

# Journée du GT CEND du Bois – Tarbes

## 21 Octobre 2025

### Caractérisation élastique complète de petits échantillons anisotropes par interférométrie laser

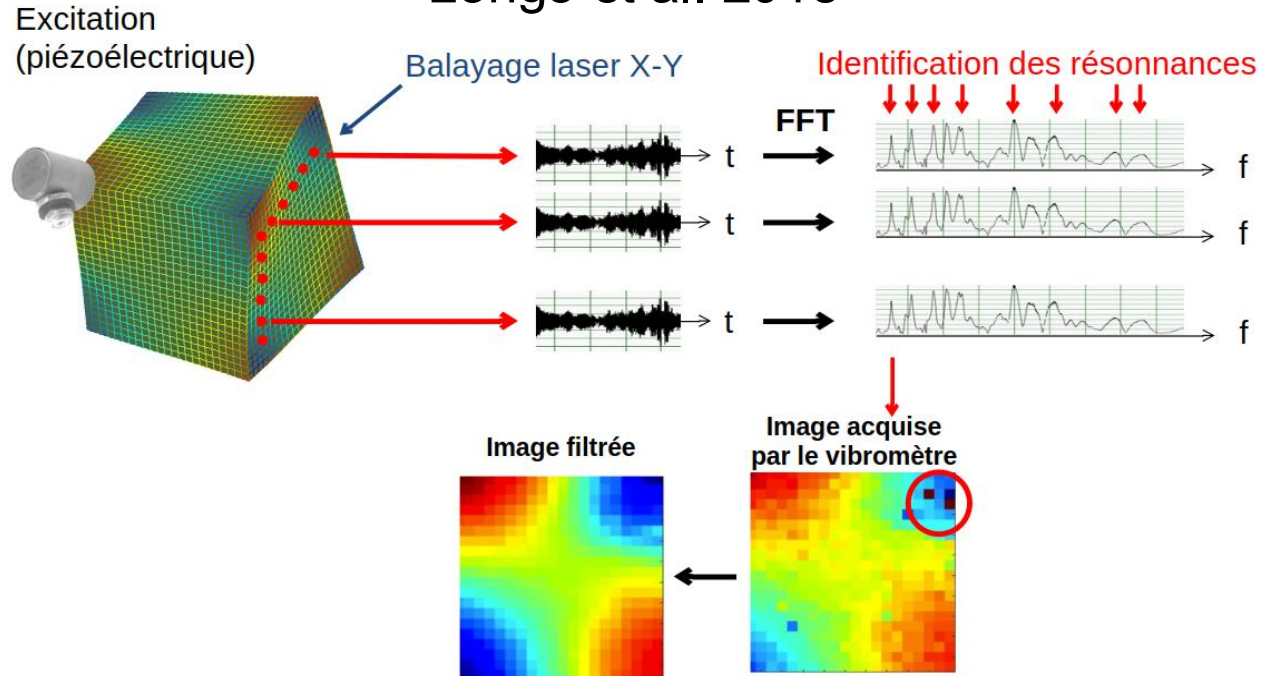
K. Toulgoat, G. Sapey, F. Augereau, D. Laux, O. Arnould, E. Rosenkrantz

Co-financement :  
Région Occitanie  
Ecole doctorale I2S



# Méthodes ultrasonores de caractérisation élastiques d'échantillons de bois

## Reasonant Ultrasound Spectroscopy Longo et al. 2018

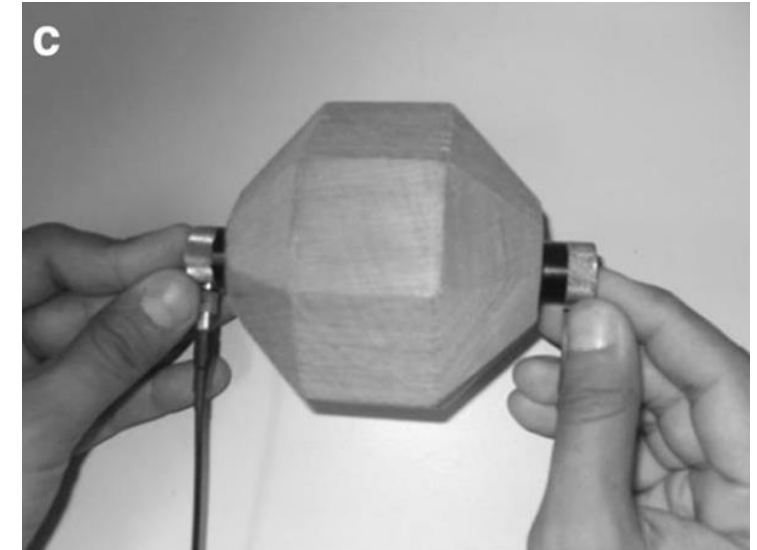


Modules de cisaillement très sensibles

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

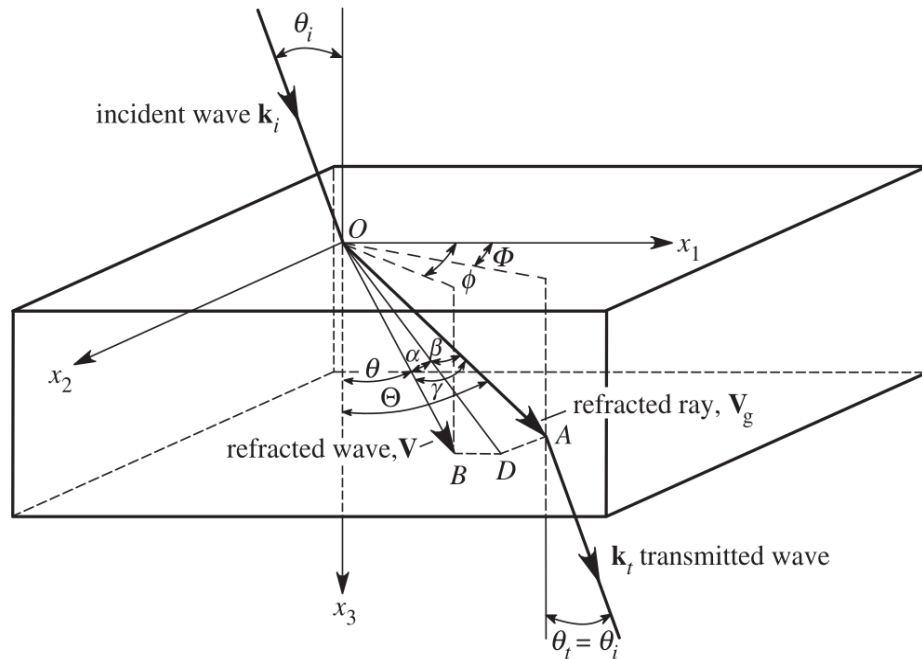
Ambigüité  $V_p - V_g$

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

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

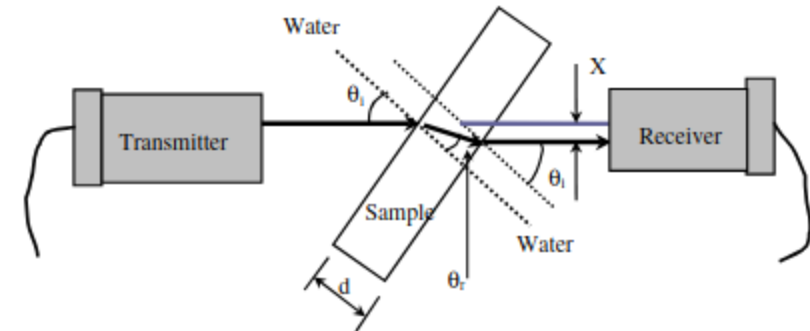
# Méthodes ultrasonores de caractérisation élastiques pour d'autres matériaux anisotropes

