

Journée du GT CEND du Bois – Tarbes

21 Octobre 2025

Caractérisation élastique complète de petits échantillons anisotropes par interférométrie laser

K. Toulgoat, G. Sapey, F. Augereau, D. Laux, O. Arnould, E. Rosenkrantz

Co-financement :

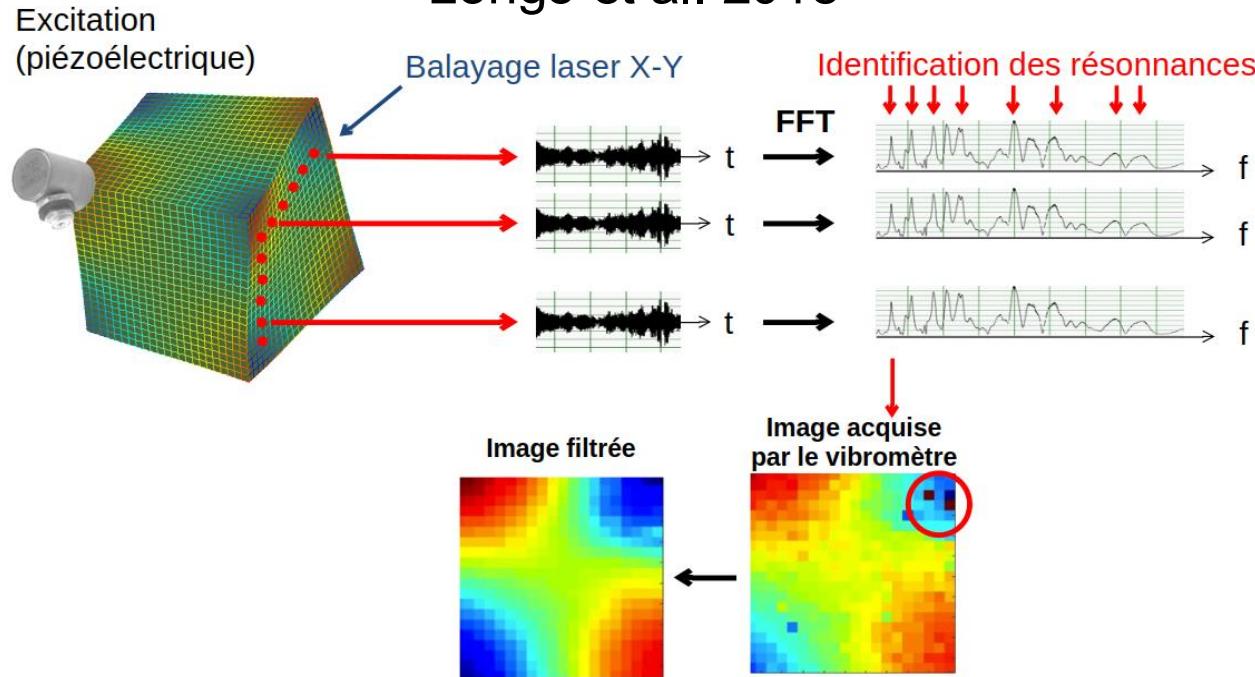
Région Occitanie

Ecole doctorale I2S



Méthodes ultrasonores de caractérisation élastiques d'échantillons de bois

Reasonant Ultrasound Spectroscopy
Longo et al. 2018

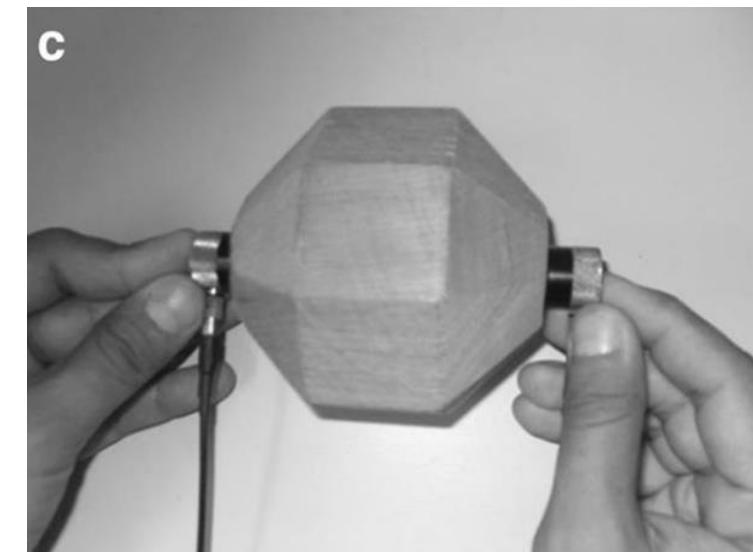


Modules de cisaillement très sensibles

Certains modules d'élasticité peu sensibles mais estimables

Manque de sensibilité au coefficient de Poisson hors plan

Mesures ultrasonores par transmission au contact



Gonçalves et al. 2014

1 Direction de propagation par échantillon

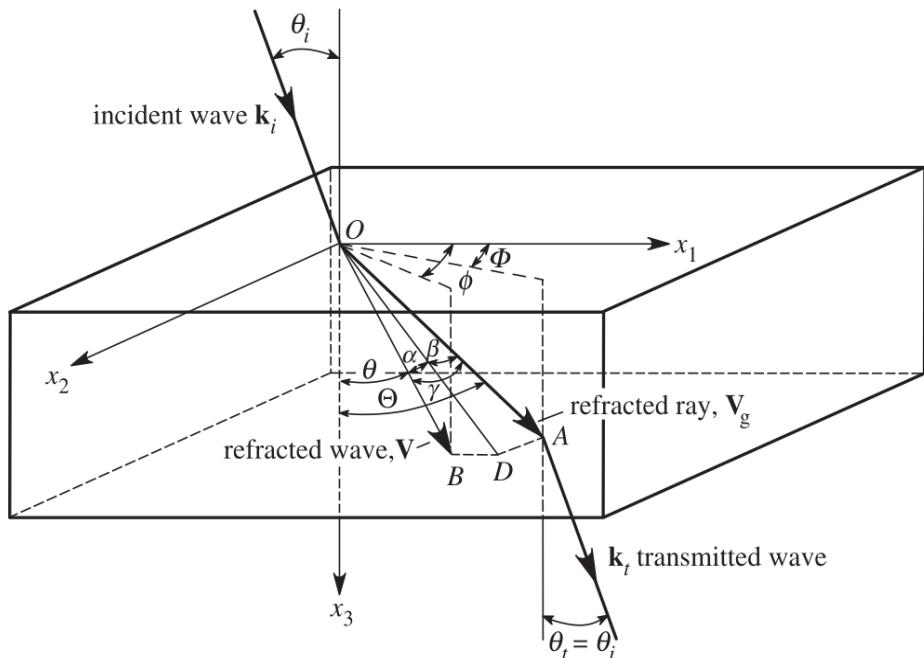
Ambigüité $V_p - V_g$

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix}$$

$$\rho * V_{XX}^2 = C_{XX}$$

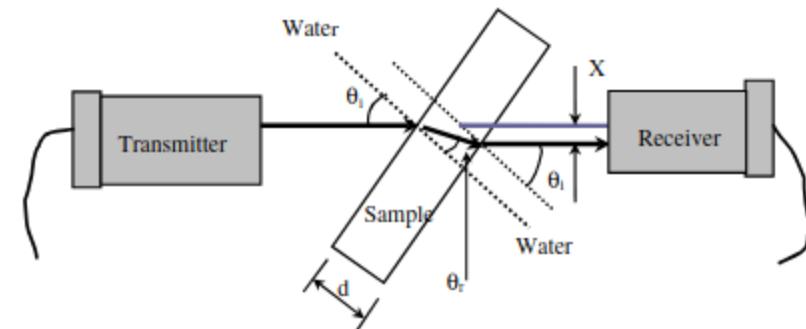
Méthodes ultrasonores de caractérisation élastiques pour d'autres matériaux anisotropes

