, ce qui correspond à celle déduite précédemment à partir de plusieurs sources sans déplacement.

Tableau 2 : Temps de vol et distance de propagation associés aux différentes sources.

Source	Temps de vol (µs)	Distance calculée (cm)
S ₁	4,64	1,34
S ₂	14,16	4,09
S ₃	23,28	6,73

Ce tableau montre la cohérence entre la distance inter-source calculée et celle mesurée expérimentalement. Celle-ci est d'environ 2,7 cm.

Nous remarquons que le signal acquis contient plusieurs échos associés notamment aux réflexions des ondes de Rayleigh par les bords de l'échantillon. Afin d'identifier les échos associés à ces réflexions, un masquage des sources S_1 et S_3 est effectuée. Le masquage de la source S_1 , qui est la plus proche du bord gauche de l'échantillon, nous permet de déduire la distance entre la détection et le bord gauche de l'échantillon. La figure 9 présente les signaux détectés avec et sans source S_1 .

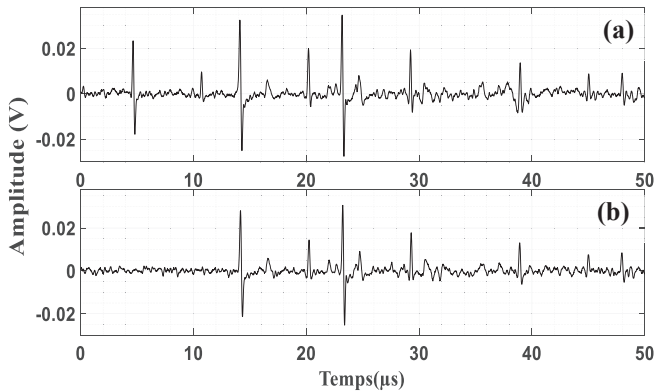


Figure 9 : Signaux détectés avec (a) et sans (b) source S_1 .

Nous constatons que lorsque la source S_1 est masquée, deux échos ne sont plus présents :

- L'écho détecté à $4,64 \mu s$ est relatif au trajet S_1 -détection,
- L'écho détecté à $10,72 \mu s$ est relatif à la réflexion de l'onde de Rayleigh émise par la source S_1 sur le bord gauche de l'échantillon.

La différence de temps de vol entre ces deux échos, nous permet de déduire que la distance entre la détection et le bord gauche de l'échantillon est d'environ $0,9 \text{ cm}$.

De la même manière, le masquage de la source S_3 , qui est la plus proche du bord droit de l'échantillon, nous permet de déduire la distance qui la sépare de ce bord. La figure 10 présente les signaux détectés avec et sans source S_3 .

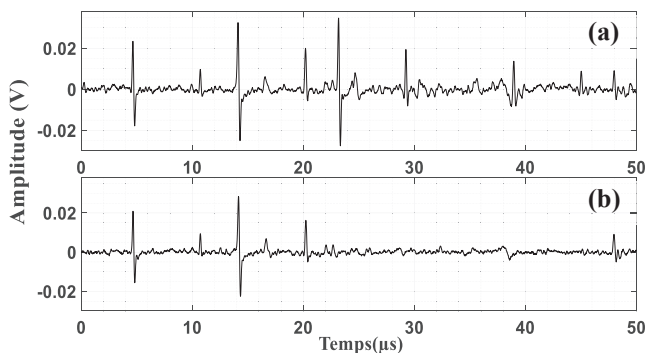


Figure 10 : Signaux détectés avec (a) et sans (b) source S_3 .

Nous constatons que lorsque la source S_3 est masquée, trois échos ne sont plus présents :

- L'écho détecté à $23,28 \mu s$ est relatif au trajet S_3 -détection,
- L'écho détecté à $29,24 \mu s$ est relatif à la réflexion de l'onde de Rayleigh émise par la source S_3 sur le bord gauche de l'échantillon,
- L'écho détecté à $38,96 \mu s$ est relatif à la réflexion de l'onde de Rayleigh émise par la source S_3 sur le bord droit de l'échantillon.