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



Secteur angulaire limité par la géométrie de l'échantillon

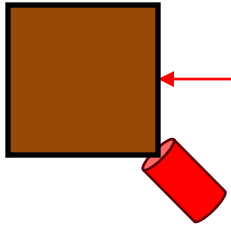
Mesures de vitesse de phase ultrasonores par goniométrie (Reddy et al. 2004)



Secteur angulaire aussi limité  
Mesure en immersion

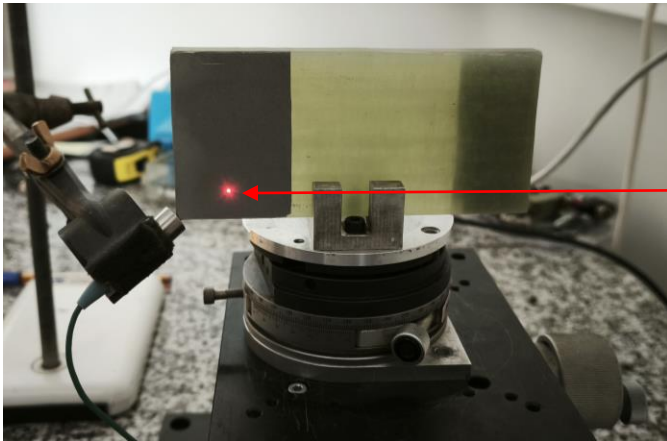
# Banc expérimental permettant un scan angulaire de la face d'un échantillon

Echantillon



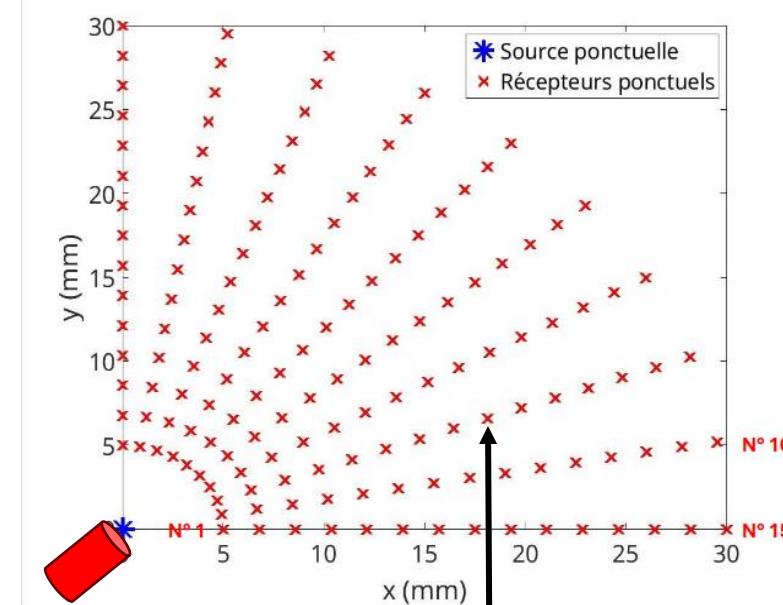
Interféromètre laser placé sur une  
plateforme motorisée