Mesures de vitesse de groupe ultrasonores par transmission (Rokhlin 2011)



Secteur angulaire limité par la géométrie de l'échantillon

Mesures de vitesse de phase ultrasonores par goniométrie (Reddy et al. 2004)

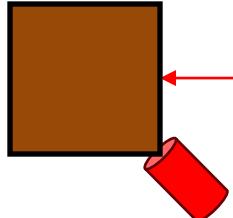


Secteur angulaire aussi limité
Mesure en immersion

Banc expérimental permettant un scan angulaire de la face d'un échantillon

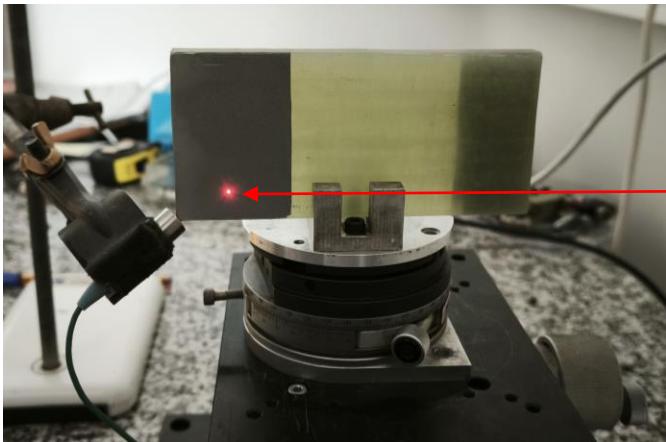
Scan angulaire de l'échantillon

Echantillon



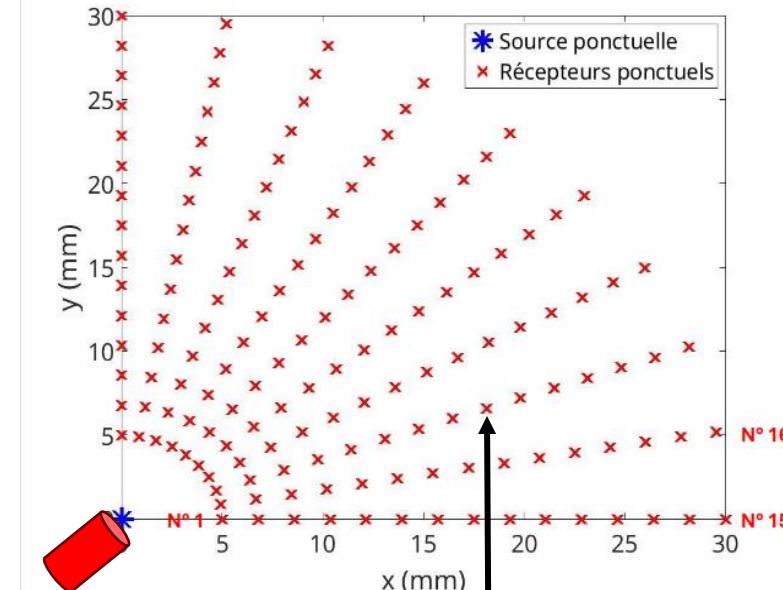
Sonde Ultrasonore

Interféromètre laser placé sur une plateforme motorisée



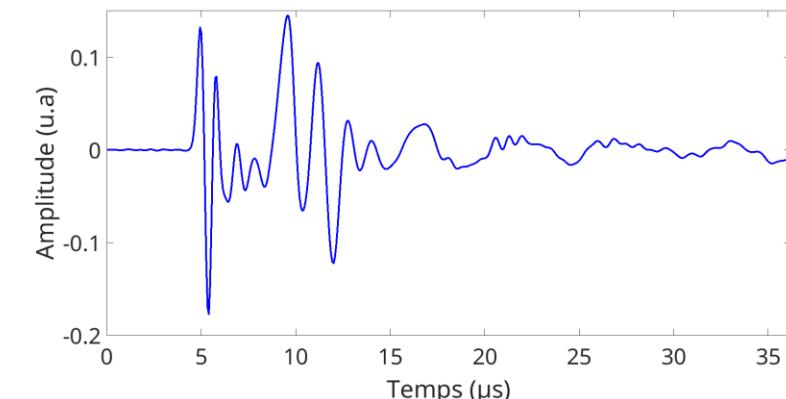
Ligne de récepteurs

à $\theta = 90^\circ$

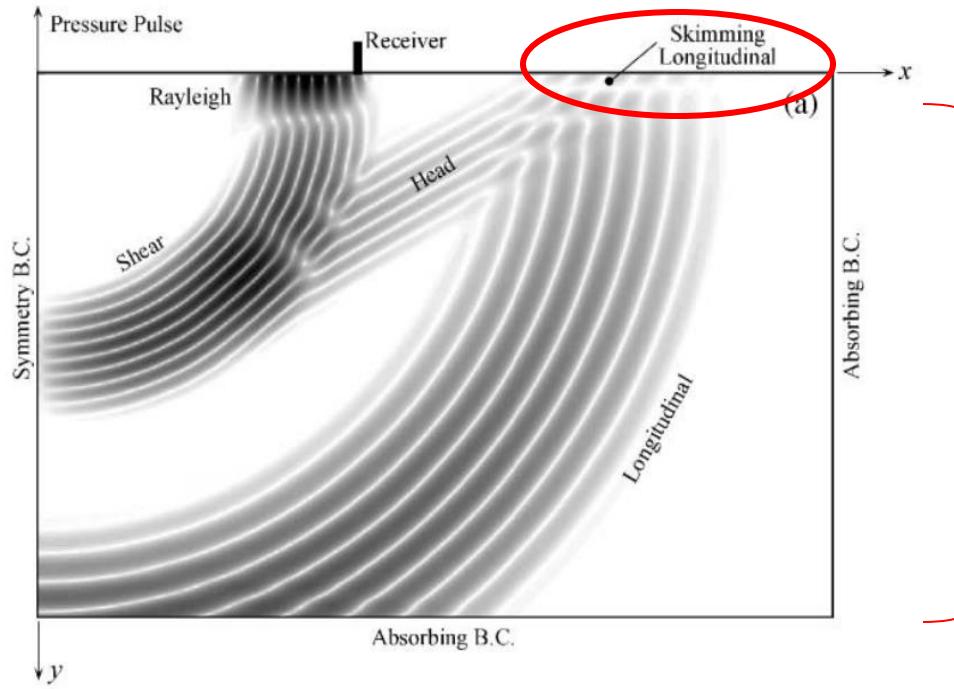


Ligne de récepteurs
à $\theta = 0^\circ$

A-scan



Les différents types d'onde ultrasonore



Hassan et al. 2002

Ondes présentes en surface de l'échantillon

Ondes présentes dans le volume de l'échantillon

B-scan simulé avec récepteurs à la surface

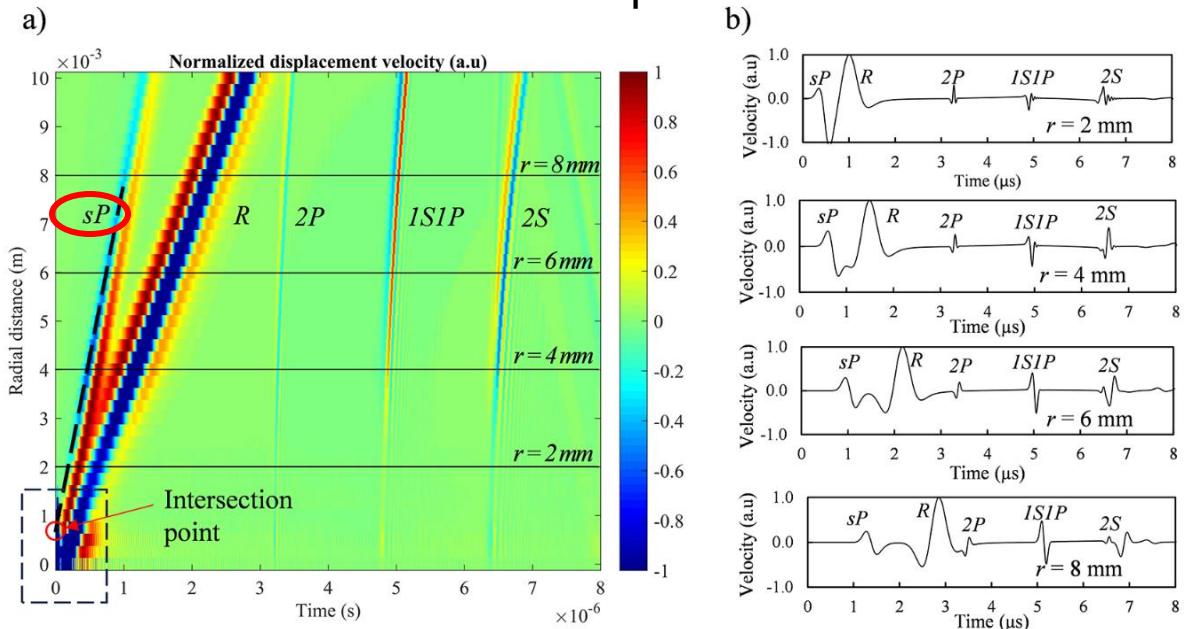
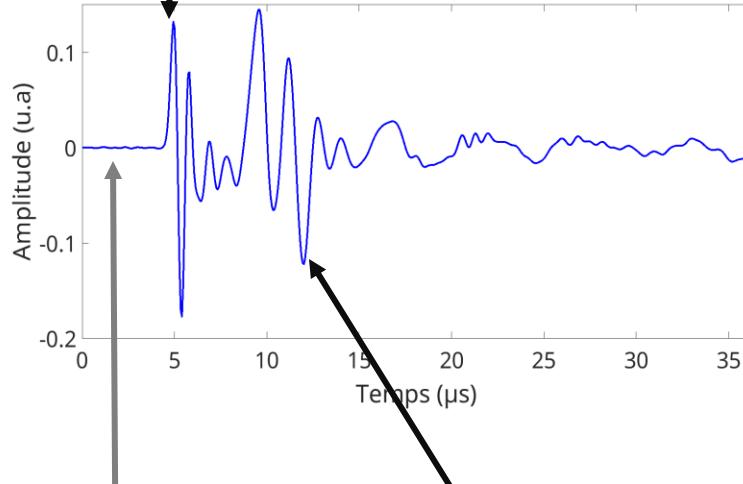


