



**HAL**  
open science

## Tomographie ultrasonore tridimensionnelle de composants mécaniques

Henri Walaszek, Sébastien Brzuchacz, Théo Langlet, W Cailly, Philippe  
Lasaygues, Benoît Dupont

► **To cite this version:**

Henri Walaszek, Sébastien Brzuchacz, Théo Langlet, W Cailly, Philippe Lasaygues, et al.. Tomographie ultrasonore tridimensionnelle de composants mécaniques. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. hal-03848364

**HAL Id: hal-03848364**

**<https://hal.science/hal-03848364>**

Submitted on 17 Nov 2022

**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.

## Three dimensional ultrasonic tomography of mechanical components by inversion

*H. Walaszek<sup>1</sup>, S. Brzuchacz<sup>1</sup>, T. Langlet<sup>1</sup>, W. Cailly<sup>1</sup>, P. Lasaygues<sup>2</sup>, B. Dupont<sup>1</sup>*

*1: CETIM ; 2 : Laboratoire de mécanique et Acoustique de Marseille*

### **Résumé**

Les techniques de contrôle non destructif permettent désormais de représenter la réponse des objets sous forme d'image, notamment en ultrasons. Dans le cas des ultrasons, cette image consiste en une présentation des amplitudes ou temps de parcours des ondes dans le matériau. L'imagerie ultrasonore permet ainsi de représenter les objets sous la forme d'une projection parallèle ou perpendiculaire à la surface du matériau, comme dans le B-scan utilisé en médecine. Des essais menés à ce jour dans différents laboratoires ainsi qu'au CETIM montrent qu'il est désormais possible de réaliser une tomographie ultrasonore 2D ou 3D comme en tomographie X. De plus, ce type de reconstruction est applicable en tomographie à ondes guidées pour l'imagerie de plaque [1] [2]. Il est également remarquable que la tomographie par ultrasons pourrait nous donner, à travers l'analyse du temps de vol/célérité ultrasonore un accès aux propriétés mécaniques du matériau sous balayage.

La communication consistera à décrire la problématique du contrôle tomographique ultrasonore par reconstruction, et à positionner cette méthode par rapport aux méthodes de traitement existantes (Full Matrix capture, FTP). Des analogies avec les rayons X (RX), et les particularités de la reconstruction échographique, seront expliquées, mettant en évidence les avantages et les limites de chaque méthode. Des résultats obtenus par le CETIM en imagerie basse fréquence du contenu d'un tronçon de conduite seront présentés, d'abord en termes de densité. De plus, les tomographies réalisées ont montré que la reconstruction en temps de vol permet de suivre l'évolution de la distribution de température volumique d'un flux circulant dans une même conduite. Enfin, quelques applications potentielles de la tomographie de reconstruction seront abordées, ainsi que les verrous à lever afin de permettre l'industrialisation de ce procédé, tout en considérant l'imagerie ultrasonore tridimensionnelle dans le contexte du développement des technologies numériques et informatiques.

### **1. Introduction:**

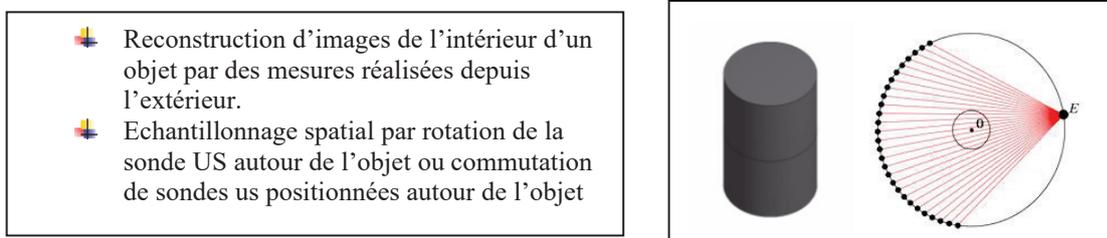
Les techniques d'imagerie ont maintenant largement pénétré le domaine du contrôle non destructif. Les avantages de l'imagerie sont nombreux. En effet, ces techniques permettent notamment d'avoir une vue globale du composant du point de vue de la méthode de contrôle considérée, de faciliter l'interprétation des contrôles, et d'améliorer la compréhension des résultats par des non-spécialistes.