Sonde Ultrasonore



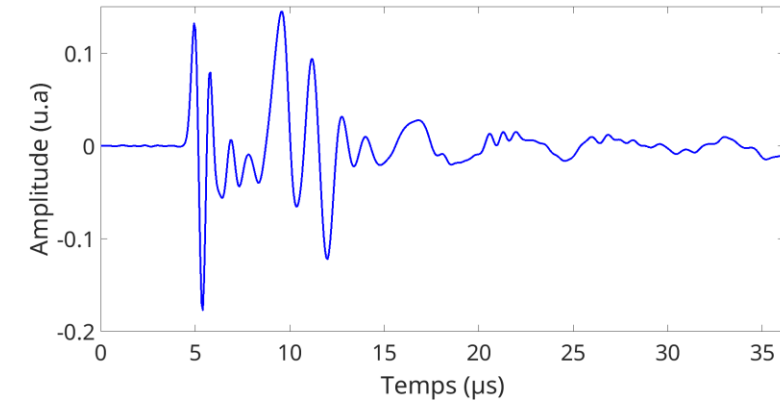
Scan angulaire de l'échantillon

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

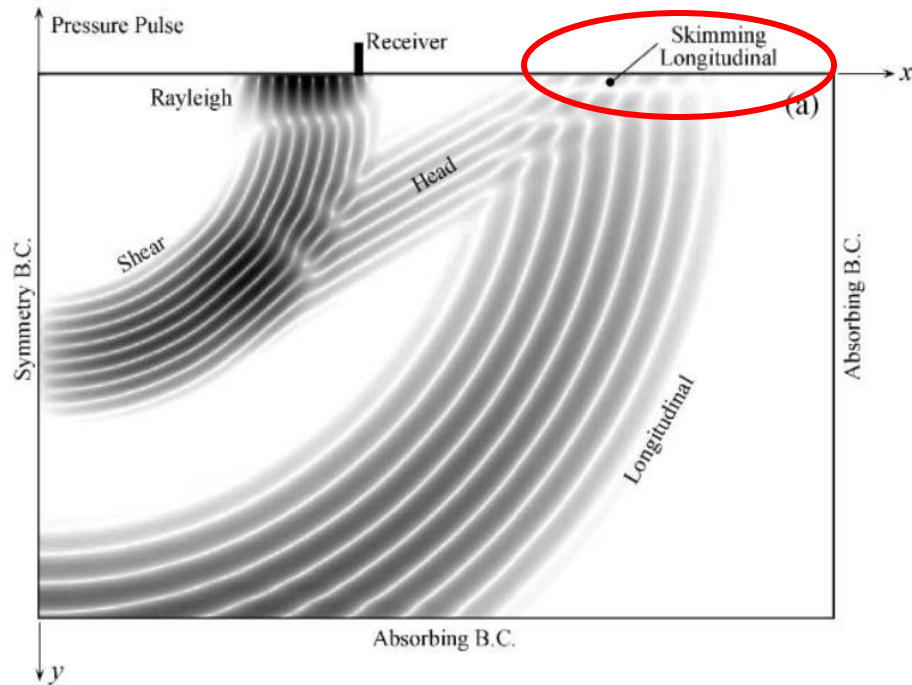


Ligne de récepteurs  
à  $\theta = 0^\circ$

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

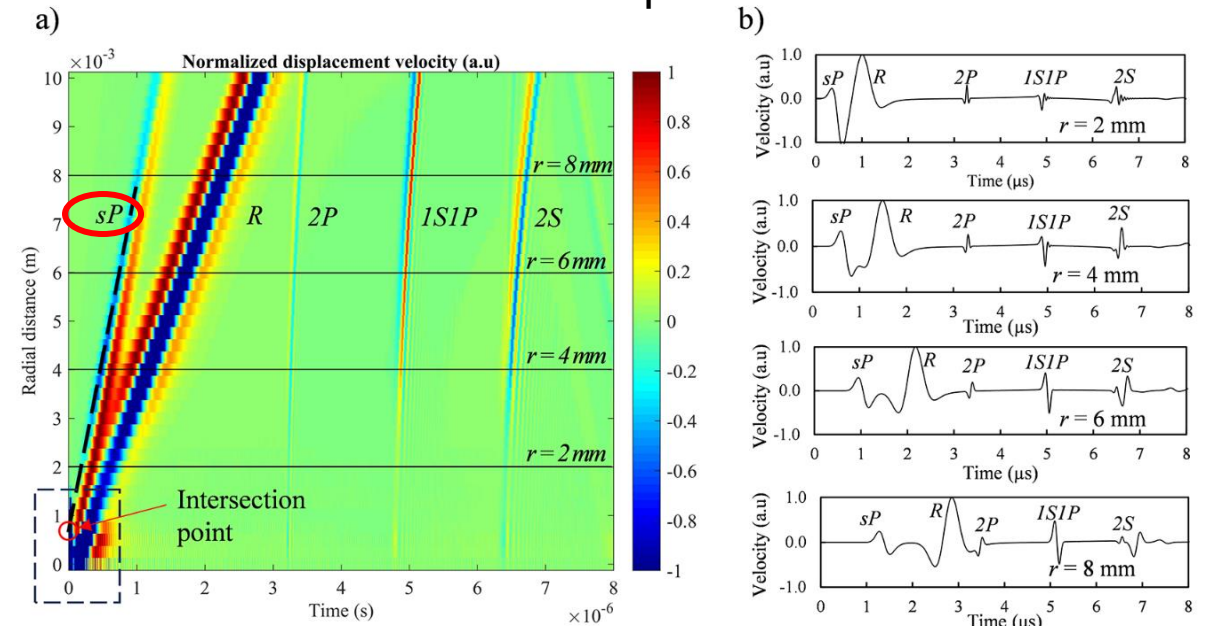
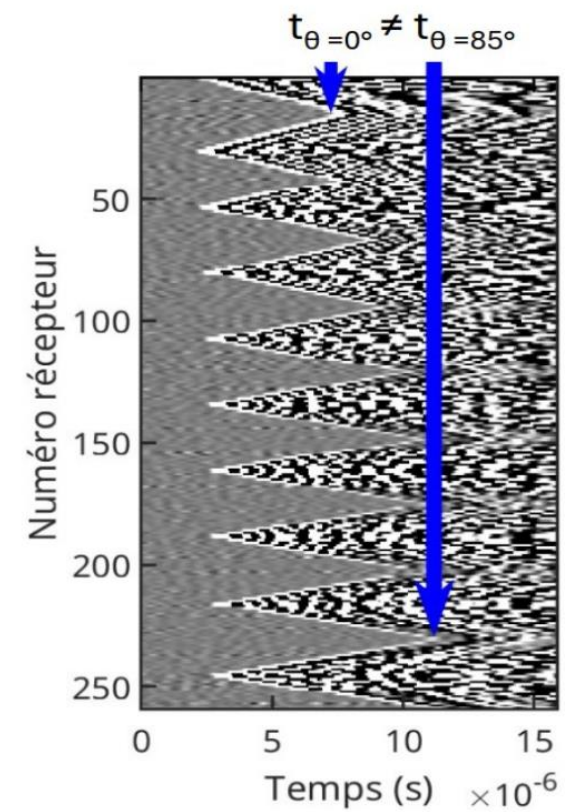
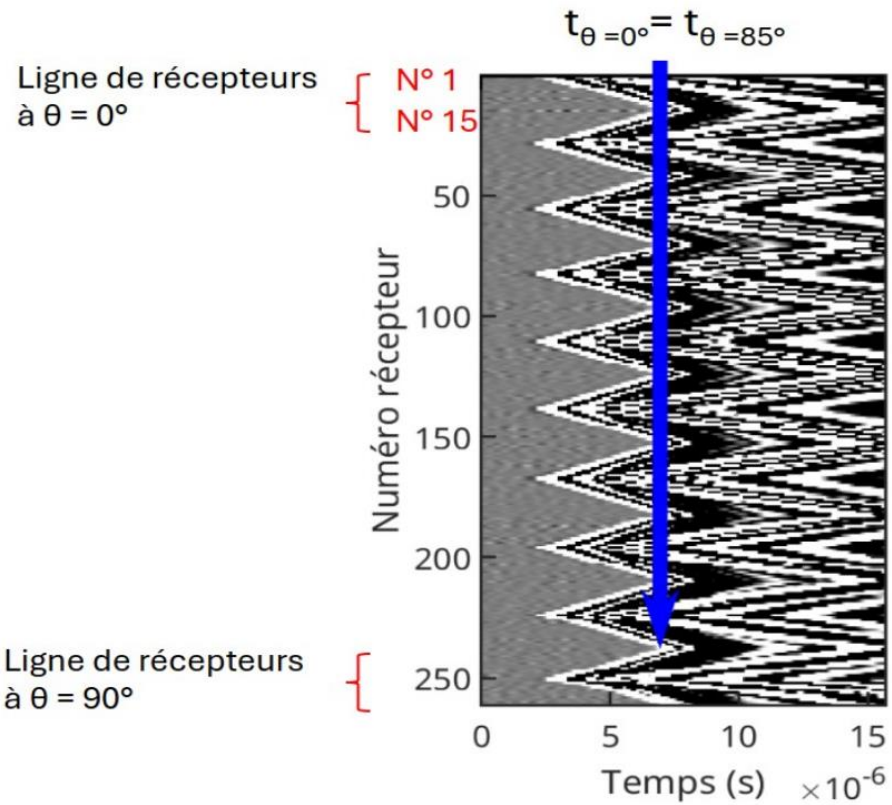
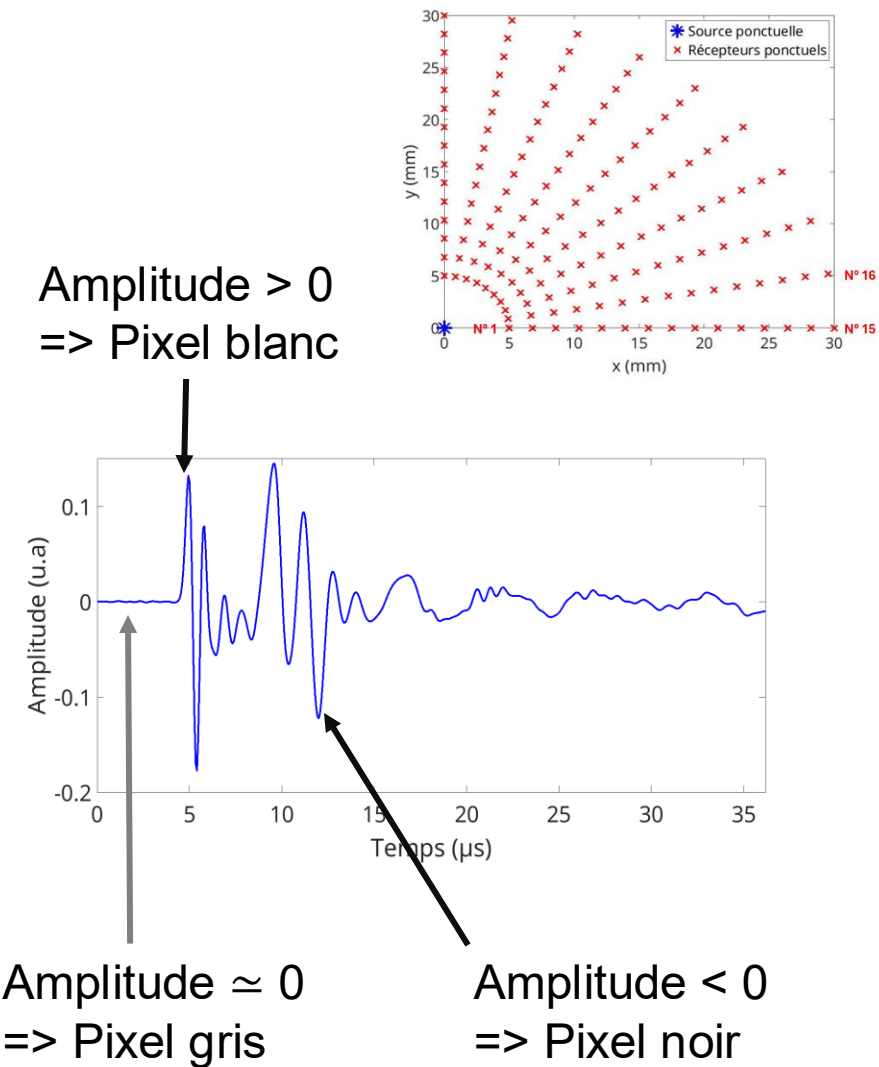