Ceci nous permet de déduire que la distance entre la source S_3 et le bord droit de l'échantillon est d'environ $2,27 \text{ cm}$ et que la distance entre la détection et le bord gauche est d'environ $0,9 \text{ cm}$. En nous basant sur ces résultats, nous pouvons conclure que la longueur totale de l'échantillon est approximativement de $9,9 \text{ cm}$. Notons que, le masquage de la source S_2 permet aussi la confirmation de ces résultats.

L'utilisation de plusieurs sources linéiques, générant chacune une onde de Rayleigh de part et d'autre de la source, nous a permis de déterminer la longueur de l'échantillon à l'aide des réflexions des différentes ondes sur les deux bords de l'échantillon. La répartition de plusieurs sources à la surface de l'échantillon permet d'obtenir des signaux d'amplitude suffisante quelque soit la position de la détection choisie.

3.4 Localisation du défaut

Nous déplaçons verticalement l'échantillon d' 1 cm pour positionner les sources et la détection au niveau 0 comme présenté sur la figure 11.

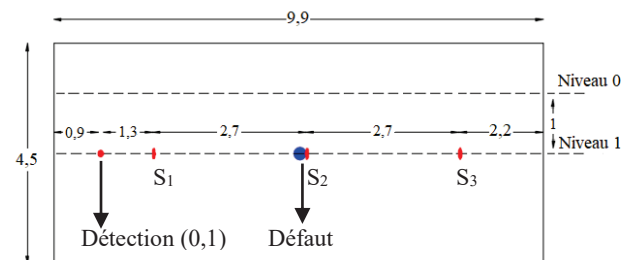


Figure 11 : Echantillon d'aluminium (vue de face) précisant les positions des différentes sources. Les distances indiquées sont en cm.

Les trois sources sont ainsi positionnées de part et d'autre du défaut. La figure 12 représente les signaux acquis dans le cas où la détection et les sources sont au niveau 0 (signal a) puis au niveau 1 (signal b).

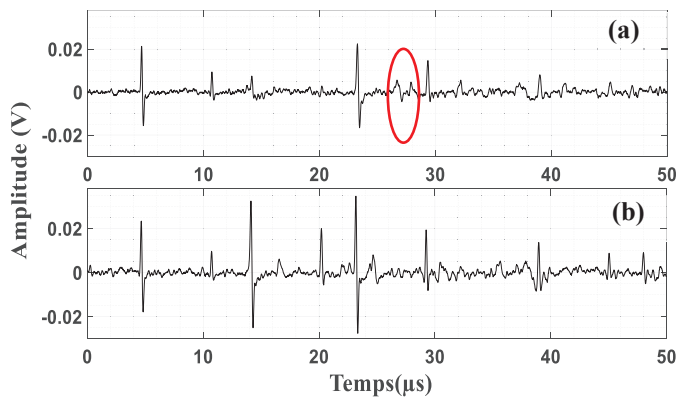


Figure 12 : Signaux acquis lorsque la détection et les sources sont positionnées au niveau 0 (a), au niveau 1 (b).

En comparant les deux signaux, nous remarquons que :

- Pour la source S_1 , en considérant le signal temporel jusqu'à 12 μs , il n'y a pas de modification apparente sur la série d'échos du signal (a) par rapport au signal (b). Il n'y a donc pas de défaut sur les trajets associés.
- Pour la source S_2 , entre 12 μs et 21 μs , il y a une atténuation importante de l'écho situé à 14,16 μs et correspondant au trajet direct S_2 -détection. La conséquence est aussi l'atténuation quasi-totale de l'écho correspondant à la réflexion de l'onde concernée sur le bord de l'échantillon. Cette atténuation est caractéristique de l'interaction de l'onde avec le défaut, ce qui nous permet d'affirmer sa présence sur le parcours acoustique de l'onde étudiée et émise par la source S_2 .
- Pour la source S_3 , aux alentours de 22 μs , nous constatons aussi l'atténuation de l'écho correspondant au trajet S_3 -détection. Ceci confirme bien la présence du défaut sur cette zone de l'échantillon. De plus, un nouvel écho (identifié en rouge sur le signal (a)) est observé. Cet écho est aussi clairement représentatif de l'interaction de l'onde de Rayleigh avec le défaut débouchant.

