



**HAL**  
open science

# Méthode de caractérisation des propriétés mécaniques de milieux initialement liquides ou mous par des mesures de réflexion d'ondes ultrasonores sous incidences obliques.

Stéphane Labouret, J Frohly

► **To cite this version:**

Stéphane Labouret, J Frohly. Méthode de caractérisation des propriétés mécaniques de milieux initialement liquides ou mous par des mesures de réflexion d'ondes ultrasonores sous incidences obliques.. JSUP5, 5ème Journées Sonochimie Ultrasons et Procédé, May 2019, Avignon, France. hal-04929659

**HAL Id: hal-04929659**

**<https://hal.science/hal-04929659v1>**

Submitted on 4 Feb 2025

**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.

# Méthode de caractérisation de propriétés mécaniques de milieux initialement liquides ou mous par des mesures de réflexion d'ondes ultrasonores sous incidences obliques

S. Labouret<sup>1,2</sup>, J. Frohly<sup>2</sup>

1) LAGEPP, Université Lyon 1

2) IEMN-OAE, Université de valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

courriel : stephane.labouret@univ-lyon1.fr

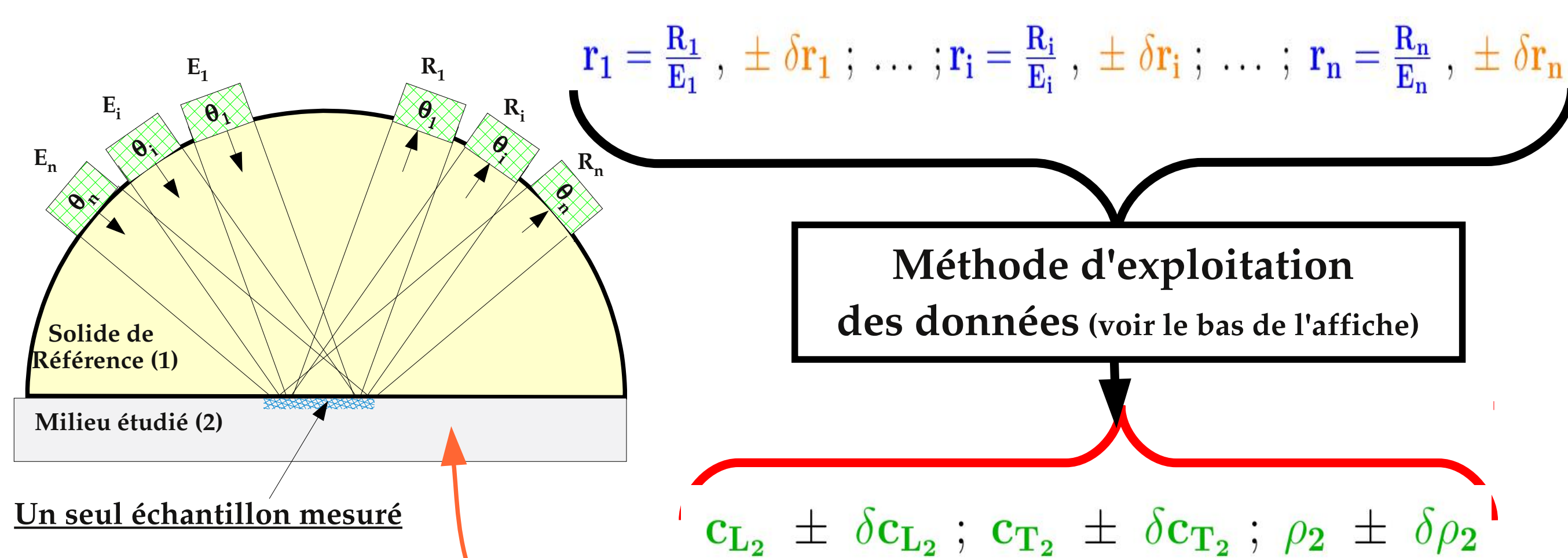
La détermination des propriétés mécaniques d'un milieu (module d'Young, module de cisaillement pour les solides ou viscosité pour les liquides, la masse volumique) permet de suivre l'évolution de milieux qui évoluent dans le temps du liquide le gel ou le solide. Une méthode ultrasonore classique (cadre bleu ci-dessous) associant mesure par transmission dans le milieu et par réflexion en incidence normale permet la détermination de ces grandeurs, mais que pour des milieux homogènes car les mesures se font sur deux échantillons distincts.