Figure 3. (a) Time-position image of the normalized displacement velocity obtained from simulation; (b) simulated waveforms extracted from time-position image

Visualisation des données par gather (B-scan)

Gather expérimental du PMMA (isotrope) et du composite UD (plan 1-3)

Amplitude > 0
=> Pixel blanc



Amplitude ≈ 0
=> Pixel gris

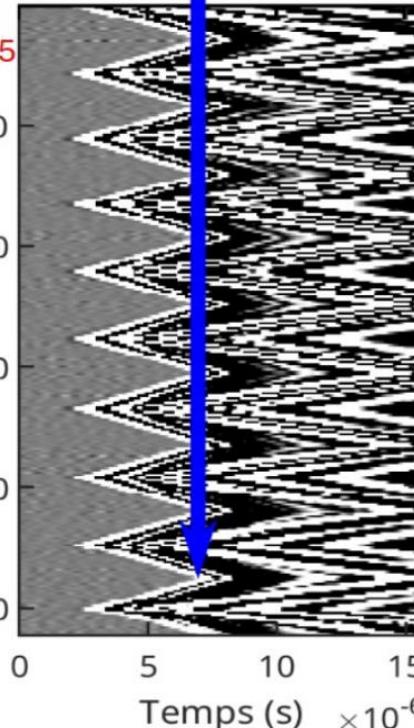
Ligne de récepteurs
à $\theta = 0^\circ$

Ligne de récepteurs
à $\theta = 90^\circ$

{
N° 1
N° 15}

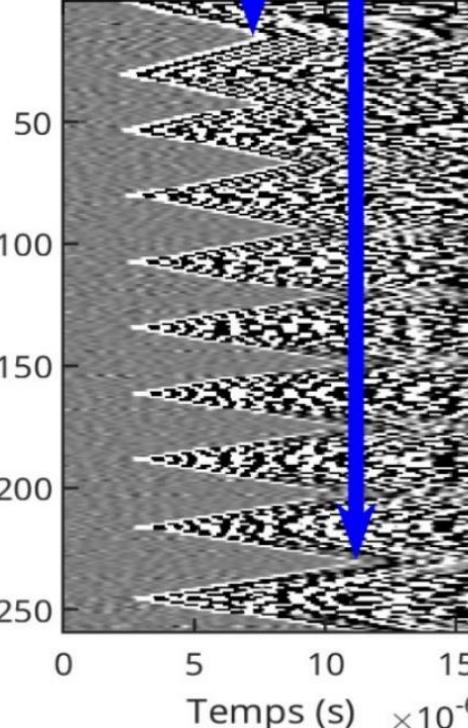
$$t_{\theta=0^\circ} = t_{\theta=85^\circ}$$

Numéro récepteur



$$t_{\theta=0^\circ} \neq t_{\theta=85^\circ}$$

Numéro récepteur



Le traitement du gather permet de mesurer la vitesse de propagation dans différentes directions

Relation entre les vitesses ultrasonores en fonction de la direction de propagation et les constantes élastiques

Modèle analytique de la vitesse de phase ultrasonore quasi-longitudinale

$$2 * \rho * V_{PQL}^2(\theta_p) = G_{22} + G_{33} + \sqrt{(G_{22} - G_{33})^2 + 4 * G_{23}^2}$$

$$G_{22} = C_{22} * \sin^2(\theta_p) + C_{44} * \cos^2(\theta_p)$$

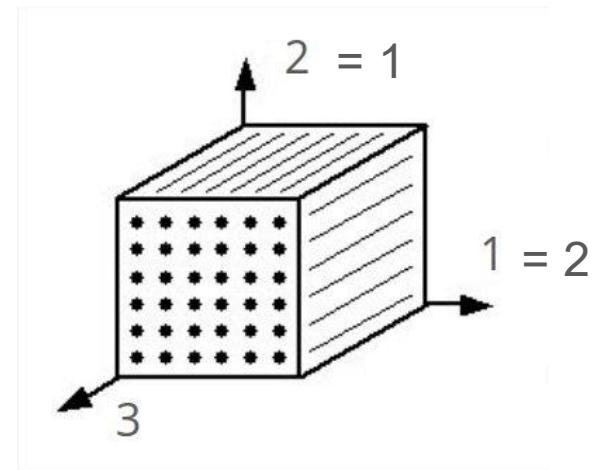
$$G_{33} = C_{44} * \sin^2(\theta_p) + C_{33} * \cos^2(\theta_p)$$