Alors que certaines méthodes, telles que les RX, consistent par essence même en une technique d'imagerie, d'autres, telles que les ultrasons (US), ont historiquement été utilisés pour réaliser une détection ponctuelle à l'endroit précis ou est couplé le capteur. La technique ultrasonore s'est enrichie peu à peu, depuis sa création, des apports de l'imagerie. Ainsi, le contrôle ultrasonore est passé ces dernières années du contrôle ponctuel A-scan au contrôle C-scan (vue en projection, comme en RX), puis au B-scan multi-éléments, comme en échographie médicale. Le contrôle ultrasonore a bénéficié même récemment de l'apport de techniques sophistiquées de reconstruction. On ne se contente plus dans ce cas de représenter une image seulement basée sur un graphique amplitude-temps de vol. Ainsi, les techniques de reconstruction telles que la reconstruction en tout point (FTP) et le Full Matrix Capture, permettent de créer une image peu sensible à l'orientation des réflecteurs. L'idée avait été initiée dans les années 1980-1990, d'enregistrer les échogrammes d'un objet grâce à une rotation de l'objet dans le faisceau ultrasonore, puis d'inverser les données en utilisant des algorithmes linéaires [3;4], comme on le fait depuis longtemps en tomographie rayons X (RX). Cette dernière technique a d'abord été largement diffusée dans le domaine médical, puis en Contrôle Non Destructif (CND). Les principes de création d'une image tomographique en ultrasons sont donc très proches de ceux de la tomographie RX. La tomographie ultrasonore représente maintenant une possibilité supplémentaire de réaliser des images acoustiques des composants, avec l'avantage d'une représentation des réflecteurs indépendante de leur orientation. On notera aussi que la tomographie ultrasonore présente les particularités suivantes par rapport à la tomographie RX:

- elle ne présente pas de risque pour les opérateurs
- elle permet de contrôler des composants épais et atténuants pour les RX
- elle est sensible aux variations de densité, comme en RX, mais également aux paramètres mécaniques qui influencent le temps de vol (TOF) ultrasonore, tels que la microstructure, la taille de grains, les contraintes
- Le matériel nécessaire est relativement moins complexe et surtout moins lourd de mise en oeuvre qu'en tomographie RX
- Si les images créées par inversion sont généralement en 2D, une juxtaposition de coupes tomographiques permet de réaliser des vues en 3 dimensions des composants, quand on peut réaliser des acquisitions tomographiques à différentes hauteurs du produit.

Les principes de la tomographie sont rappelés ci-dessous:

La tomographie est une technique d'imagerie non-intrusive qui consiste à inverser des mesures prises sous différents angles autour d'un objet. Ces mesures sont par exemple l'intensité lumineuse d'un faisceau traversant un milieu, dans le cas de la tomographie à rayons X, soit l'amplitude, la phase, et le temps de vol des ondes ultrasonores réfléchies ou transmises par un milieu, dans le cas de la tomographie à ultrasons (Fig1). L'information peut être mesurée de manière passive, c'est-à-dire uniquement en recevant des informations provenant naturellement du support [ 5 ], ou de manière active, c'est-à-dire en envoyant artificiellement de l'énergie au support et en mesurant sa réponse [ 5 ]. Dans les deux cas, le milieu peut être modélisé comme une fonction de transfert entre un champ d'un ensemble de grandeurs physiques et un ensemble de mesures. La fonction de transfert est généralement formulée sous une forme analytique (généralement un ensemble d'équations différentielles ou intégrales), mais elle peut également être formulée sous une forme probabiliste pour des données non déterministes (généralement un modèle bayésien). Les techniques d'acquisition de signaux numériques de mesure permettent de manipuler des modèles numériques qui peuvent fournir une inversion puissante. La procédure d'inversion, c'est-à-dire le problème inverse, est possible sous des hypothèses préalables sur la fonction de transfert directe, c'est-à-dire le problème direct, et y est très sensible.