Nous proposons une méthode [1] (voir le cadre orange ci-dessous) qui s'appuie sur les mesures de coefficients de réflexion obtenues sous divers angles d'incidence (longitudinale ou transversale) ainsi que sur le choix d'incertitudes liés à ces mesures. Elle permet la détermination numérique d'intervalles solutions des célérités des ondes dans le milieu étudié ainsi que sa masse volumique, puis des propriétés mécaniques. Les méthodes antérieures [2] basées sur les coefficients de réflexions ne fournissaient que deux des trois grandeurs recherchées.

Ne mesurant qu'un seul échantillon du milieu, elle est applicable à des milieux inhomogènes. Une demande de brevet est en cours d'examen[3].

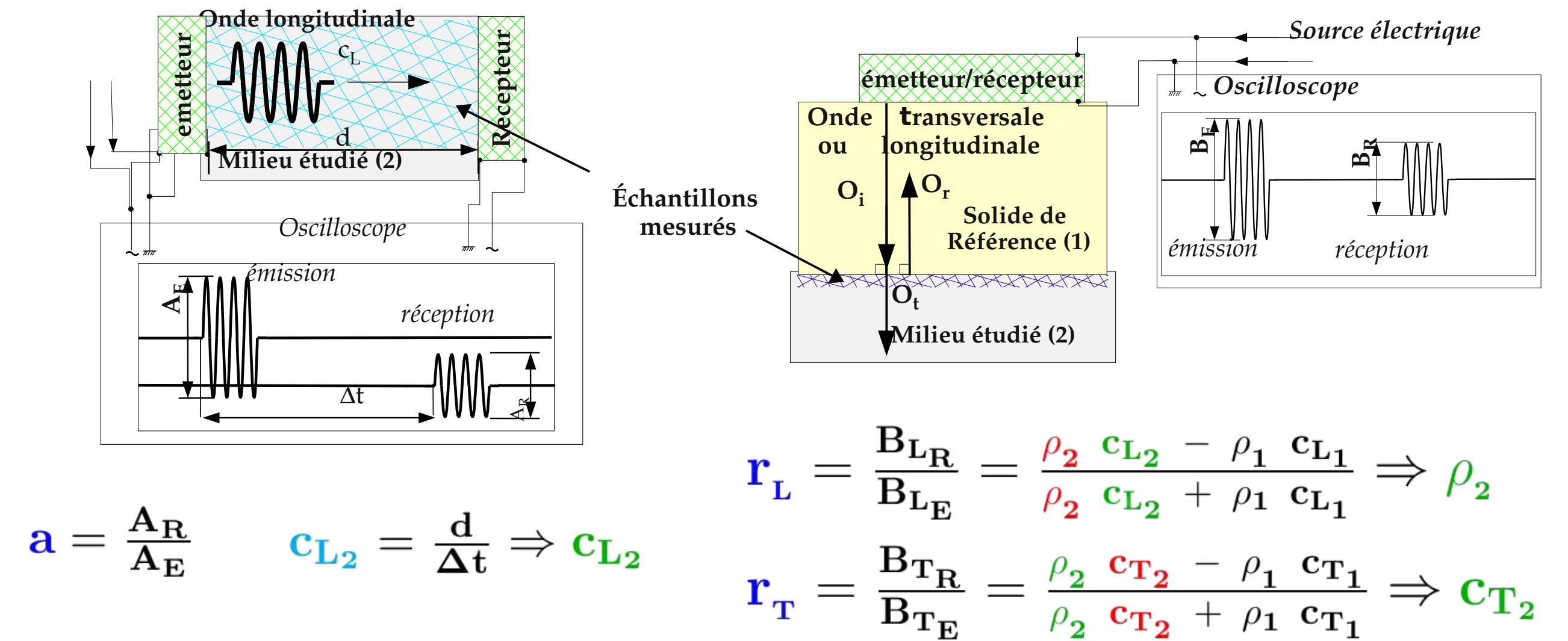
## Méthode proposée

Méthode de n coefficients de réflexions  
Choix de leurs intervalles d'incertitudes respectifs



