



**HAL**  
open science

## Caractérisation de films par microscopie acoustique : Mesure et dispersion des propriétés ultrasonores

Pooyan Manoochehrnia, Pierre Marechal, Damien Leduc, Mounsif Ech-Cherif  
El-Kettani, Jean Duclos

### ► To cite this version:

Pooyan Manoochehrnia, Pierre Marechal, Damien Leduc, Mounsif Ech-Cherif El-Kettani, Jean Duclos. Caractérisation de films par microscopie acoustique : Mesure et dispersion des propriétés ultrasonores. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique (SFA); Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA), Apr 2022, Marseille, France. hal-04461977

**HAL Id: hal-04461977**

**<https://hal.science/hal-04461977>**

Submitted on 16 Feb 2024

**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.



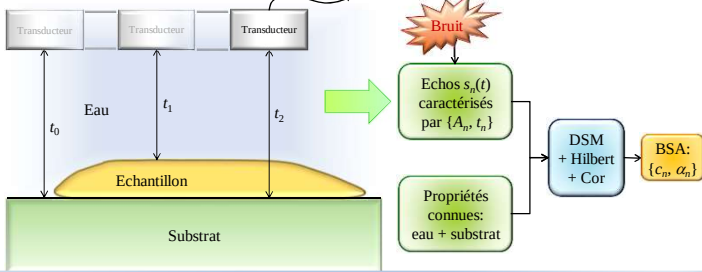
Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

## I. Contexte et objectifs

### Introduction

#### ❖ Biofilm et santé:

Dans le cadre d'une étude portant sur la caractérisation ultrasonore de biofilms, une méthodologie de caractérisation et de traitement de signaux réfléchis par des couches minces, a été développée. Cette étude vise donc à déterminer via les ultrasons les épaisseurs et propriétés des biofilms à l'origine de contaminations microbiennes. Ces biofilms sont formés par des dépôts de micro-organismes, et ont une structure externe composée de polysaccharide qui est beaucoup plus rigide que leur cœur. Cette structure joue un rôle protecteur et forme une bonne partie de son épaisseur, de quelques dizaines de nanomètres à quelques micromètres. Au final, l'épaisseur du biofilm, s'étend de la dizaine à quelques centaines de micromètres. Notre objectif est ici d'estimer l'influence des propriétés de la couche étudiée, en vérifiant différentes hypothèses: détectabilité ultrasonore, homogénéité et isotropie. Les mesures ultrasonores permettent d'obtenir des évaluations quantitatives d'épaisseurs et de propriétés viscoélastiques. La microscopie acoustique permet ainsi d'obtenir une résolution axiale élevée, dont les limites sont celles imposées par l'atténuation.



## II. Modélisation et méthode

### Méthode des Séries de Debye (DSM)

❖ Définition des coefficients de réflexion  $\{R_{n,n+1}, R_{n+1,n}\}$  et de transmission  $\{T_{n,n+1}, T_{n+1,n}\}$  de Fresnel aux interfaces, fonction des impédances acoustiques  $Z_n = \rho_n c_n$  et des phases  $\varphi_n = k_n z_n = \omega z_n / c_n$  et  $\varphi_{n+1} = k_{n+1} z_{n+1} = \omega z_{n+1} / c_{n+1}$ , et de la position d'interface  $z_n$ , du nombre d'onde  $k_n$  (i.e. pulsation  $\omega$ , vitesse  $c_n$  et atténuation  $\alpha_n$ ):

\* Entre les couches  $n$  et  $n+1$  :

$$\begin{cases} R_{n,n+1} = \frac{Z_{n+1} - Z_n}{Z_{n+1} + Z_n} e^{2j\varphi_n} \\ T_{n,n+1} = \frac{2Z_{n+1}}{Z_{n+1} + Z_n} e^{-j(\varphi_{n+1} - \varphi_n)} \end{cases}$$

\* Entre les couches  $n+1$  et  $n$  :

$$\begin{cases} R_{n+1,n} = \frac{Z_n - Z_{n+1}}{Z_n + Z_{n+1}} e^{-2j\varphi_{n+1}} \\ T_{n+1,n} = \frac{2Z_n}{Z_{n+1} + Z_n} e^{-j(\varphi_{n+1} - \varphi_n)} \end{cases}$$