*Echantillonnage spatial par rotation autour de la pièce avec une géométrie de projection en éventail*

Fig 1: Principe de la tomographie par transmission en rayons X et en ultrasons

Le contrôle ultrasonore tomographique présente par contre des limitations propres, par rapport aux RX :

- La diffraction des ultrasons peut provoquer des artefacts
- Les pièces de forme complexe ne seront pas facilement contrôlables
- Les pièces opaques aux ultrasons sont plus difficilement contrôlables, sauf à baisser la fréquence, quitte à perdre de la résolution.

Nous allons maintenant présenter différents exemples de mise en oeuvre en laboratoire de la tomographie ultrasonore, qui présentent des potentialités d'application en contrôle non destructif, mais aussi en contrôle de procédé industriel. Ainsi, on démontre que la tomographie ultrasonore peut s'appliquer, à différentes fréquences ultrasonores, à la visualisation du contenu de tuyauteries, en vue par exemple, d'imager des mélanges diphasiques, ou la présence d'un solide simulant une bulle dans une tuyauterie remplie d'eau ou, la densité de mélange eau-

glace. Finalement, nous montrons que la combinaison de l'utilisation de basses fréquences et de la tomographie permet d'imager l'intérieur de tubes élastomères très épais et très atténuants.

## 2. Application de la tomographie ultrasonore à la mesure du comportement thermo-hydraulique d'un volume de fluide.

Il s'agit ici d'imager un mélange d'eau à température ambiante et d'eau à basse température issue de la fonte d'un glaçon au cours du temps. Un glaçon d'environ 20 cl est posé doucement à la surface d'un volume d'eau contenu dans un réservoir en plexiglas. Durant sa fonte une série de mesures de propagation de signaux ultrasonores a été effectuée dans le volume d'une section du fluide. Différents comportements sont attendus, notamment la présence de variations de température entre 0°C et la température ambiante de 24°C, ainsi que l'apparition d'un flux local d'eau froide se déplaçant relativement verticalement du glaçon vers le fond du récipient. La situation est schématisée dans la figure 2.

L'objectif est d'accéder à une cartographie de température du fluide, en sachant que l'impédance acoustique de celui-ci est modifiée par ce paramètre. La célérité des ondes dans l'eau en fonction de la température est connue et présentée dans la figure 1.a.

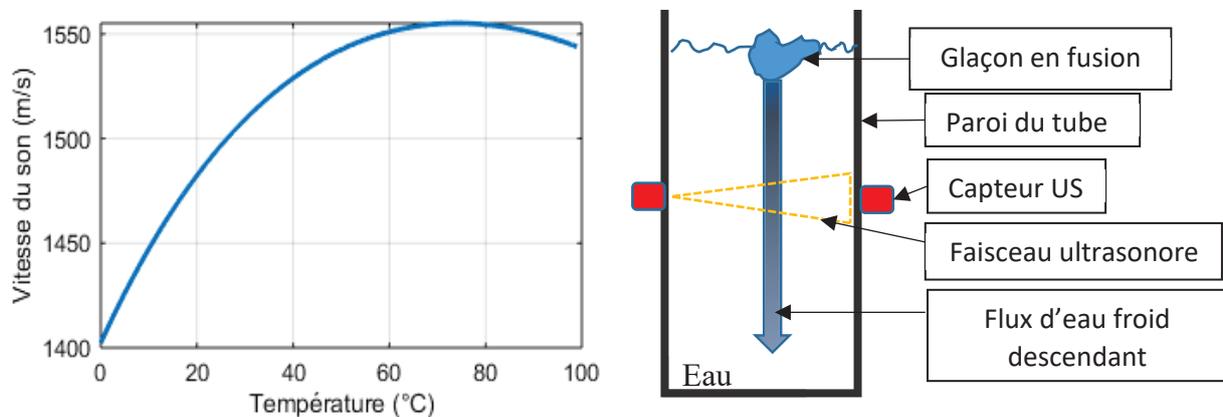


Figure 2 : (a) évolution de la célérité des ondes sonore dans l'eau en fonction de la température. Tracé depuis un modèle polynomiale d'ordre 5 avec les constantes de Bilaniuk et Wang [6]. (b)Schéma de l'expérience.