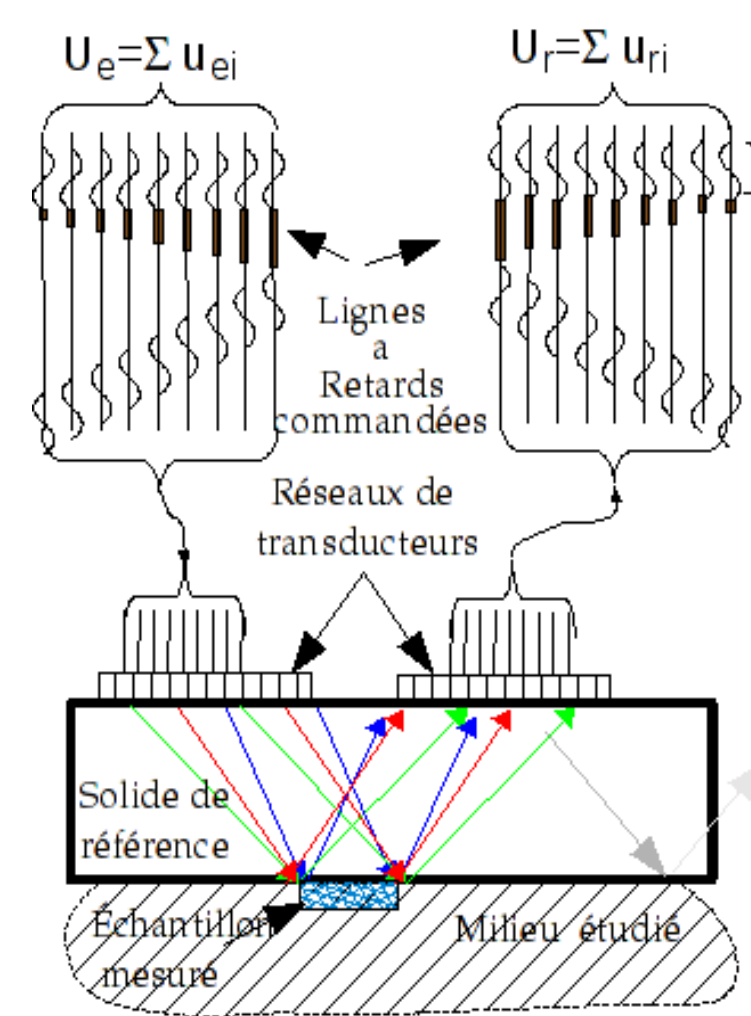
## Méthode classique

Mesure de la célérité d'onde longitudinale par transmission  
Mesure incidence normale des coefficients de réflexion des ondes longitudinale et transversale



Les mesures portent sur des échantillons différents  
La méthode est limitée aux milieux homogènes

Réalisation avec des réseaux de transducteurs, et commande électronique des retards des ondes émises par chaque éléments du réseau (schéma ci-contre)