\* Coefficient de réflexion global :

$$R_g = R_{12} + \frac{T_{12} \rho_{23} T_{21}}{1 - R_{21} \rho_{23}}$$

avec:

$$\begin{cases} \rho_{n,n+1} = R_{n,n+1} + \frac{T_{n,n+1} \rho_{n+1,n+2} T_{n+1,n}}{1 - R_{n+1,n} \rho_{n+1,n+2}} \text{ pour } 2 \leq n \leq N \\ \rho_{N+1,N+2} = R_{N+1,N+2} \end{cases}$$

\* Coefficient de transmission global :

$$T_g = T_{12} \prod_{n=2}^{n=N} \frac{T_{n,n+1}}{1 - R_{n+1,n} \rho_{n,n+1}}$$

avec:

$$\begin{cases} \rho_{n+1,n} = R_{n+1,n} + \frac{T_{n+1,n} \rho_{n,n+1} T_{n,n+1}}{1 - R_{n,n+1} \rho_{n,n+1}} \text{ pour } 2 \leq n \leq N \\ \rho_{21} = R_{21} \end{cases}$$

### Réponse à une excitation gaussienne

❖ Le spectre d'un transducteur à bande passante gaussienne dépend des paramètres de fréquence centrale et bande passante à  $-6$  dB  $\{f_0, \Delta f_6\}$  :

$$BW_{(f_0, \Delta f_6)} = e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{f - f_0}{\sigma_f} \right)^2} \text{ avec } \sigma_f = \frac{\Delta f_6}{2\sqrt{2 \ln(2)}}$$

Ainsi, la réponse temporelle est donnée par :

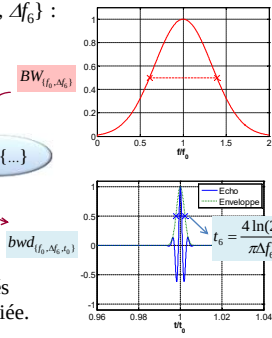
$$s(t) = FT^{-1} \{ BW_{(f_0, \Delta f_6)} R_g D_0 \} \text{ avec } D_0 = e^{-j2\pi f_0 t_0}$$

soit:

$$s(t) = \left\{ A_{ref} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t - t_0}{\sigma_t} \right)^2} \cos(2\pi f_0 (t - t_0)) \right\} * FT^{-1} \{ R_g \}$$

→ Le signal  $s(t)$  résultant contient les échos associés à chacune des couches constituant la structure étudiée.

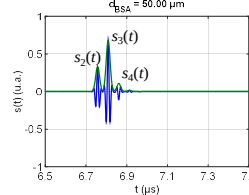
❖ Le traitement des échos par combinaison des méthodes d'inter-corrélation et de transformée de Hilbert, permettent de déduire les caractéristiques de l'échantillon, i.e. vitesse  $c_n$  et atténuation  $\alpha_n$ .



### Microscopie acoustique

#### ❖ Principe de fonctionnement de microscope acoustique

Un transducteur émet une onde ultrasonore à 50 MHz ou plus, sur un échantillon. Les échos réfléchis par les différentes couches sont caractérisés par une amplitude et un temps  $\{A_n, t_n\}$ , respectivement. Les caractéristiques de vitesse, atténuation et impédance acoustique  $\{c_n, \alpha_n, Z_n\}$  de chaque couche peuvent être déduites.



**Dépôt de BSA sur substrat verre:**  $d_{ech} = 50 \mu m$

- ❖ Echo spéculaire de verre:  $s_1(t)$ .
- ❖ Echo spéculaire de BSA:  $s_2(t)$ .
- ❖ Réflexion du fond:  $s_3(t)$ ; d'épaisseur:  $s_4(t)$ .
- ❖ Les caractéristiques ultrasonores associées aux échos informent sur le dépôt de BSA: épaisseur, vitesse, impédance et atténuation.