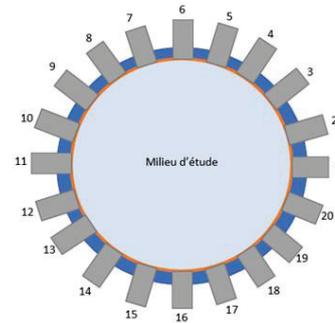
Le dispositif expérimental est une conduite cylindrique de 150 mm de diamètre. Celui-ci est entouré par 20 capteurs permettant d'imager une coupe en tranche du récipient avec une géométrie de rétroprojection en éventail. Les capteurs sont des pastilles piézo-électriques de 16 mm de diamètre résonnant à une fréquence nominale de 100 kHz. Un amortissement a été réalisé de manière artisanale au laboratoire en chargeant la face arrière du capteur avec un matériau composé d'un mélange de résine et de copeaux d'étain. La paroi de la conduite a été usinée pour permettre d'amener les capteurs jusqu'au fluide et s'affranchir de la focalisation du faisceau par la courbure du cylindre. Les faces avant des transducteurs sont alors couplées au fluide par l'intermédiaire d'un film plastique fin assurant l'isolation électrique et l'étanchéité du système. Ce montage est présenté de différentes manières par la figure 3.

Les transducteurs présentés sont réversibles et utilisés en temps qu'émetteurs et récepteurs durant une séquence émission-transmission-réception-acquisition d'un émetteur vers un récepteur contrôlé par une électronique multiéléments basse fréquence. Cette séquence est répétée pour chaque couple émetteur-récepteur séparément ce qui donne 380 émission-réception d'une durée de 200 $\mu$ s répétée toute les 10ms. L'obtention d'un Bscan électronique complet se fait en 3.8 secondes. Ce temps est lié principalement aux caractéristiques de l'électronique en termes de rapidité.

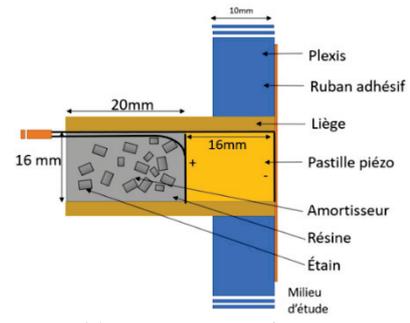
Les variations de paramètres physiques dans le fluide sont mises en évidence par comparaison des résultats de l'expérience avec des signaux de références mesurés dans de l'eau statique à température homogène et ambiante. Seule la transmission directe entre l'émetteur et le récepteur est considérée. Ces variations sont ensuite représentées sous forme d'images grâce à une opération de rétroprojection filtrée via un logiciel développé au CETIM.



(a) Photographie du montage



(b) Montage des capteurs sur la conduite



(c) vue en coupe d'un capteur intégré au système avec son dispositif d'amortissement