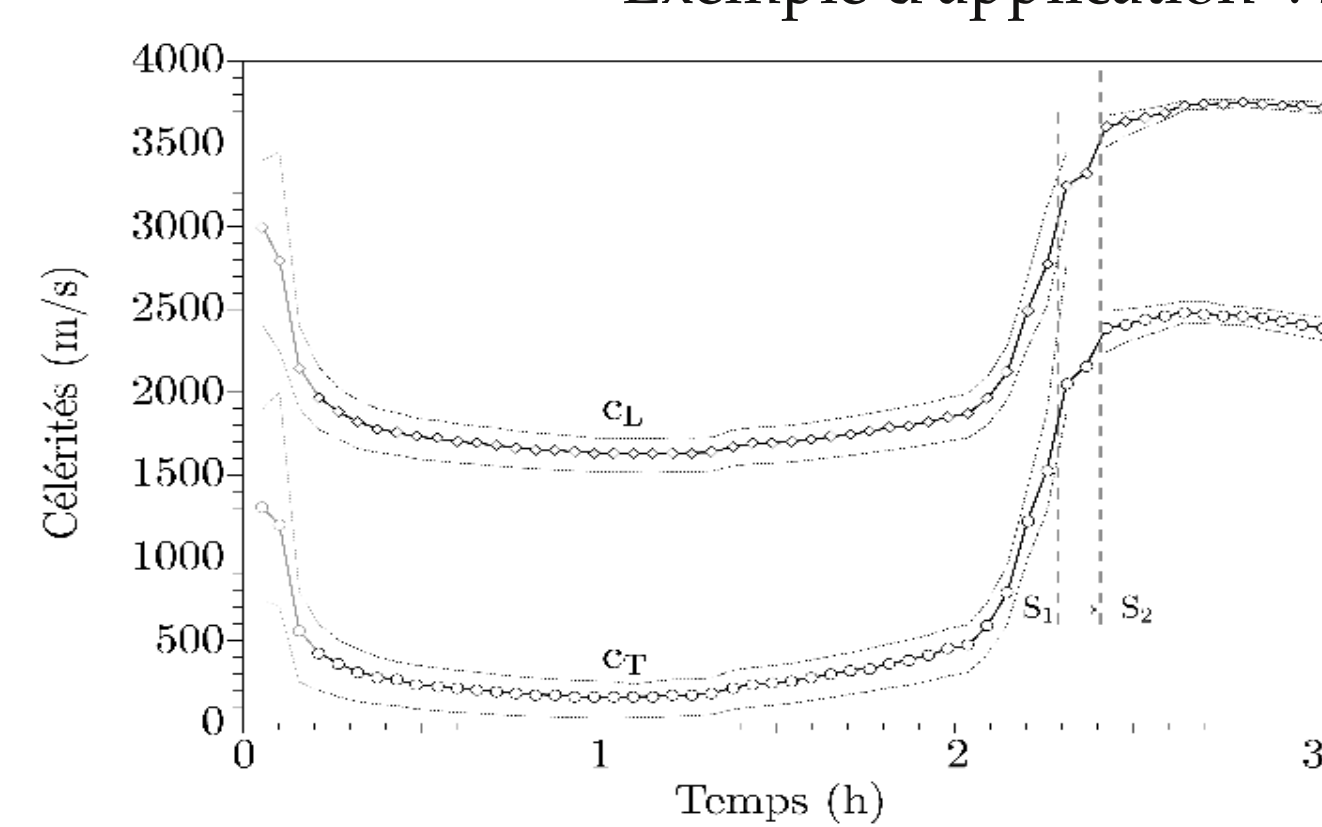


- choix des angles d'incidence et l'augmentation de leur nombre pour affiner les mesures ;
- focalisation sur de petites zones de mesures sur l'interface ;
- étude de milieu non-homogène en balayant l'interface (onde focalisé ou non).

Réalisation avec des éléments de transducteur simples : angles de mesures fixes ;

- des transducteurs ultrasonores simples pré-orientés ;
- l'électronique associée aux mesures est potentiellement simple : redresseur / échantillonneur-bloqueur / convertisseur analogique-numérique en tension quasi-continue ;
- électronique à bas coût même en haute fréquence (=> GHz) pour de petites sondes (il n'est pas nécessaire de numériser un signal haute fréquence) ;
- un seul ordinateur pour traiter les mesures de plusieurs sondes ;
- simplicité et faible coût des sondes ;
- possibilité de mesures rhéologiques dans le domaine linéaire.

Exemple d'application : suivi de la prise de ciment [2]



Suivi de la prise de ciment par deux sondes du type ci-dessous sous des angles d'incidence de 35° et 45° avec une onde émise en continue.

