

CFA 2018

Benoit Mascaro, Philippe Guy

Comment augmenter la précision du tenseur d'élasticité lors
de la caractérisation par ultrasons d'aciers anisotropes

Points clés pour l'évaluation de la partie réelle du tenseur

Contexte

- Caractérisation de matériaux hétérogènes et/ou anisotropes -
Projet **ANR MUSCAD**

(Méthodes **UltraSonores** pour la **Caractérisation** de matériaux de composants nucléaires pour l'**Amélioration** du **Diagnostic**)

- Augmenter la fiabilité des résultats lors de la caractérisation des aciers utilisés dans l'industrie de production d'énergie nucléaire



Matériau étudié

- Acier de soudure

Matériau de symétrie orthotrope
(3 plans de symétrie, 9 modules d'élasticité)

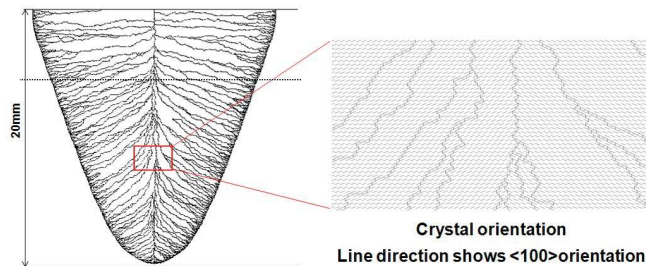
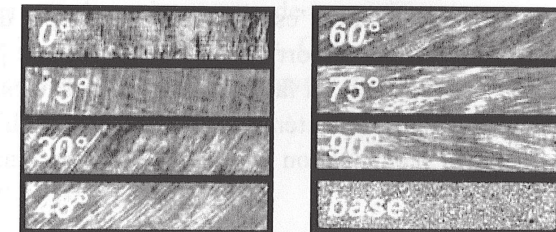
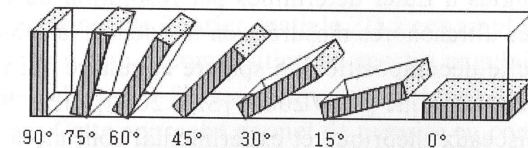
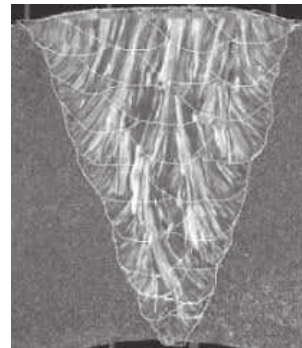
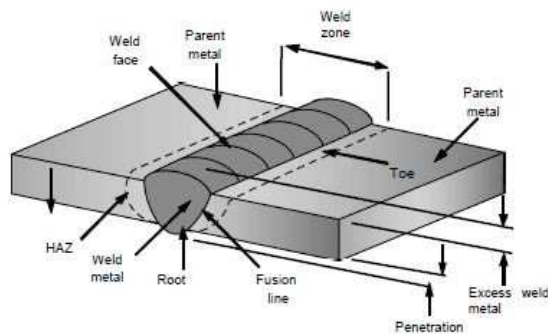


Fig.1 Example of solidification simulation result.

KAMIYAMA FURUKAWA
EJAM Vol.8 No.2(2016)

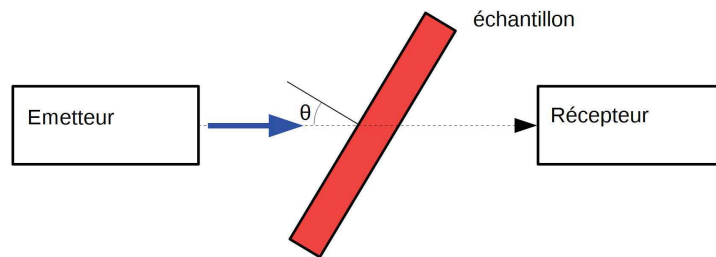
9 constantes C_{ij} + 3 angles d'Euler à déterminer

Paramètres
dans le repère
'cristal'

Orientation du
cristal dans
l'échantillon

Méthode de caractérisation

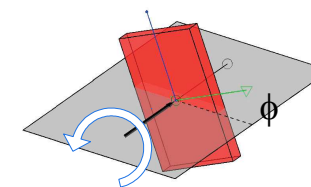
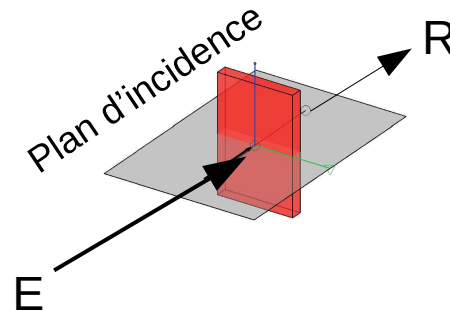
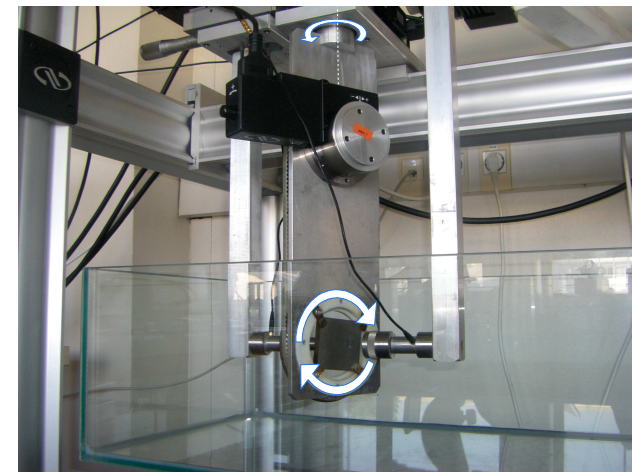
- Schéma de principe : mesure des vitesses de propagation en transmission