Cette comparaison nous a permis de localiser le défaut débouchant par rapport à l'emplacement des sources sur l'échantillon. Ceci nous permet d'affirmer que les ondes émises par chaque source et parcourant notamment un trajet différent, permettent d'obtenir des informations significatives sur le CND de chaque zone sondée de l'échantillon.

4. Conclusion et perspectives

Dans cette étude, nous avons mis en œuvre un dispositif optique basé sur l'utilisation d'un réseau de diffraction afin d'obtenir plusieurs sources linéiques thermoélastiques à la surface d'un échantillon. Ces différentes sources nous ont permis d'exciter simultanément des ondes de Rayleigh parcourant différents trajets. En positionnant précisément la surface de l'échantillon à une certaine distance du système optique, l'espacement entre les sources est déterminé, ce qui permet d'obtenir la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh. En considérant les différents temps de vol obtenus pour les ondes excitées, nous avons montré qu'il était pos-

sible d'obtenir une des dimensions de l'échantillon et de localiser un défaut débouchant. La méthode mise en œuvre présente l'avantage de ne pas nécessiter le déplacement des sources qui sont directement réparties à la surface de l'échantillon étudié. Une analyse temporelle plus exhaustive des échos présents devrait pouvoir permettre une localisation plus précise du défaut et une analyse spectrale son dimensionnement.

Nous nous intéresserons aussi prochainement aux éventuelles conversions de modes lors de l'interaction ondes-défaut en simulant la configuration présentée.

Remerciements

Les auteurs remercient la région Hauts-de-France pour le soutien financier apporté dans la réalisation de cette étude.

Références

- [1] C. B. Scruby and L. E. Drain, "Laser Ultrasonics: Techniques and Applications," p. 465
- [2] J. Perdijon, *Le contrôle non destructif par ultrasons*. Hermes, 1993
- [3] C. Pei, D. Yi, T. Liu, X. Kou, and Z. Chen, "Fully non-contact measurement of inner cracks in thick specimen with fiber-phased-array laser ultrasonic technique," *NDT & E International*, vol. 113, p. 102273, Jul. 2020
- [4] Lord Rayleigh, "On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid," *Proceedings of the London Mathematical Society*, vol. s1-17, no. 1, pp. 4–11, Nov. 1885
- [5] F. Faëse, F. Jenot, M. Ouaftouh, and F. Duquennoy, "Ondes de Rayleigh générées et détectées par laser - Applications à la détection de défauts," *Proc. cofrend (Dunkirk)*, p. 141, 2011.
- [6] D. Royer and C. Chenu, "Experimental and theoretical waveforms of Rayleigh waves generated by a thermoelastic laser line source," *Ultrasonics*, vol. 38, no. 9, pp. 891–895, Sep. 2000
- [7] D. Royer and E. Dieulesaint, *ondes élastiques dans les solides. Tome 1*, Paris, 1996
- [8] J. Rousseau, "Etude d'ondes de type Rayleigh sur des milieux stratifiés", 1979
- [9] L. Beaujard, G. Labbe, and J. Mannenc, "Métallographie - Essais non destructifs." Encyclopædia Universalis
- [10] J. W. Wagner, A. D. W. McKie, J. B. Spicer, and J. B. Deaton, "Modulated laser array sources for generation of narrowband and directed ultrasound," *J Nondestruct Eval*, vol. 9, no. 4, pp. 263–270, Dec. 1990