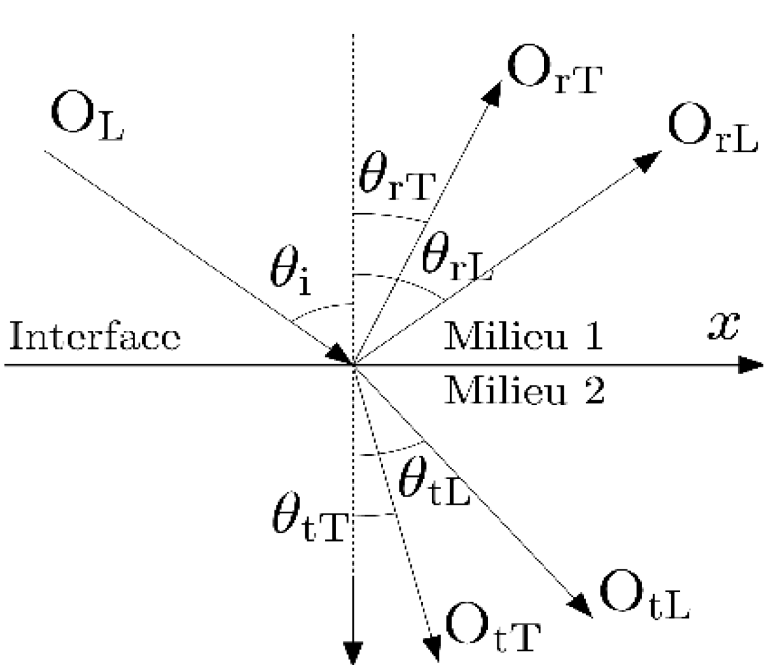
Évolution des célérités des ondes longitudinales et transversales ; elles correspondent à deux solutions mathématiques S1 et S2 correspondant successivement à l'état du milieu. La masse volumique (1830 kg/m<sup>3</sup>) a été mesurée une fois le ciment solidifié.



Conclusion : la méthode proposée permet une caractérisation mécanique locale de milieux homogènes ou non, tant pour le suivi de procédés industriels que pour des études de caractérisation des milieux.

Référence : [1] Labouret S., Frohly J., Méthode ultrasonore de caractérisation des propriétés mécaniques au cours du temps par la mesure de coefficients de réflexions sous incidence oblique : application à la prise de ciment ; Acta Acustica united with Acustica. . Vol. 103,(2017) 219-226 (DOI 10.3813/AAA919050).  
[2] Greenwood M. S., Harris R. V. Brevet Etats Unis, n° US 5886250A (1999).  
[3] Labouret S., Frohly J., demande de brevet, Dispositif et méthode de mesure pour la détermination des propriétés mécaniques de milieux initialement liquides ou mous et de leur évolutions dans le temps: OMPI, patentscope : [https://patentscope.wipo.int/search/fr/detail.jsf?docId=WO2018150109&tab=PCTBIBLIO&office=&prevFilter=&sortOption=Pertinence&queryString=FR\\_ALLTX%3A%28labouret%29&recNum=2&maxRec=4](https://patentscope.wipo.int/search/fr/detail.jsf?docId=WO2018150109&tab=PCTBIBLIO&office=&prevFilter=&sortOption=Pertinence&queryString=FR_ALLTX%3A%28labouret%29&recNum=2&maxRec=4)

## Méthode d'exploitation des données : exemple pour une onde incidente longitudinale



La continuité des contraintes et des déplacements de part et d'autre de l'interface aboutit à un système de 4 équations :

Grandeur mesurée    Grandeurs inconnues recherchées    Grandeurs inconnues non recherchées

$$M_L(\theta_i) X_L(\theta_i) = Y_L(\theta_i) ; \quad X_L(\theta_i) = \begin{bmatrix} r_L(\theta_i) \\ r_T(\theta_i) \\ t_L(\theta_i) \\ t_T(\theta_i) \end{bmatrix} ; \quad Y_L(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) \\ \lambda_1 + 2\mu_1 \cos^2(\theta_i) \\ \mu_1 \sin(2\theta_i) \end{bmatrix} ;$$

$\tilde{r}_{\theta_i}(c_{2L}, c_{2T}, \rho_2)$  Coefficient  $r_L(\theta_i)$  solution du système pour  $\{c_{2L}, c_{2T}, \rho_2\}$