$$G_{23} = (C_{23} + C_{44}) * \sin(\theta_p) * \cos(\theta_p)$$

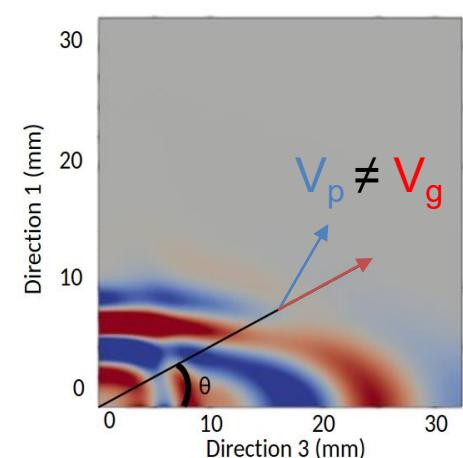
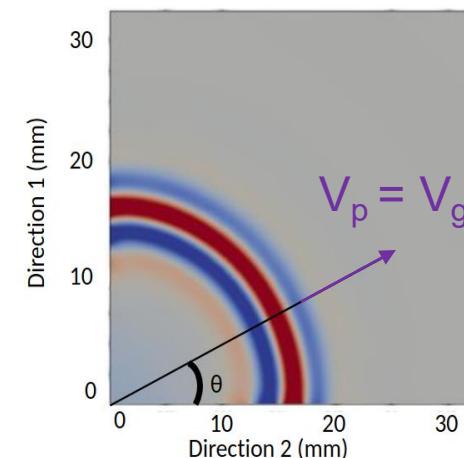
Avec G_{ij} les tenseurs de Christoffel



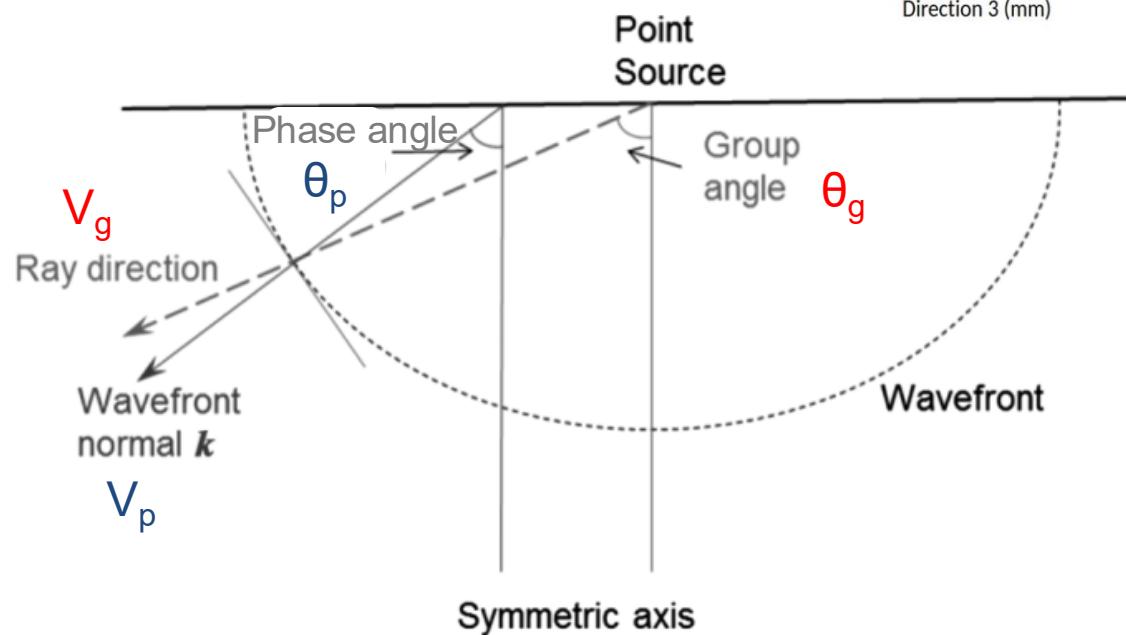
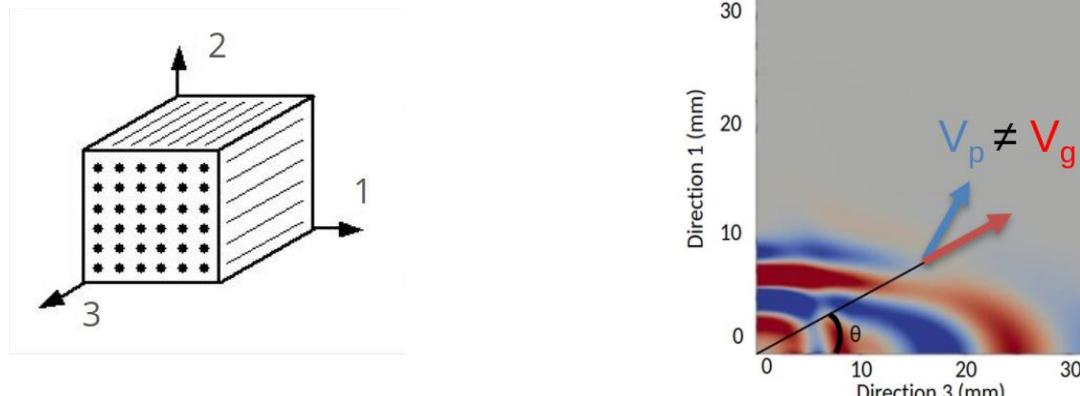
Détermination des C_{ij} à partir d'une mesure d'une vitesse ultrasonore en fonction de la direction de propagation θ (ajustement par méthode inverse)



Simulation de la propagation des fronts d'onde ultrasonore dans le composite UD



Passage de la vitesse de phase à la vitesse de groupe



Abell et al. 2014

- La vitesse de phase est la vitesse normale au front d'onde V_p
- La vitesse de groupe est celle mesurée lors des expérimentations et correspond au trajet direct Source – Front d'onde V_g
- Dans le cas d'un matériau anisotrope non dispersif, on a : $V_p = V_g$ uniquement dans les axes principaux de symétrie