### Inventaire des formules

❖ Les mesures des amplitudes et des temps de vol  $\{A_n, t_n\}$  associées aux échos donnent l'épaisseur, la vitesse longitudinale, et l'impédance acoustique, pour en déduire l'atténuation, la masse volumique, et le module de compression :

$$d_{ech} = \frac{c_{eau}(t_0 - t_1)}{2} = \frac{c_{ech}(t_2 - t_1)}{2}$$

$$c_{ech} = c_0 \frac{t_0 - t_1}{t_2 - t_1}$$

$$Z_{ech} = Z_{eau} \frac{A_{ref} + A_1}{A_{ref} - A_1}$$

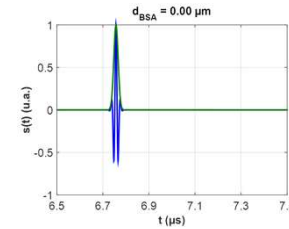
$$A_{ref} = A_0 \frac{Z_{sub} + Z_{eau}}{Z_{sub} - Z_{eau}}$$

$$\alpha_{ech} = \alpha_{eau} + \frac{1}{2d_{ech}} \ln \left( \frac{A_0 \cdot Z_{sub} - Z_{ech}}{A_2 \cdot Z_{sub} + Z_{ech}} \cdot \frac{4Z_{ech}Z_{eau}}{(Z_{ech} + Z_{eau})^2} \cdot \frac{Z_{sub} + Z_{eau}}{Z_{sub} - Z_{eau}} \right)$$

$$\begin{cases} \rho_{ech} = \frac{Z_{ech}}{c_{ech}} \\ K_{ech} = c_{ech} \cdot Z_{ech} \end{cases}$$

## III. Résultats et discussion

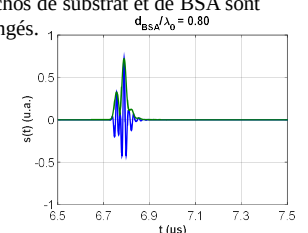
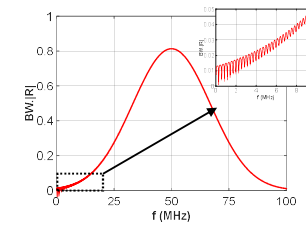
### Configuration: résolution



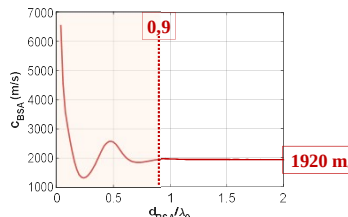
❖ Transducteur :  
Spectre :  $\{f_0, \Delta f_{6, \sigma}\} = \{50 \text{ MHz}, 80\%\}$   
Résolution :  $\Delta z_6 = c_{eau} t_6 / 2 = 16 \mu m$   
Focale :  $F = 5 \text{ mm}$

❖ Sans dépôt, les échos successifs donnent la vitesse dans le substrat. Sur le spectre, via les interférences en basse fréquence:  $c_{sub} = 2d_{sub} \Delta f_{sub} = 5714 \text{ m/s}$

❖ En deçà de la résolution du transducteur, les échos de substrat et de BSA sont mélangés.



### Corrélation entre $s_1(t)$ et $s_2(t)$ : mesures de $\{c_n, \alpha_n\}$



|  | Verre                 | BSA                   |
|--|-----------------------|-----------------------|
| Matériau   | Verre                 | BSA                   |
| Épaisseur $d$ [m]  | 1 mm                  | 30 à 75 $\mu m$       |
| Densité $\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]                                 | 2526                  | 1335                  |
| Vitesse $c_L$ [m.s <sup>-1</sup> ]                                   | 5680                  | 1920                  |
| Impédance $Z$ [MRa]  | 14,3                  | 2,56                  |
| Atténuation $\alpha_{L,lin}$ [Np.m <sup>-1</sup> .Hz <sup>-1</sup> ] | 11,1.10 <sup>-6</sup> | 32,7.10 <sup>-6</sup> |

- ❖ La mesure de la vitesse se stabilise dès lors que les échos se dissocient.
- ❖ Des améliorations sont à venir avec un fenêtrage de l'écho d'intérêt.
- ❖ L'atténuation a été prise en compte via une hypothèse de dépendance fréquentielle linéaire, avec des pertes  $\delta_c = 1\%$  intégrées dans la vitesse  $\{c_n = \text{Re}\{c_n\} \cdot (1 + i \cdot \delta_c)\}$
- $\alpha_n(f) = \alpha_n^0 f^n$  avec  $n = 1$ , soit  $\alpha_n(f) = \frac{2\pi\delta_c}{c_L} f$  et  $\alpha_{L,lin} = \frac{\alpha_n(f)}{f} = \frac{2\pi\delta_c}{c_L}$
- ❖ Les dépendances fréquentielles de  $\{c_n, \alpha_n\}$  sont à affiner.
- ❖ L'influence du niveau de bruit reste à quantifier.