$$M_L(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\frac{c_{1T}}{c_{1L}} \sin(\theta_i) & \cos(\arcsin(\frac{c_{2L}}{c_{1L}} \sin(\theta_i))) & -\frac{c_{2T}}{c_{1L}} \sin(\theta_i) \\ -\sin(\theta_i) & -\cos(\arcsin(\frac{c_{2L}}{c_{1L}} \sin(\theta_i))) & \frac{c_{2L}}{c_{1L}} \sin(\theta_i) & \cos(\arcsin(\frac{c_{2T}}{c_{1L}} \sin(\theta_i))) \\ -(\lambda_1 + 2\mu_1 \cos^2(\theta_i)) & \mu_1 \frac{c_{1L}}{c_{1T}} \sin(2 \arcsin(\frac{c_{1L}}{c_{1L}} \sin(\theta_i))) & \frac{c_{1L}}{c_{2L}} (\rho_2 (c_{2L}^2 - 2c_{2T}^2) + 2\rho_2 c_{2T}^2 \cos^2(\arcsin(\frac{c_{2L}}{c_{1L}} \sin(\theta_i)))) & -\rho_2 c_{2T} c_{1L} \sin(2 \arcsin(\frac{c_{1L}}{c_{1L}} \sin(\theta_i))) \\ \mu_1 \sin(2\theta_i) & \mu_1 \frac{c_{1L}}{c_{1T}} \cos(2 \arcsin(\frac{c_{1L}}{c_{1L}} \sin(\theta_i))) & \frac{c_{1L}}{\rho_2} \frac{c_{2L}^2}{c_{2T}^2} \sin(2 \arcsin(\frac{c_{2L}}{c_{1L}} \sin(\theta_i))) & \rho_2 c_{2T} c_{1L} \cos(2 \arcsin(\frac{c_{2L}}{c_{1L}} \sin(\theta_i))) \end{bmatrix}$$

## Conditions pour la résolution

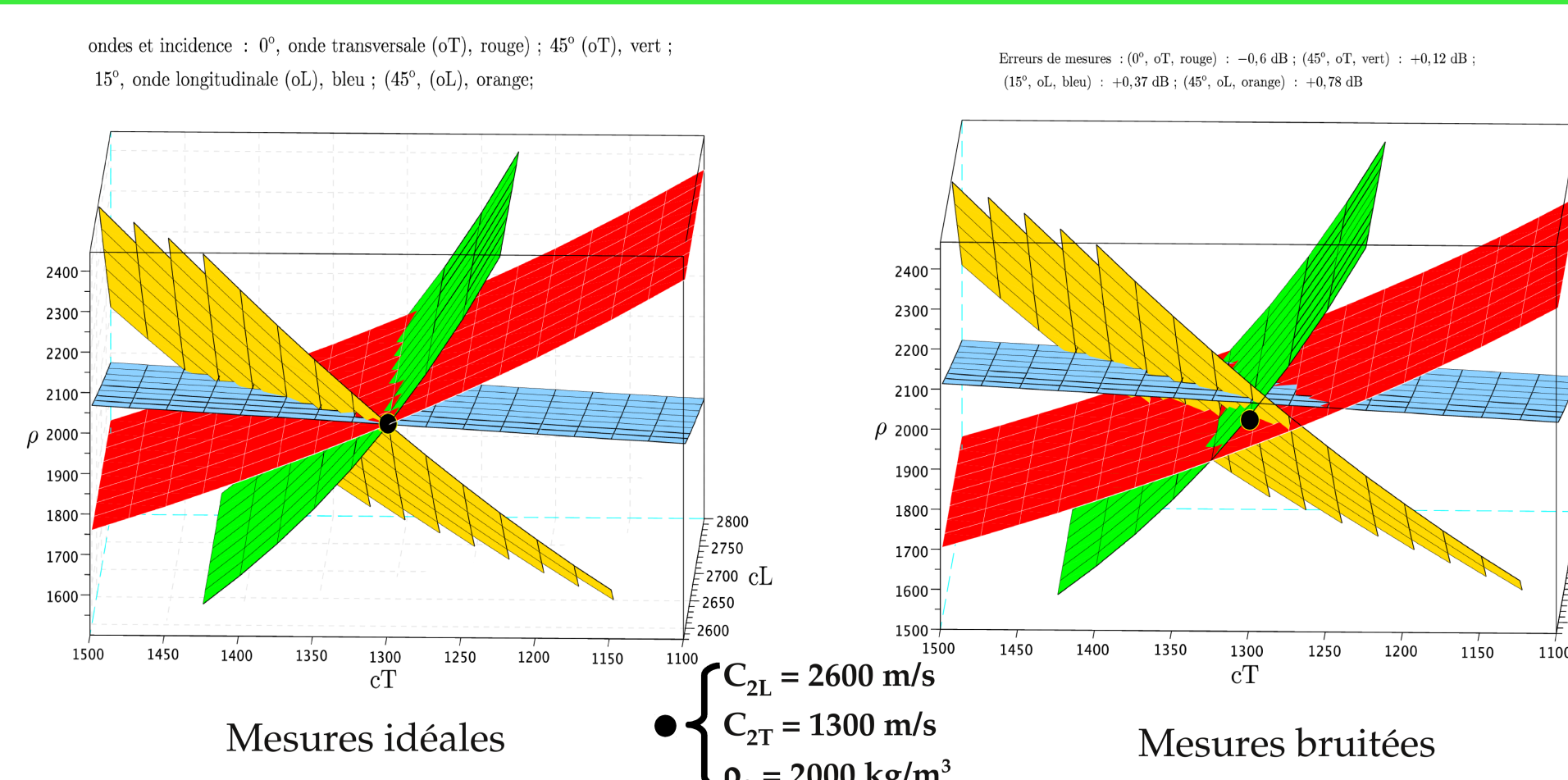
Les systèmes d'équations associés à la réflexion de chaque mesure distinct (ici, par leurs angles d'incidences) sont agrégés dans un système complet.