Equation de Christoffel => V_p
Expérimentalement => V_g

Différence entre la vitesse de phase V_p et la vitesse de groupe V_g

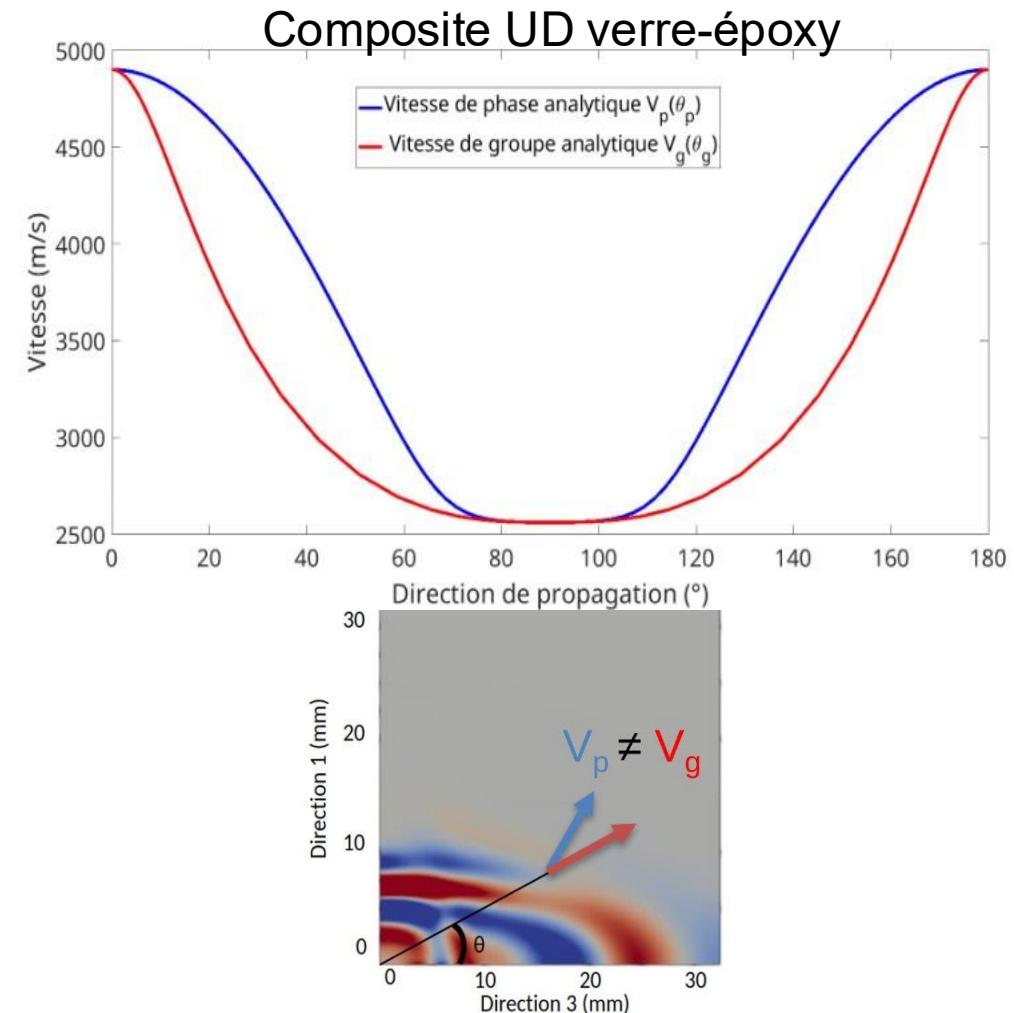
1) Passage de l'angle de phase θ_p
à l'angle de groupe θ_g

$$\tan(\theta_g) = \frac{V_{PQL}(\theta_p) * \sin(\theta_p) + \frac{dV_{PQL}(\theta_p)}{d\theta_p} * \cos(\theta_p)}{V_{PQL}(\theta_p) * \cos(\theta_p) - \frac{dV_{PQL}(\theta_p)}{d\theta_p} * \sin(\theta_p)}$$

2) Passage de la vitesse de phase V_p
à la vitesse de groupe V_g

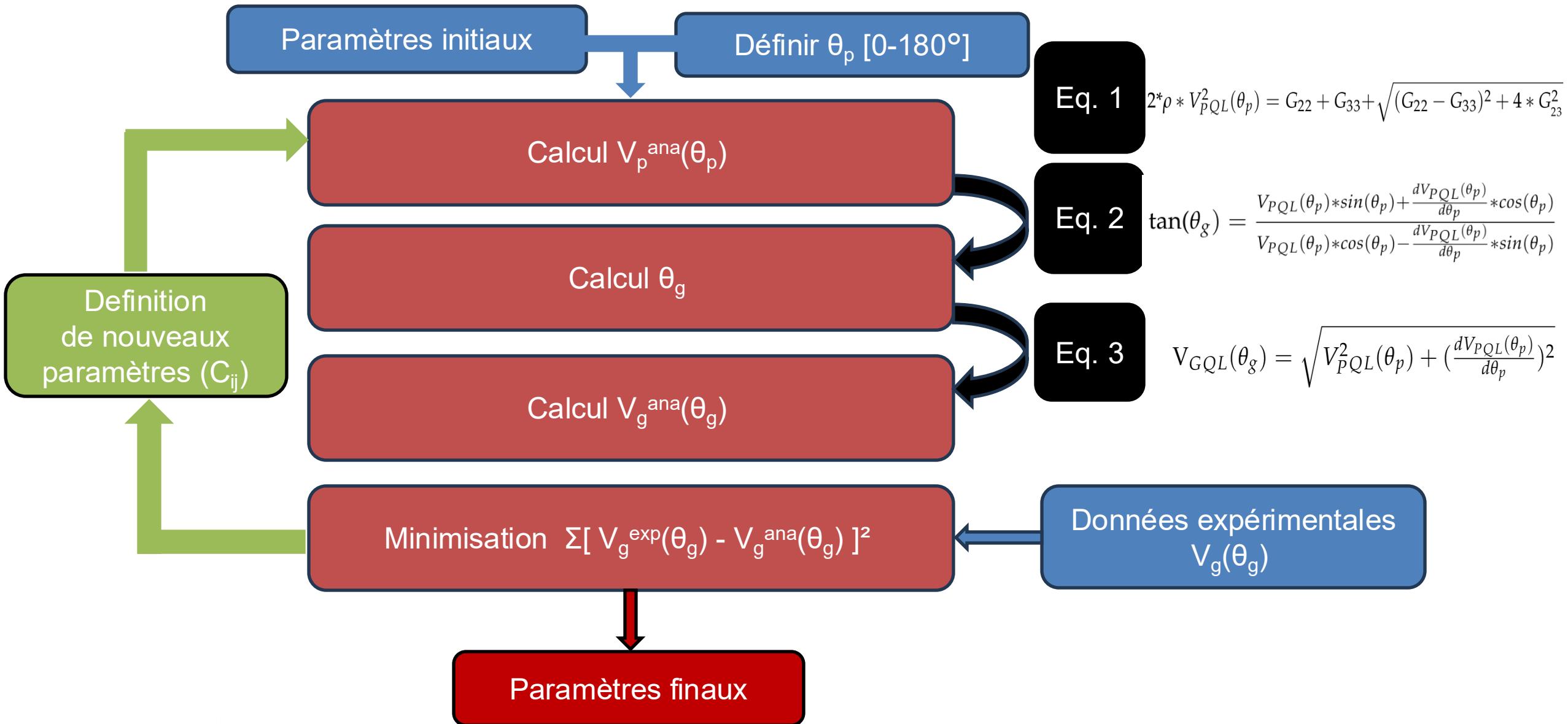
$$V_{GQL}(\theta_g) = \sqrt{V_{PQL}^2(\theta_p) + \left(\frac{dV_{PQL}(\theta_p)}{d\theta_p}\right)^2}$$

Abell et al. 2014



Identification des C_{ij} par minimisation de l'erreur sur les vitesses de groupe au sens des moindres carrés

Stratégie d'estimation des constantes élastiques à partir de la vitesse de groupe V_g