Figure 3. (a) Time-position image of the normalized displacement velocity obtained from simulation; (b) simulated waveforms extracted from time-position image



# Visualisation des données par gather (B-scan)

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



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

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

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

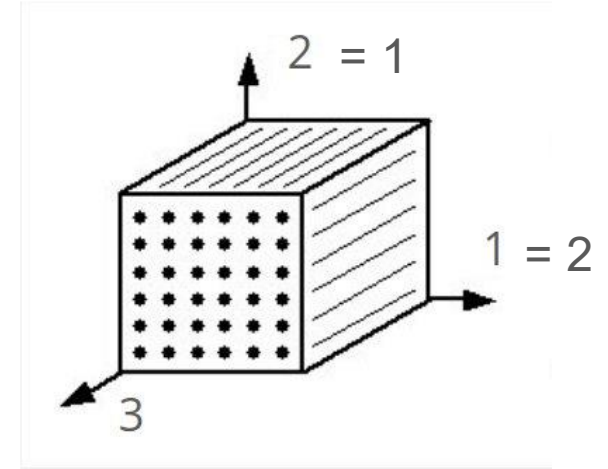
$$G_{33} = C_{44} * \sin^2(\theta_p) + C_{33} * \cos^2(\theta_p)$$

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

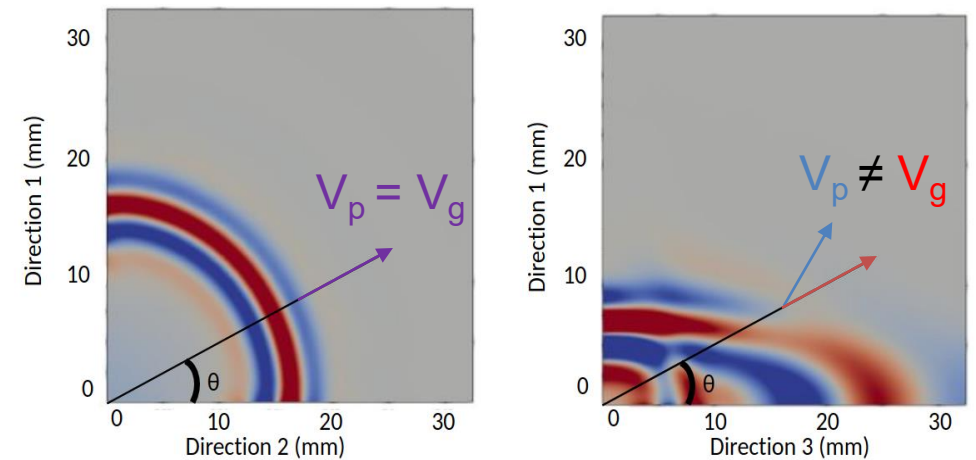
Avec  $G_{ij}$  les tenseurs de Christoffel



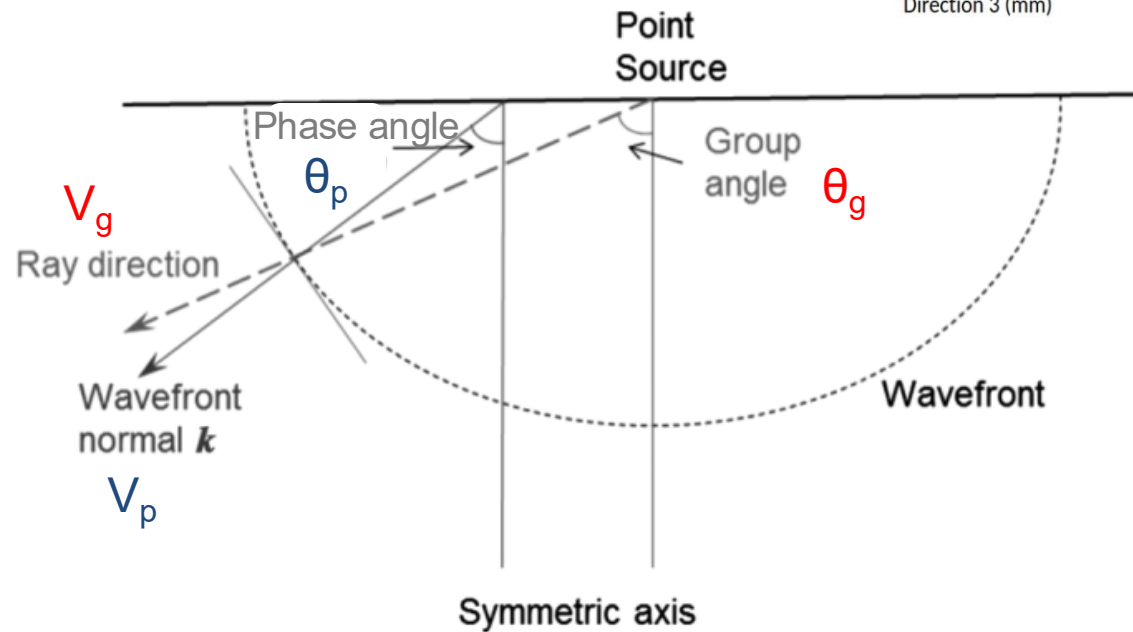
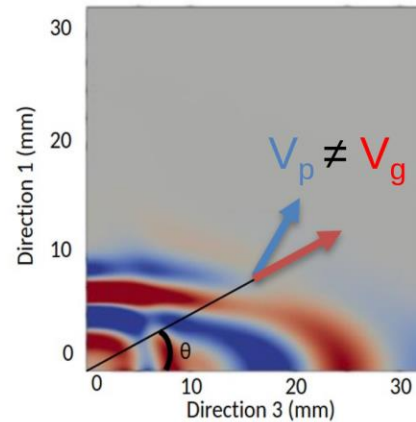
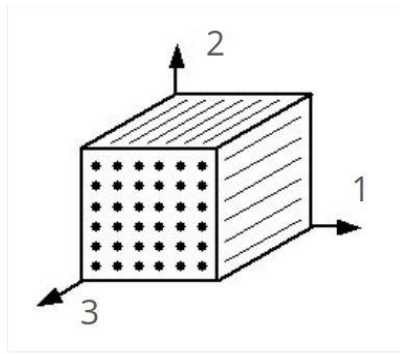
Détermination des  $C_{ij}$  à partir d'une mesure d'une vitesse ultrasonore en fonction de la direction de propagation  $\theta$  (ajustement par méthode inverse)