Figure 3 : Photographie et schéma du dispositif expérimental

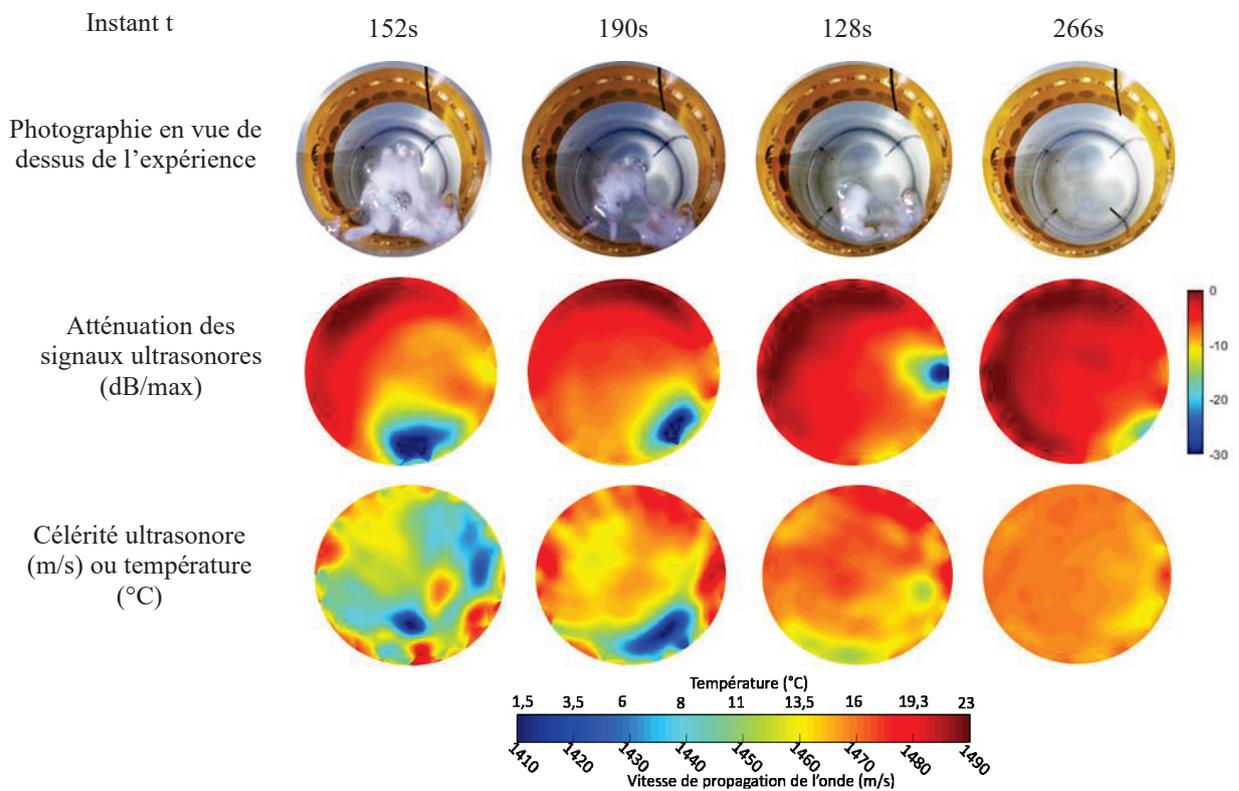


Figure 4 : images de la répartition des variations de l'atténuation et de la célérité des ondes ultrasonores dans la section de tuyauterie au court du temps lors de la fonte d'un glaçon en surface.

L'amplitude et le temps de vol sont modifiés lors de la fonte du glaçon. Ces variations sont visibles sur le plan de coupe au cours du temps sur la figure 4. Il est remarquable que les vitesses de propagations mesurées soient cohérentes avec les valeurs de célérités en fonction de la température présentées dans la figure 3. En considérant que l'effet des mouvements de convections du fluide ( $<1 \text{ m.s}^{-1}$ ) sont négligeables en vue de leurs faibles vitesses par rapport à la célérité des ondes dans l'eau, les résultats en célérité sont mis en correspondance avec des valeurs de températures et font apparaitre des valeurs cohérentes avec les attentes décrites précédemment.

Ces résultats apportent des pistes permettant d'envisager l'utilisation de la tomographie ultrasonore pour la surveillance de contenus fluidiques soumis à des variations thermo-hydrauliques.

### 3. Tomographie en ondes de volume du contenu d'une tuyauterie

L'essai décrit ici a consisté à tester un algorithme de reconstruction, à vérifier ses performances en termes de résolution/sensibilité sur des fantômes réflecteurs diffractants billes en verre situés dans un plan normal à l'axe z, et tester les possibilités de reconstitution 3D. Des travaux en 2D ont été présentés antérieurement sur le même sujet par W.Cailly [ 7 ].