$$\begin{cases} M_L(\theta_1) X_L(\theta_1) = Y_L(\theta_1) \\ \dots \\ M_L(\theta_i) X_L(\theta_i) = Y_L(\theta_i) \\ \dots \\ M_L(\theta_n) X_L(\theta_n) = Y_L(\theta_n) \end{cases} \quad (1)$$

Chaque sous système apporte 3 inconnues nouvelles en plus des 3 grandeurs recherchées et 4 équations indépendantes ; le nombre minimum de mesures (12 équations, 12 inconnues) pour espérer résoudre les trois grandeurs recherchées est trois. Une quatrième mesure est utile pour éviter les solutions multiples.

La résolution de (1) revient à rechercher les intersections des sous-systèmes, ci-dessous pour les 3 coefficients de réflexion mesurés idéalement, avec sur un milieu dont les propriétés  $\{c_{2Lo}, c_{2To}, \rho_{2o}\}$  ont connues.

$$\begin{cases} \tilde{r}_{\theta_1}(c_{2L}, c_{2T}, \rho_2) = \tilde{r}_{\theta_1}(c_{2Lo}, c_{2To}, \rho_{2o}) \\ \tilde{r}_{\theta_2}(c_{2L}, c_{2T}, \rho_2) = \tilde{r}_{\theta_2}(c_{2Lo}, c_{2To}, \rho_{2o}) \\ \tilde{r}_{\theta_3}(c_{2L}, c_{2T}, \rho_2) = \tilde{r}_{\theta_3}(c_{2Lo}, c_{2To}, \rho_{2o}) \end{cases}$$



En pratique, le système contient des erreurs, des mesures  $\tilde{r}_{\theta_i}$ , mais aussi du modèle par rapport à la réalité ; sa résolution diverge et les solutions éventuellement trouvées ne sont pas physiquement acceptables.

$$\begin{cases} \tilde{r}_{\theta_1}(c_{2L}, c_{2T}, \rho_2) = \tilde{r}_{\theta_1} \\ \tilde{r}_{\theta_2}(c_{2L}, c_{2T}, \rho_2) = \tilde{r}_{\theta_2} \\ \tilde{r}_{\theta_3}(c_{2L}, c_{2T}, \rho_2) = \tilde{r}_{\theta_3} \end{cases} \quad \begin{cases} \tilde{r}_{\theta_1} - \delta r_{\theta_1} \leq \tilde{r}_{\theta_1}(c_{2L}, c_{2T}, \rho_2) \leq \tilde{r}_{\theta_1} + \delta r_{\theta_1} \\ \tilde{r}_{\theta_2} - \delta r_{\theta_2} \leq \tilde{r}_{\theta_2}(c_{2L}, c_{2T}, \rho_2) \leq \tilde{r}_{\theta_2} + \delta r_{\theta_2} \\ \tilde{r}_{\theta_3} - \delta r_{\theta_3} \leq \tilde{r}_{\theta_3}(c_{2L}, c_{2T}, \rho_2) \leq \tilde{r}_{\theta_3} + \delta r_{\theta_3} \end{cases}$$

Il est ainsi nécessaire de considérer ces erreurs, qui sont choisies en tenant compte de l'erreur expérimentale, ce qui aboutit à transformer le système d'équation en un système d'inéquations qui est résolue numériquement par une approche d'inspiration « graphique ».