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



# Passage de la vitesse de phase à la vitesse de groupe



- 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 =>  $V_g$

Abell et al. 2014



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

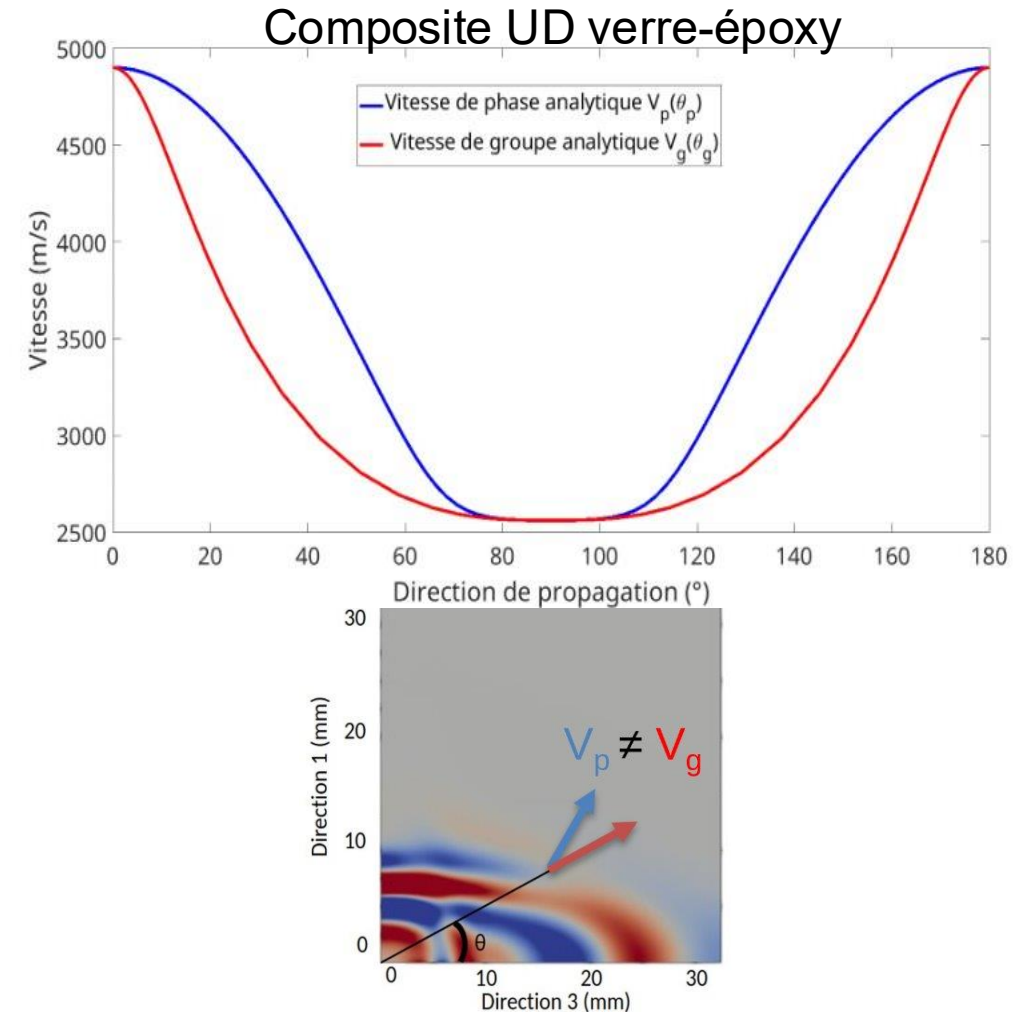
- 1) Passage de l'angle de phase  $\theta_p$   
à l'angle de groupe  $\theta_g$

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

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

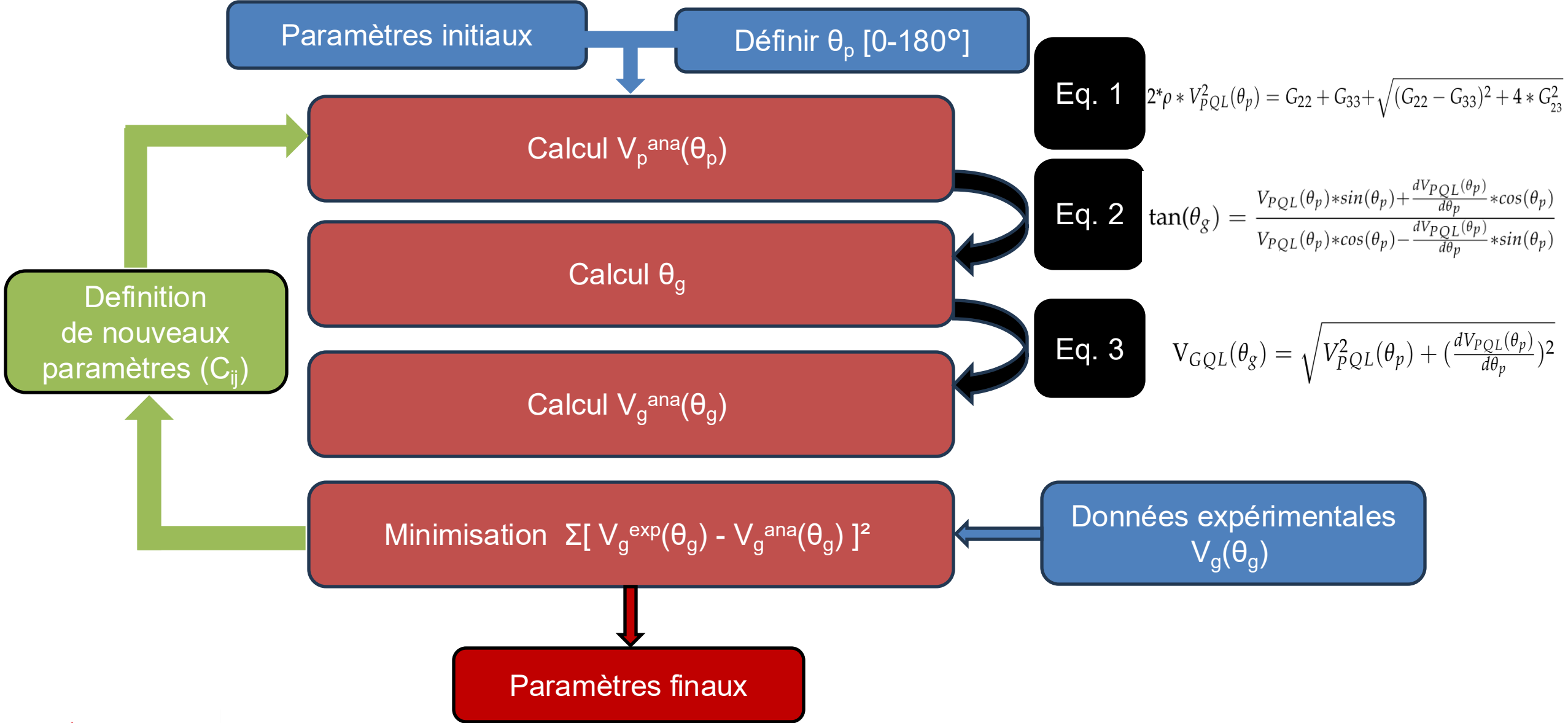
$$V_{GQL}(\theta_g) = \sqrt{V_{PQL}^2(\theta_p) + \left(\frac{dV_{PQL}(\theta_p)}{d\theta_p}\right)^2}$$