Le déplacement des capteurs était assuré par une cuve d'immersion robotisée avec deux axes indépendants et un système d'acquisition associé. Dans le cas du couplage contact, quatre capteurs contact appliqués à la paroi du tube sont déplacés pour balayer l'intérieur de la tuyauterie. Les conditions d'essai sont données en Fig5.

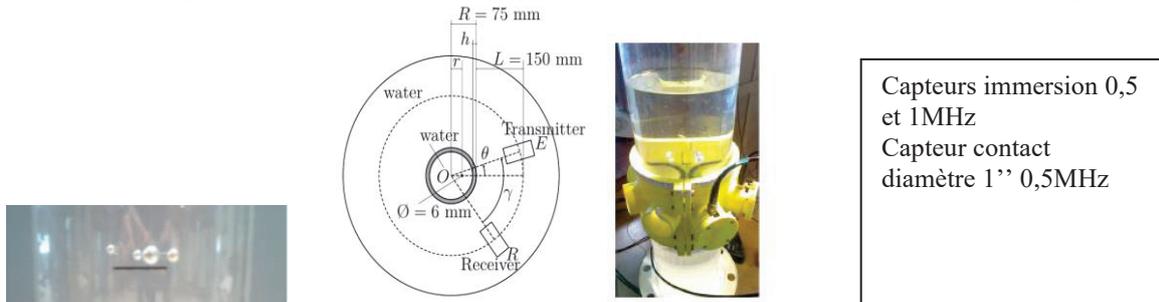


Fig 5 : Montage expérimental de tomographie immersion et contact de billes de verre diffractantes à l'intérieur d'un tuyau en PMMA de diamètre 150mm et d'épaisseur 3mm

Nous exposons ci-dessous les résultats de tomographie du fantôme 3D, obtenu par composition d'images 2D le long du tube PMMA, simulant ainsi un écoulement vertical. Les résultats suivant les trois modes d'acquisition ultrasonores sont comparés en figure 6.

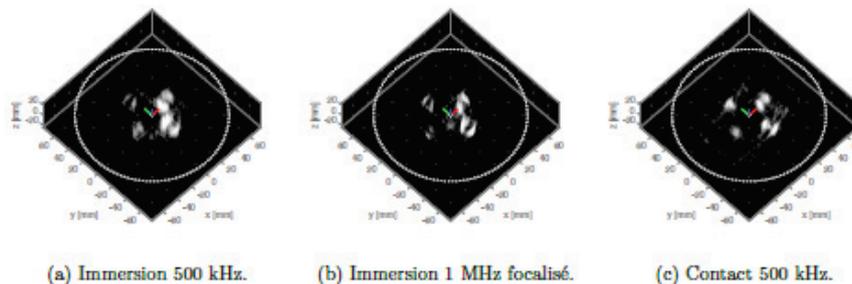


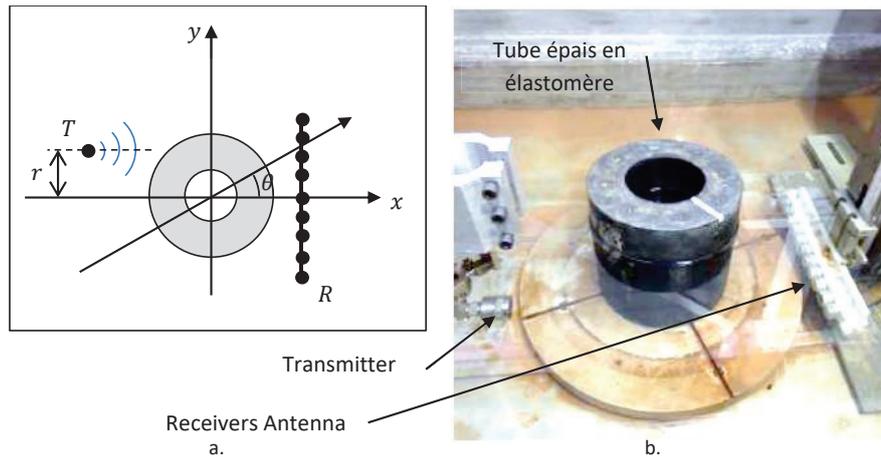
Fig6 : Tomographies cylindriques du fantôme 3D aux différentes modalités testées