Estimation des constantes élastiques

Modèle analytique de la vitesse de phase ultrasonore quasi-longitudinale

$$2 * \rho * V_{PQL}^2(\theta_p) = G_{22} + G_{33} + \sqrt{(G_{22} - G_{33})^2 + 4 * G_{23}^2}$$

$$G_{22} = C_{22} * \sin^2(\theta_p) + C_{44} * \cos^2(\theta_p)$$

$$G_{33} = C_{44} * \sin^2(\theta_p) + C_{33} * \cos^2(\theta_p)$$

$$G_{23} = (C_{23} + C_{44}) * \sin(\theta_p) * \cos(\theta_p)$$

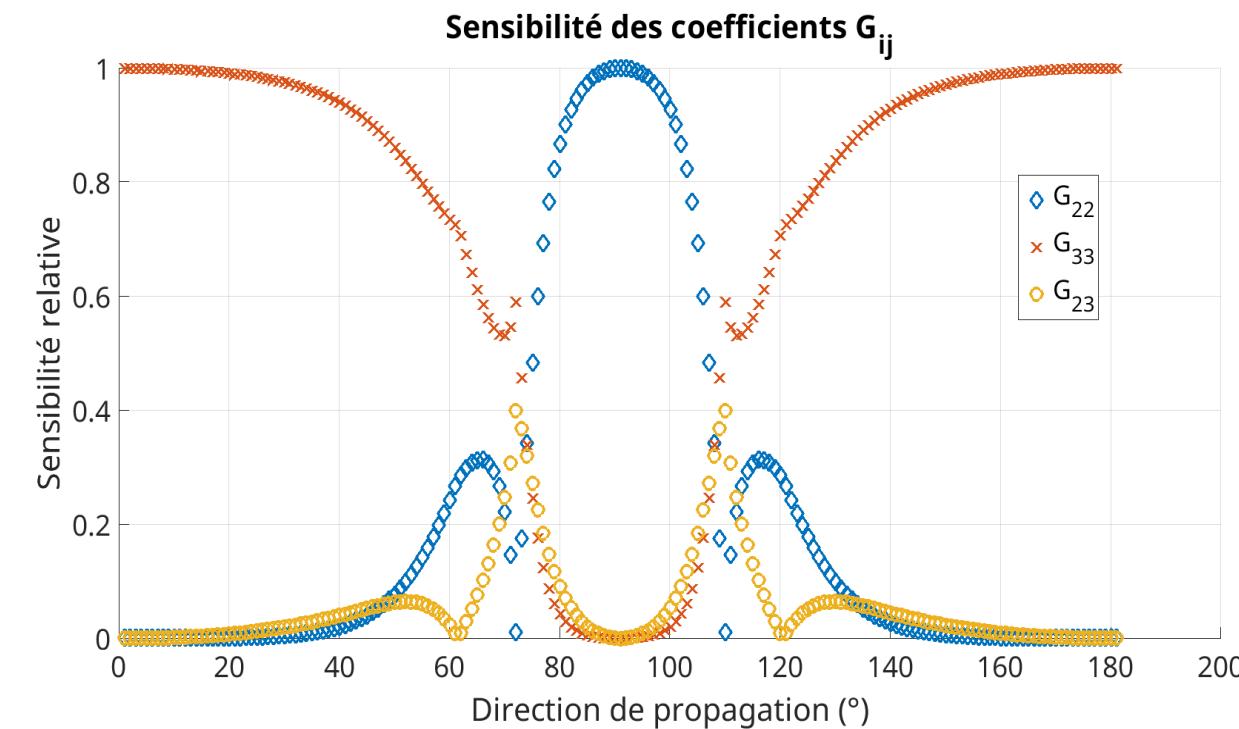
$$C_{22} = G_{22}(\theta_p = 90)$$

$$C_{33} = G_{33}(\theta_p = 0)$$

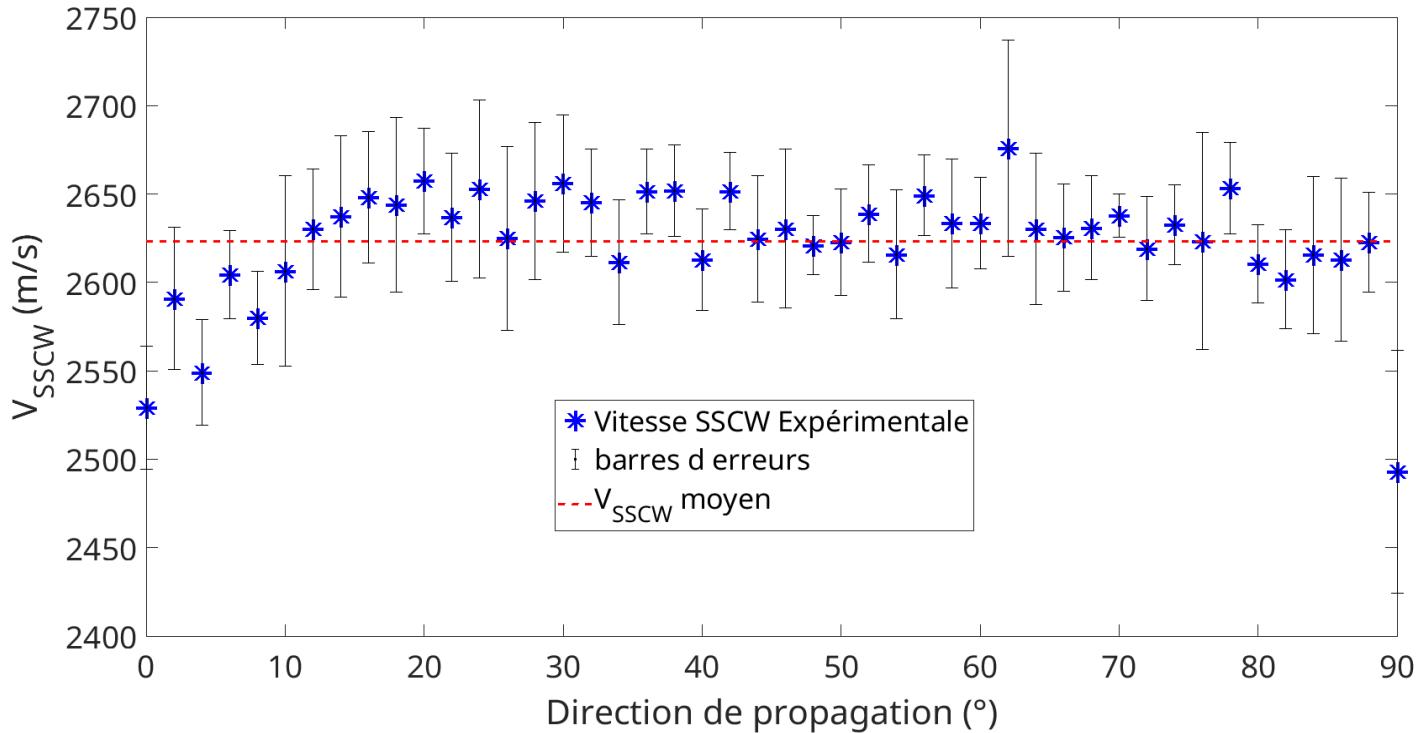
$$C_{44} = \frac{1}{2} * (G_{22}(\theta_p = 0) + G_{33}(\theta_p = 90))$$

C_{23} est obtenu avec G_{23} dans n'importe quelle direction de propagation en connaissant C_{44}

Influence de $G_{ij}(\theta)$ sur $v(\theta)$



Mesure expérimentale sur un cube de PMMA coulé (Altuglass™)



La vitesse ultrasonore est constante
en fonction de la direction de
propagation



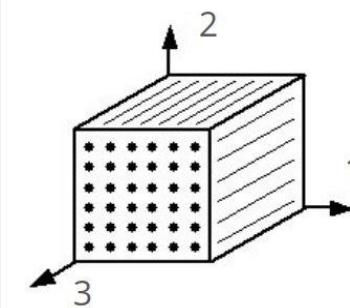
Bon accord entre la vitesse
surfacique de compression et la
vitesse volumique de compression