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

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

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

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

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

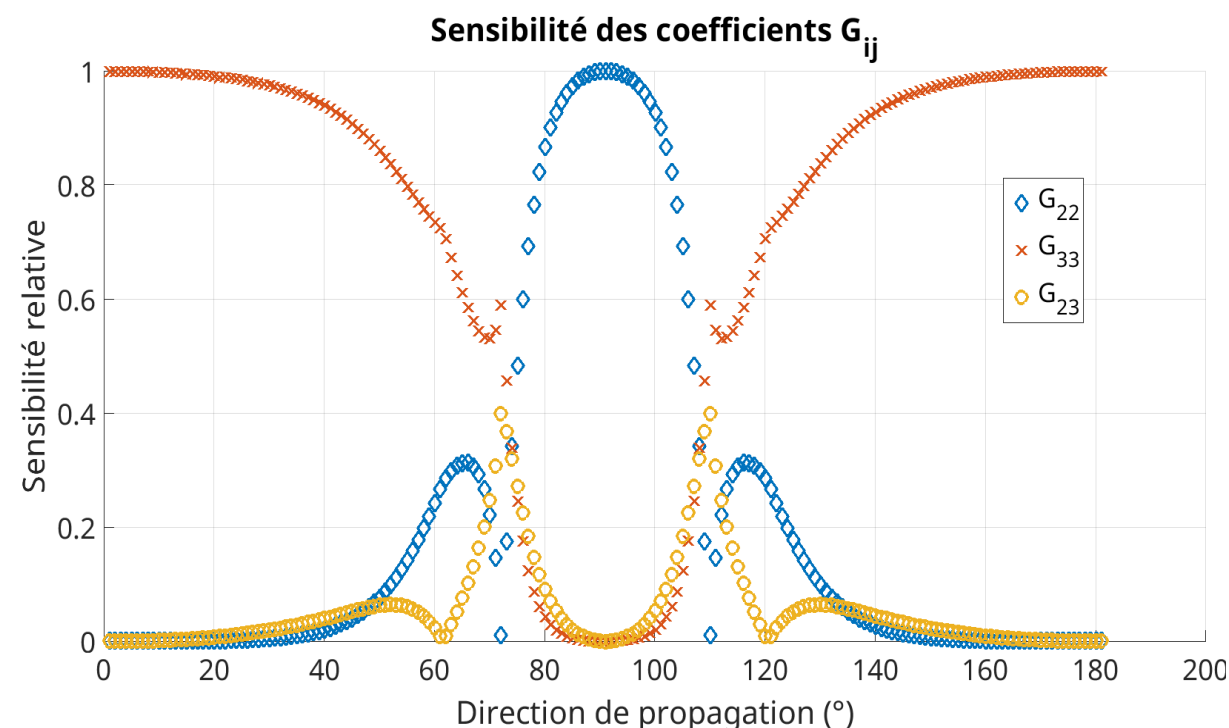
$$C_{22} = G_{22}(\theta_p = 90)$$

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

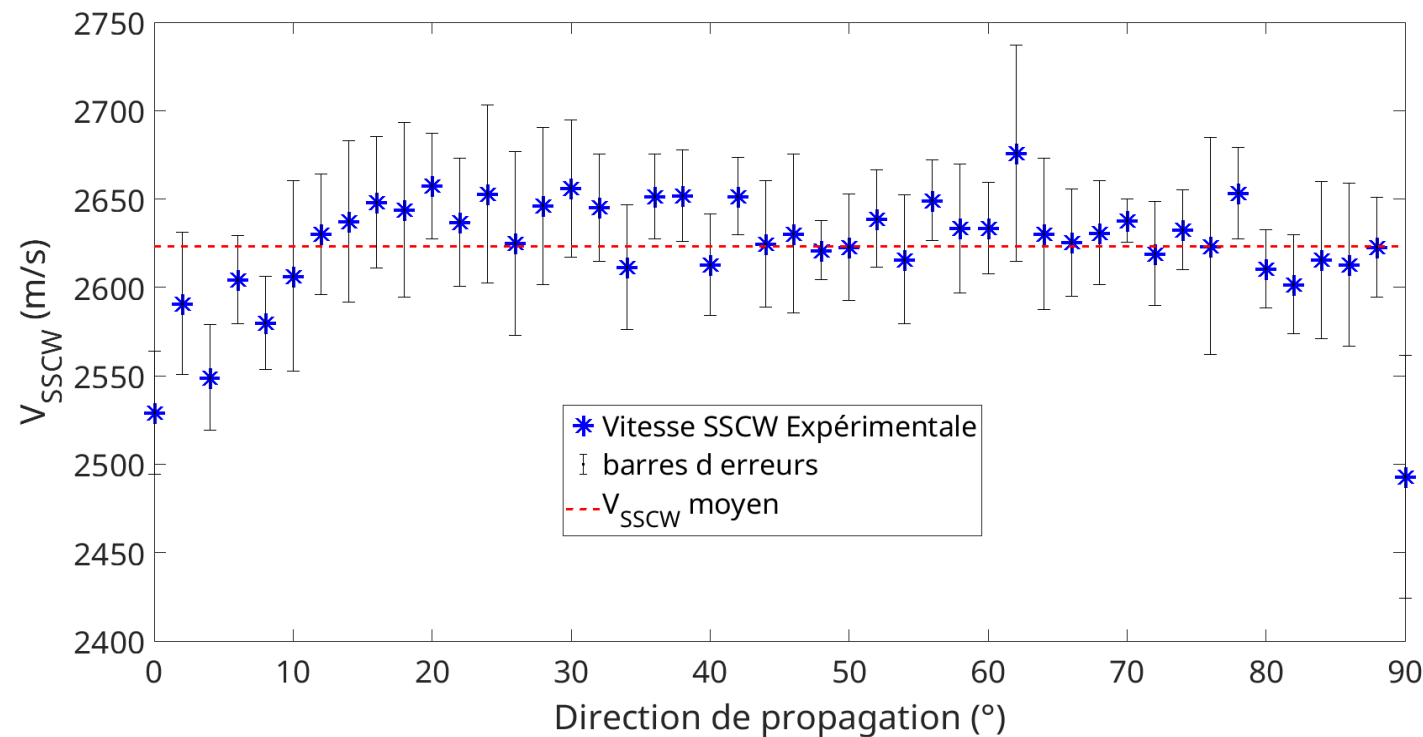
$$C_{44} = \frac{1}{2} * (G_{22}(\theta_p = 0) + G_{33}(\theta_p = 90))$$