Nous avons donc démontré la bonne détection des billes, avec cependant une résolution qui reste à améliorer. La possibilité de reconstruction 3D sur cette simulation de fluide en écoulement est également démontrée.

### 4. Tomographie 3D en ondes de volume d'un tube élastomère atténuant

L'objectif de cet essai est d'évaluer les performances de reconstruction 3D pour le test d'un tube en élastomère. La configuration expérimentale est fondamentalement la même que les précédentes, mais la configuration est dans une configuration tomographique en éventail.

Dans une telle configuration, l'émetteur se déplace dans une direction parallèle à une antenne linéaire statique de 11 récepteurs d'émission acoustique CETIM, qui sont des transducteurs non amortis ayant une fréquence de résonance autour de 200 kHz. La pièce testée est un tube en élastomère de 90 mm d'épaisseur, 200 mm de hauteur et 100 mm de diamètre intérieur. Il est placé sur un plateau tournant. Cependant, à proprement parler, cette configuration n'est pas une configuration en éventail, car nous n'avons pas pu contrôler l'orientation azimutale du transducteur. La disposition de l'installation est donnée dans la figure 7.



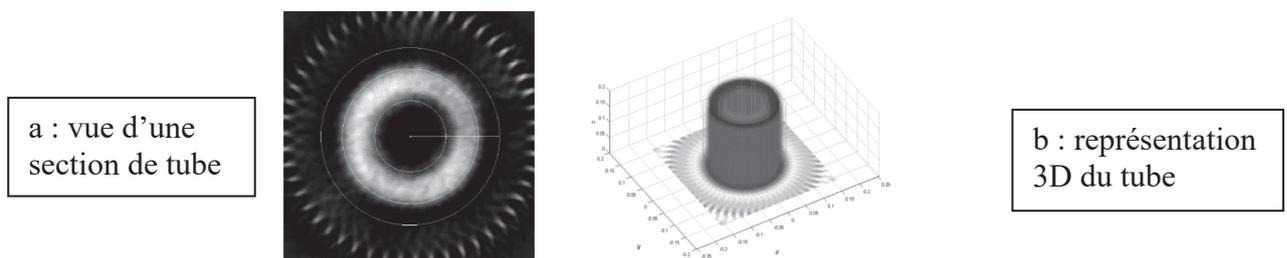
a. schéma de principe du système de contrôle en immersion	b. vue du montage expérimental et de la pièce contrôlée dans la cuve d'immersion
---	--

**Figure 7: Système expérimental de tomographie d'un tube en élastomère [ 2 ]**

Nous supposons que pour la reconstruction, la réfraction peut être négligée. L'image reconstruite en 3D est composée de couches successives reconstruites en 2D de l'objet.

On notera que le principe de superposition des couches de reconstruction 2D est proche de celui qui a été utilisé dans les travaux de Rahiman pour la tomographie 3D d'un fluide chargé de bulles circulant dans un tuyau [ 6 ]. L'émetteur est un transducteur Panametrics à immersion 1", 0,5 MHz. Une première acquisition de référence est effectuée à vide, sans pièce élastomère, et une correction de gain est ajustée pour chaque récepteur. Les signaux sont enregistrés au pas angulaire de  $\Delta\theta = 6^\circ$  et au pas de translation de l'émetteur de  $\Delta r = 2$  mm, au moyen d'un échographe AGR Handyscan. Des acquisitions sont réalisées sur des sections de tube à différentes hauteurs, pour permettre une visualisation 3D. L'image reconstruite est représentée sur la figure 8. Les résultats montrent que, malgré le niveau d'absorption acoustique élevé d'un tel matériau, il est possible de transmettre des ultrasons à basse fréquence à travers et de reconstruire une image de l'objet.