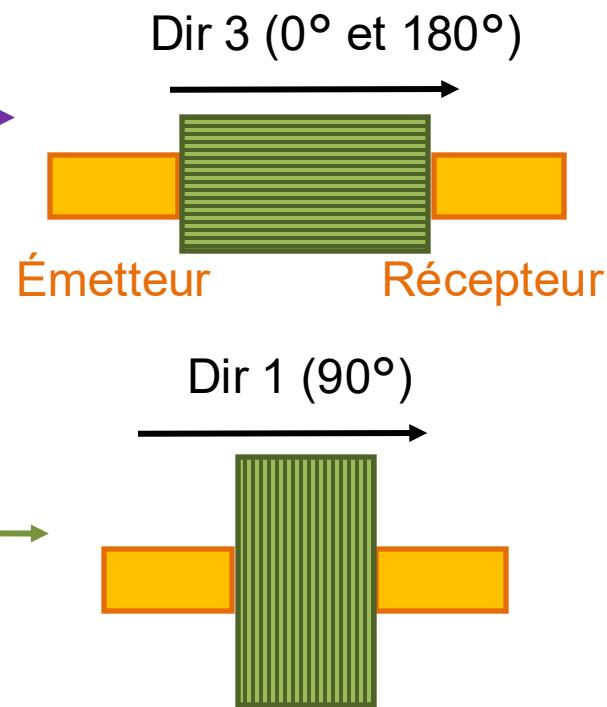
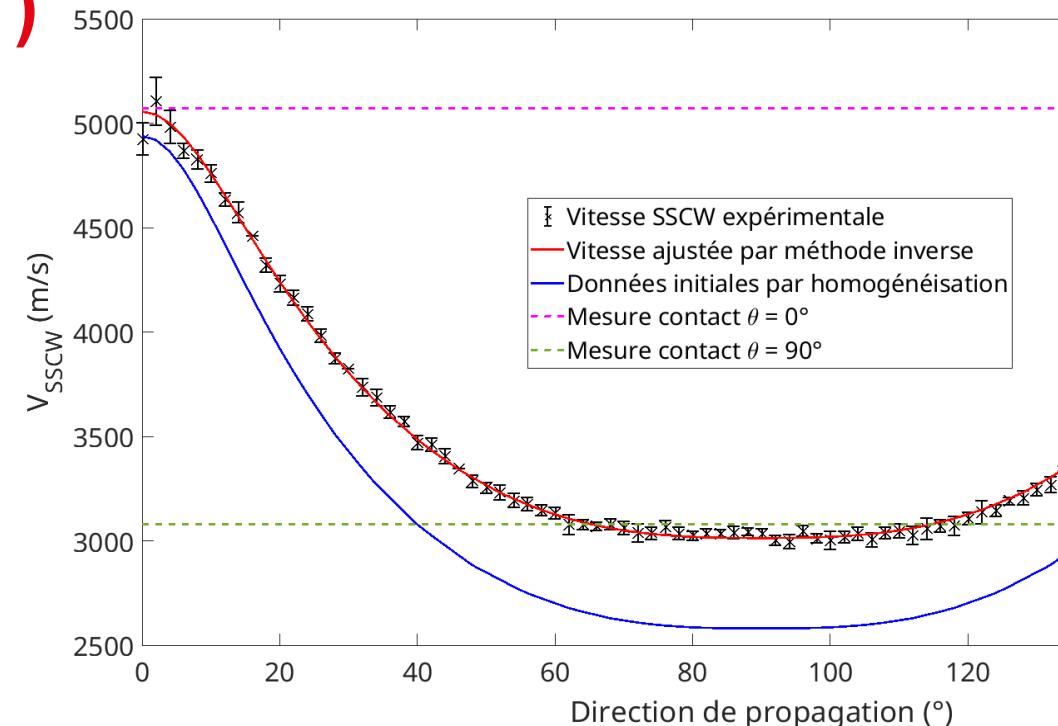
Validation de la méthode
expérimentale

Méthodes	Interférométrie laser	Mesure au contact
Vitesses ultrasonores (m/s)	2627 (\pm 35)	2730 (\pm 70)

Estimation des constantes élastiques d'un composite UD (re-Flexion composites[©])

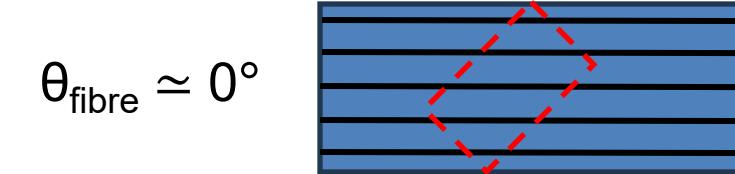


Matrice époxy
Fibres de verre
(Vf = 60%)

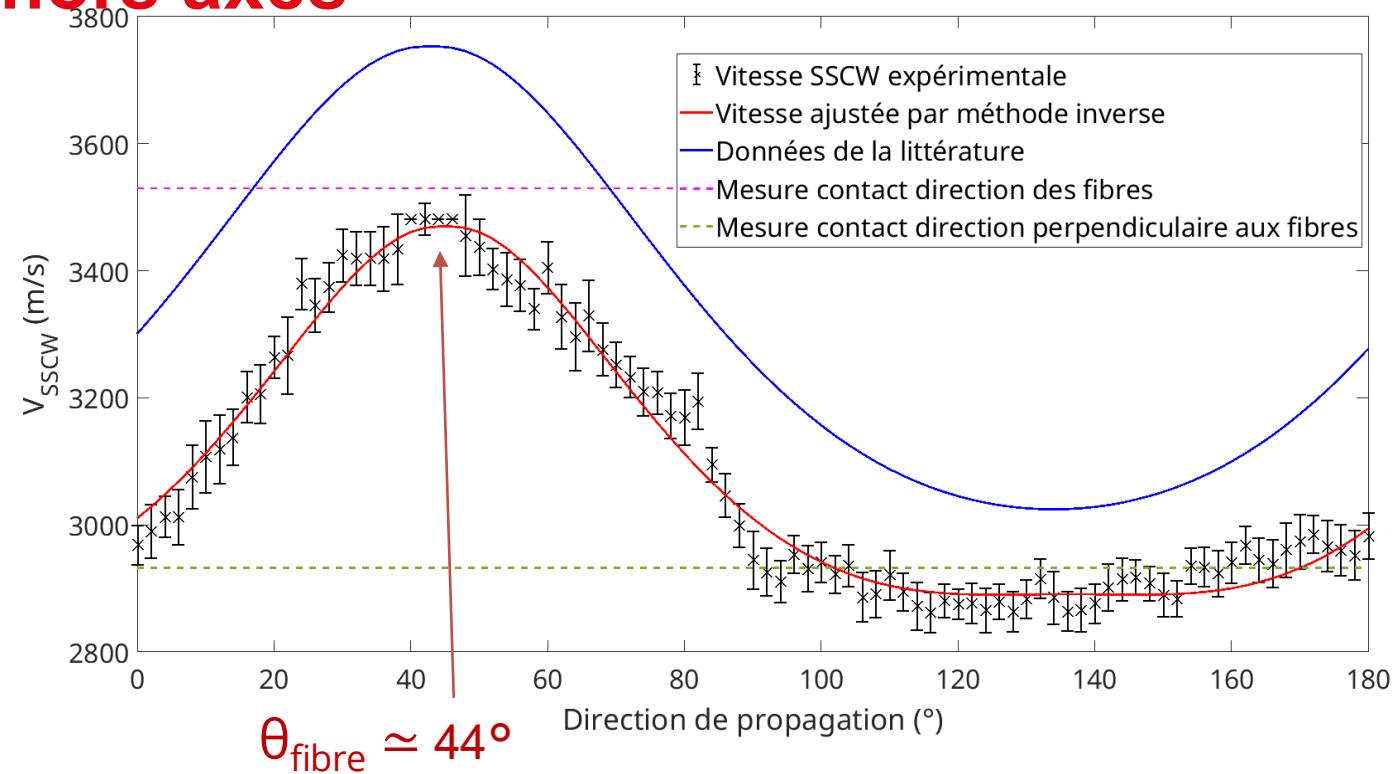
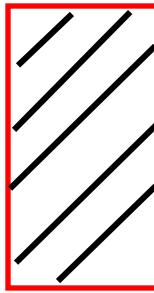