$C_{23}$  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

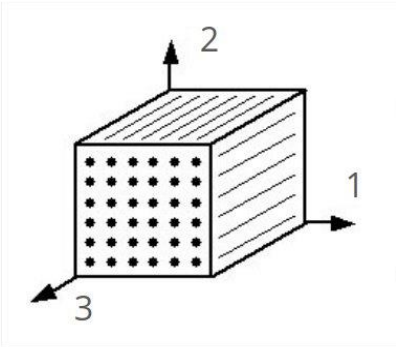


Validation de la méthode expérimentale

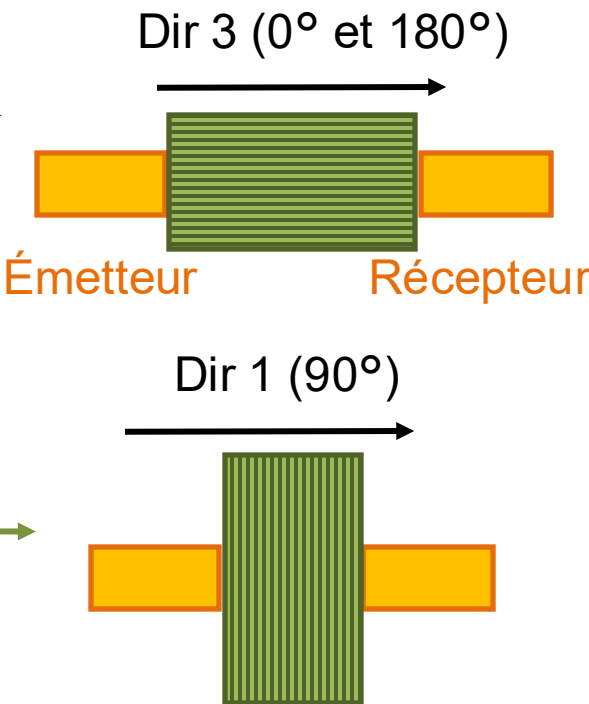
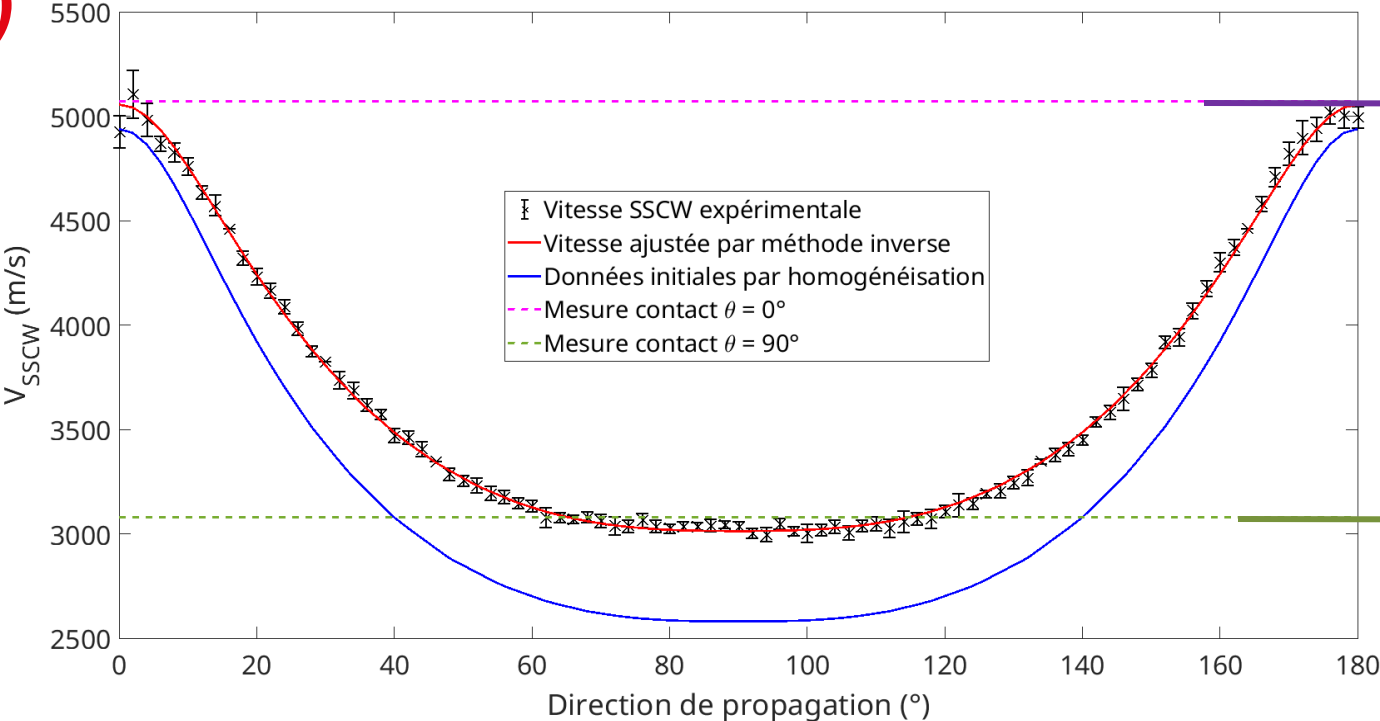
Méthodes	Interférométrie laser	Mesure au contact
Vitesses ultrasonores (m/s)	2627 (± 35)	2730 (± 70)



# Estimation des constantes élastiques d'un composite UD (re-Flexion composites<sup>©</sup>)

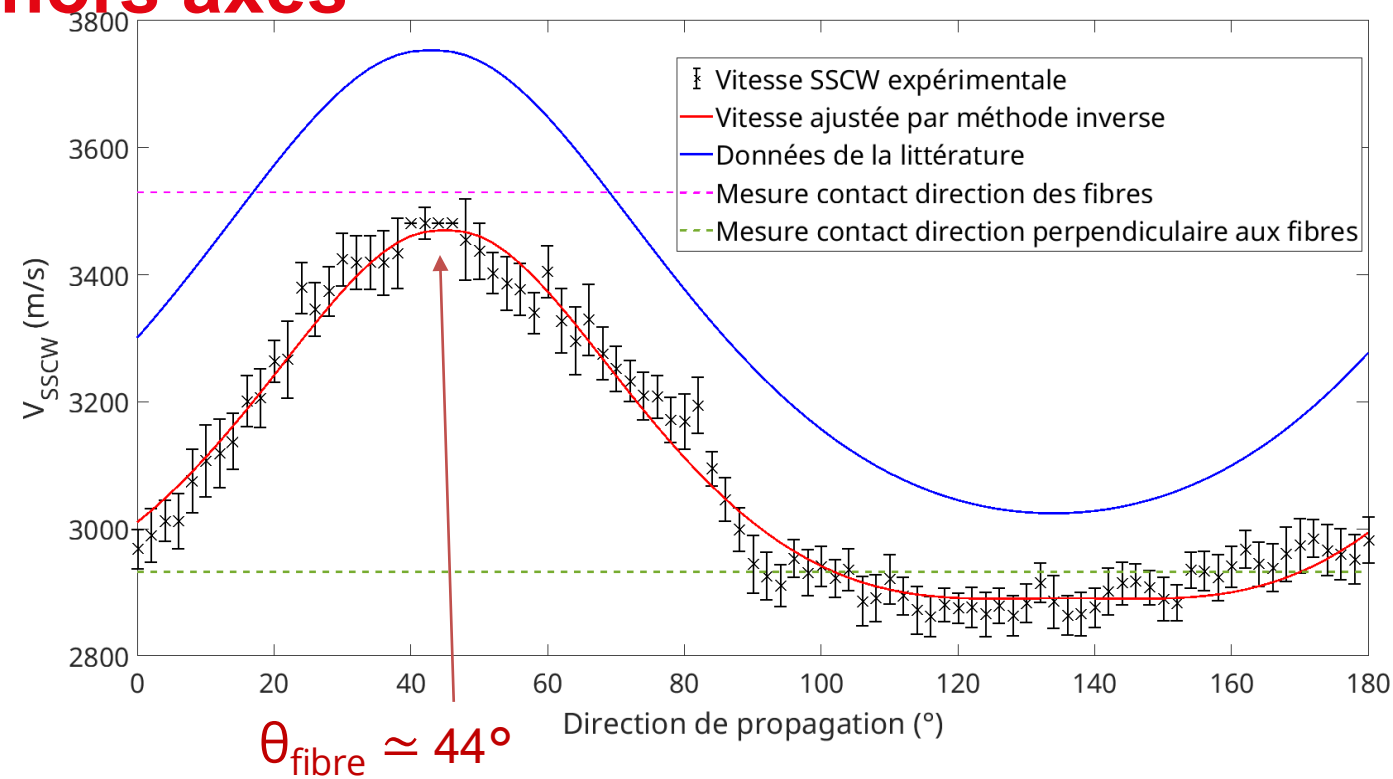
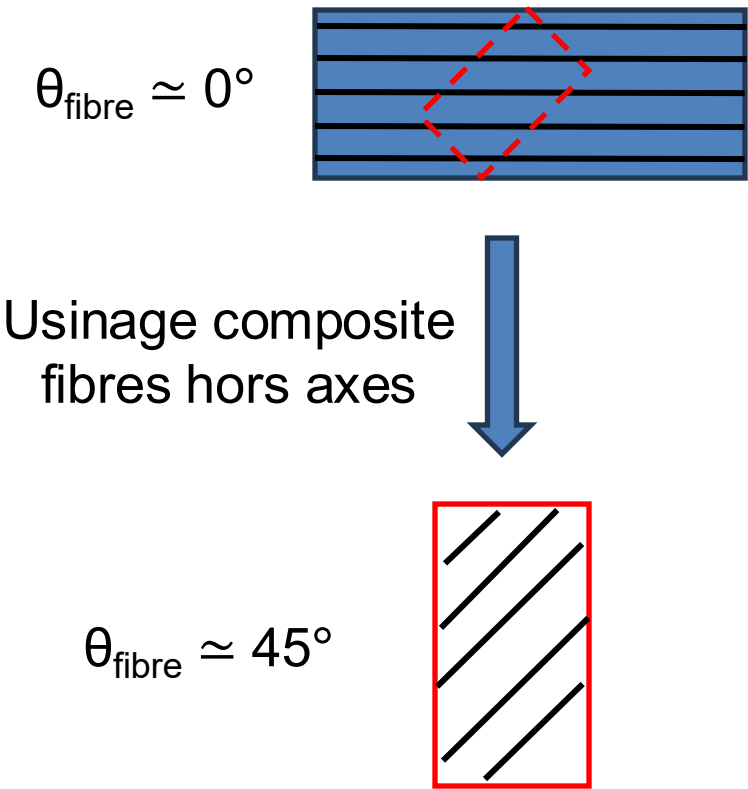