La pertinence de l'approche tomographique est d'augmenter le contraste afin de détecter des défauts éventuels dans le matériau atténuant contrôlé. Dans le cas présent, nous n'avons pas recherché de défauts, car le but de l'expérience était de vérifier que notre hypothèse d'une reconstruction par ultrasons à basse fréquence était possible sur un matériau hautement absorbant, même avec une instrumentation ultrasonore multiéléments de base.



**Figure 8 : Reconstruction tomographique d'un tube élastomère**

## 5. Conclusion

La tomographie à rayons X a déjà prouvé son efficacité sur une large gamme de composants mécaniques métalliques ou composites. Les techniques de reconstruction tomographique permettent, de manière non intrusive, une vision complète de l'intérieur des composants, et une localisation précise des défauts dans le volume inspecté. Les applications de la tomographie ultrasonore font aujourd'hui l'objet de recherches dans le domaine de l'industrie : contrôle non destructif, contrôle de procédé, contrôle de santé des structures. La technique de reconstruction par ultrasons a également été réalisée avec l'utilisation d'une excitation acoustique naturelle. Nous avons montré dans cet article la possibilité de réaliser la tomographie d'amplitude et de temps de vol (i.e atténuation et température) d'un fluide inhomogène en température circulant dans un tuyau. Les potentialités et les limitations actuelles de la tomographie d'un réflecteur cylindrique simulant un barreau ont été montrées également. Enfin, nous avons montré que l'on pouvait réaliser des tomographies à basse fréquence, ce qui ouvre la voie au contrôle de produits atténuants.

Les résultats présentés ont montré que cette technique est prometteuse pour une utilisation industrielle et donc d'autres applications peuvent être développées dans le domaine de l'industrie mécanique.

### Liste des références

- [Ref 1] Saidoun A., Zhang F., Monnier T., Hebaz S.E., Romaine A, Vu Q.A., Usmaal E.. SCCODRA - Development of an innovative corrosion monitoring methodology for the French radioactive waste disposal application 10th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure Juin 2021
- [Ref 2] Cailly W, Walaszek H, Three dimensional ultrasonic imaging of mechanical components by inversion Conference ACMA Compiègne Avril 2018
- [Ref 3] Lasaygues P, Lefebvre JP, Mensah S. High resolution low frequency ultrasonic tomography. *Ultrason. Imaging.* 1997 Oct;19(4):278–93.
- [Ref 4] Lefebvre J-P. Progress in linear inverse scattering imaging : NDE application of Ultrasonic Reflection Tomography. *Inverse Probl. Eng. Mech.* Rotterdam/Brookfield: A.A.Balkema; 1994. p. 371–5.
- [Ref 5] Druet, T., Chapuis, B. and Moulin, E., Feasibility of Passive Tomography of Extended Defects Using Ambient Elastic Noise Correlation, *Physics Procedia*, **70**, 2015.
- [Ref 6] B.Ford, S.Robinson, « Technical guides – speed of sound in water » National Physical Laboratory, Teddington, UK, 200]
- [Ref 6 ] Rahiman, M. H. F., Rahim, R. A.,Rahim, H. A., Green, R. G., Zakaria, Z., Mohamad, E. J. and Muji, S. Z. M., An evaluation of single plane ultrasonic tomography sensor to reconstruct three-dimensional profiles in chemical bubble column. *Sensors and Actuators A: Physical*, **246**, 2016.
- [Ref 7 ] Cailly W. Walaszek H, Brzuchacz S., Zhang F., Lasaygue P. Pipe two-phase flow non-invasive imaging using Ultrasound Computed Tomography: A two-dimensional numerical and experimental performance assessment *Flow Measurement and Instrumentation* Volume 74, August 2020, 101784