	Homogénéisation (Digimat – S. Corn)	Interférométrie laser	Mesure au contact	Analyse modale (Thèse A. Al Fay)
C ₁₁ (GPa)	12,9	17,6 ($\pm 0,9$)	18,5 ($\pm 0,9$)	15,2 ($\pm 0,9$)
C ₃₃ (GPa)	47,4	49,6 ($\pm 2,4$)	50,2 ($\pm 2,5$)	46,5 ($\pm 2,4$)
C ₄₄ (GPa)	4,6	5,5 ($\pm 0,3$)	5,8 ($\pm 0,3$)	4,6 ($\pm 0,3$)
C ₁₃ (GPa)	4,4	7,6 ($\pm 0,4$)	-	-

Mesures de vitesses expérimentales sur le composite (Sawbones®) avec les fibres hors axes



Usinage composite
fibres hors axes



	RUS (Bernard et al. 2014)	Interférométrie laser	Mesure au contact
C_{11} (GPa)	15,0 ($\pm 0,8$)	13,7 ($\pm 0,7$)	14,7 ($\pm 0,7$)
C_{33} (GPa)	23,1 ($\pm 0,9$)	19,7 ($\pm 1,0$)	20,4 ($\pm 1,0$)
C_{44} (GPa)	4,63 ($\pm 0,02$)	3,8 ($\pm 0,3$)	-
C_{13} (GPa)	8,4 ($\pm 0,9$)	5,9 ($\pm 0,3$)	-

Mesures de vitesses expérimentales sur une plaque de Hêtre (plan LT)



Plan RT

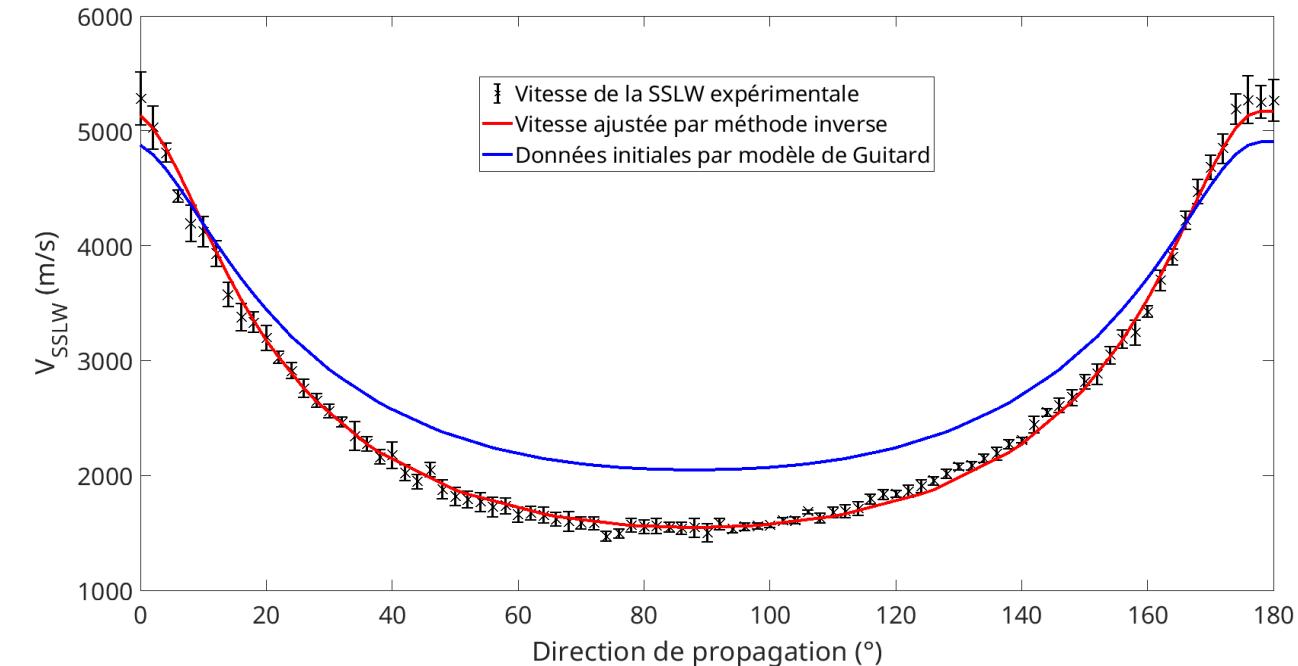


Plan RL

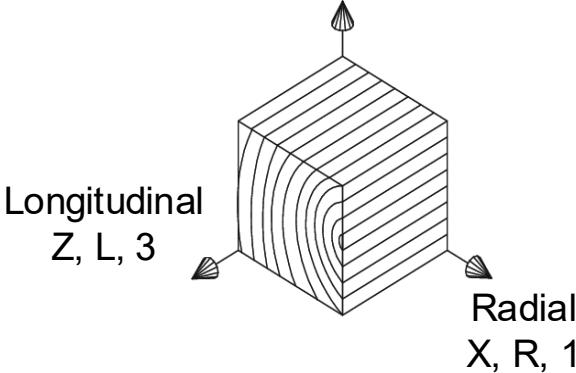


Adhésif réflecteur

Plan LT

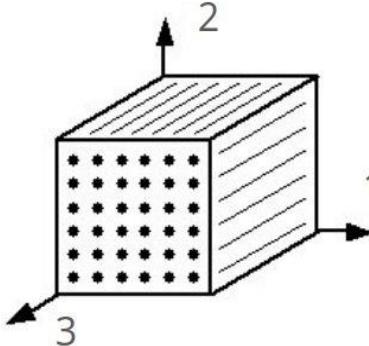


Tangential
Y, T, 2



	Modèle de Guitard et El Amri (1987)	Interférométrie laser	Analyse modale (Thèse A. Al Fay)
C ₁₁ (GPa)	3,1	1,8 (\pm 0,2)	1,93 (\pm 0,1)
C ₃₃ (GPa)	17,7	19,7 (\pm 1,9)	22,02 (\pm 0,5)
C ₄₄ (GPa)	1,1	1,0 (\pm 0,2)	1,08 (\pm 0,1)
C ₁₃ (GPa)	1,8	1,0 (\pm 0,2)	-

Conclusion et perspectives

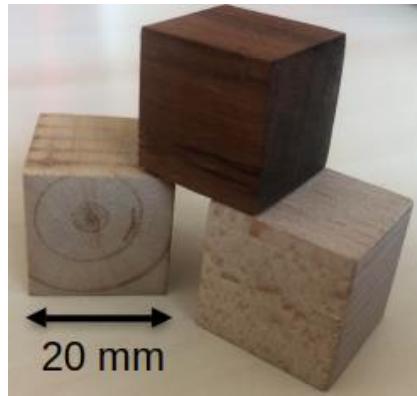


Matrice de rigidité d'un échantillon transverse isotrope

Mesures expérimentales de $V_g(\theta_g)$

Modèle analytique $V_g(\theta_g)$ à partir de $V_p(\theta_p)$

Optimisation de la méthode d'identification inverse (en cours)



3 plans d'anisotropie
9 coefficients indépendants
Contraintes du matériau Bois

Symétrie **orthotrope** (cylindrique)
Comportement viscoélastique
Variabilité intra et inter-espèce
Sensible à la teneur en eau