Matrice époxy  
Fibres de verre  
(Vf = 60%)



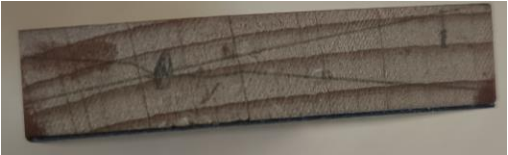
	Homogénéisation (Digimat – S. Corn)	Interférométrie laser	Mesure au contact	Analyse modale (Thèse A. Al Fay)
$C_{11}$ (GPa)	12,9	17,6 ( $\pm 0,9$ )	18,5 ( $\pm 0,9$ )	15,2 ( $\pm 0,9$ )
$C_{33}$ (GPa)	47,4	49,6 ( $\pm 2,4$ )	50,2 ( $\pm 2,5$ )	46,5 ( $\pm 2,4$ )
$C_{44}$ (GPa)	4,6	5,5 ( $\pm 0,3$ )	5,8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



	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

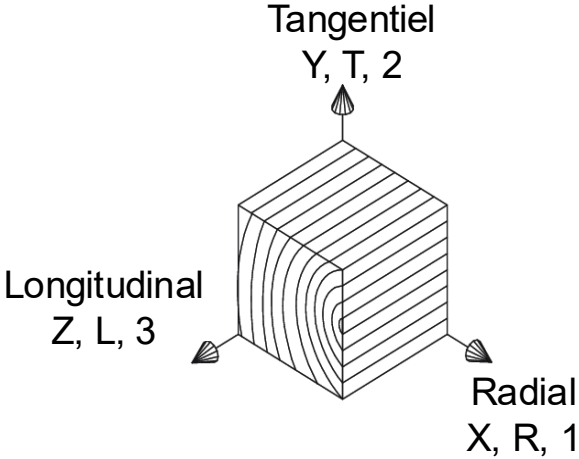
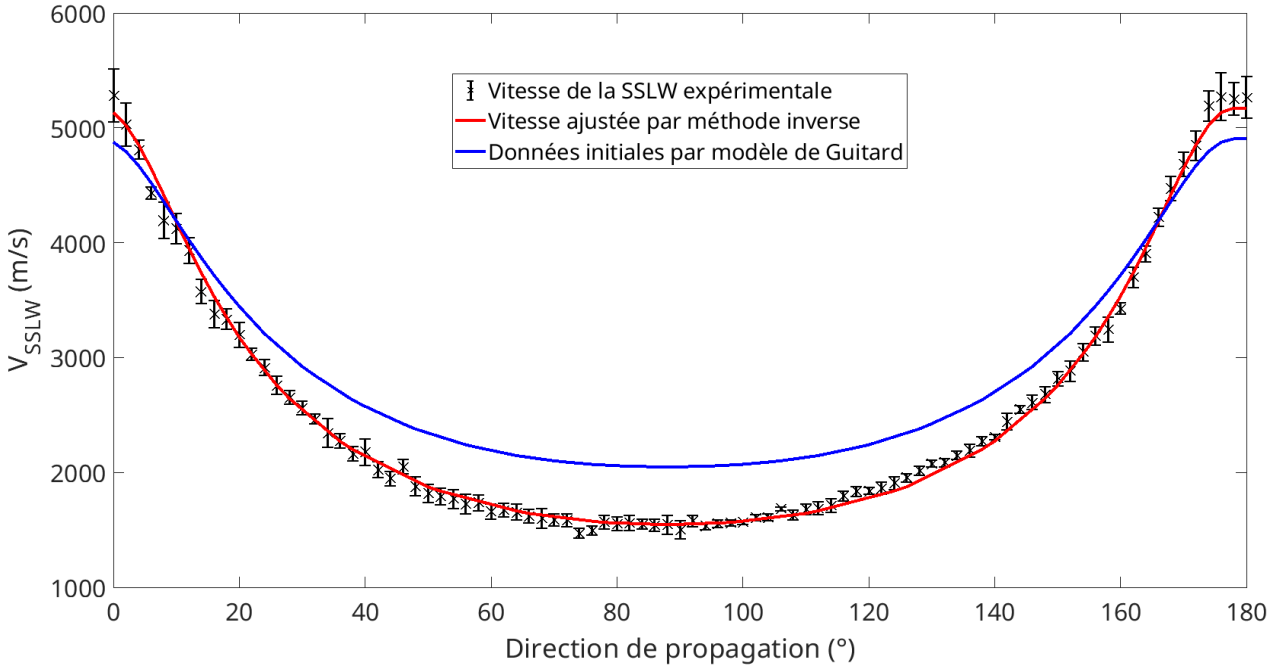


Plan RL



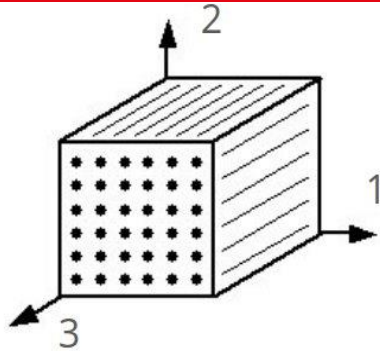
Adhésif  
réflecteur

Plan LT



	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

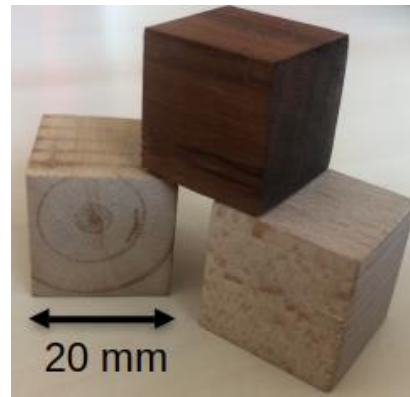


Matrice de rigidité d'un échantillon transverse isotrope

Mesures expérimentales de  $V_g(\theta_g)$

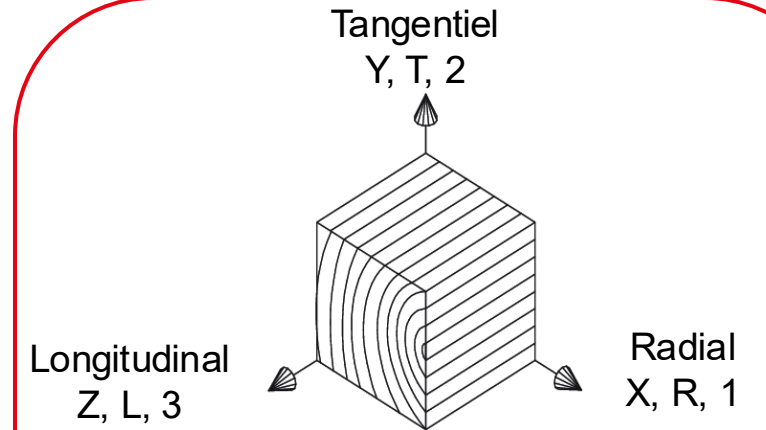
Modèle analytique  $V_g(\theta_g)$  à partir de  $V_p(\theta_p)$

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



Matrice de rigidité d'un échantillon orthotrope

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix}$$