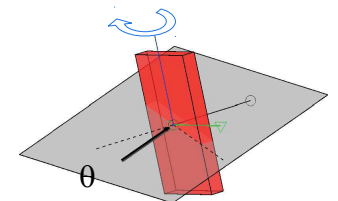
Mesure de vitesses des
modes réceptionnés
(qL ou qT1 ou qT2)

$$c_1 = \frac{e \cos \theta_1}{dt + e \left[\frac{1}{c_{1Lp}} + \frac{\cos \theta_0 - 1}{c_0} \right]}$$

$$\theta_1 = \arctan \left(\frac{e \sin \theta_0}{c_0 \left(dt + e \left[\frac{1}{c_{1Lp}} + \frac{\cos \theta_0 - 1}{c_0} \right] \right)} \right)$$



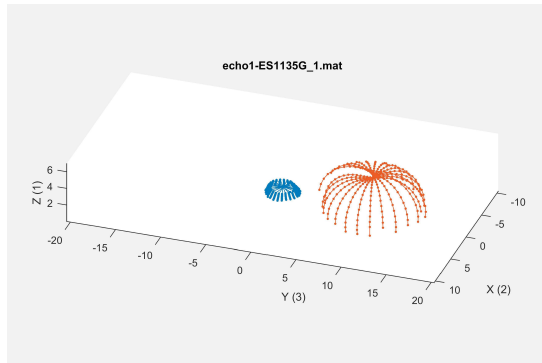
Rotation ϕ
Changement
de plan
d'incidence



Rotation θ
Changement
d'incidence

Obtention des modules c_{ij} (inversion)

Mesure et identification des vitesses
expérimentales



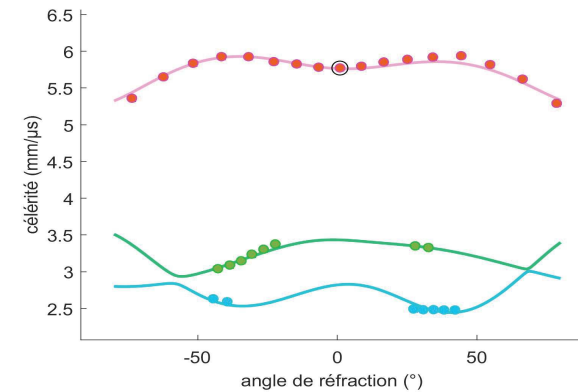
Calcul des vitesses théoriques
(Christoffel) v_L, v_{T1}, v_{T2}

$$\Gamma_{il} = C_{ijkl} n_j n_k$$

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

+ Rotations
 φ, θ, ψ

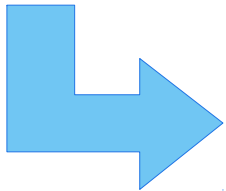
Minimisation
de l'écart
(algorithme d'optimisation)



Tenseur C_{ij} du cristal
et
orientation dans
l'échantillon

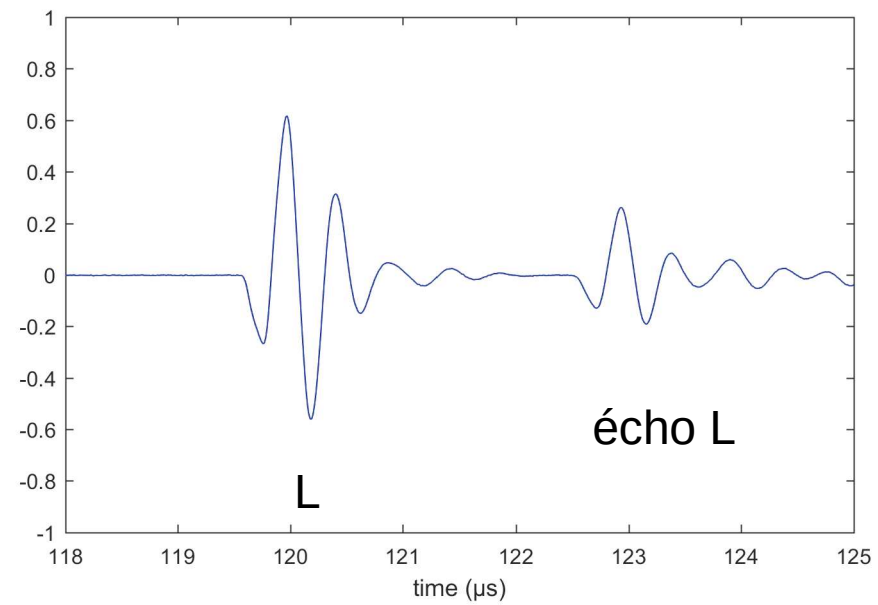
Difficultés identifiées et sources d'incertitudes sur les résultats

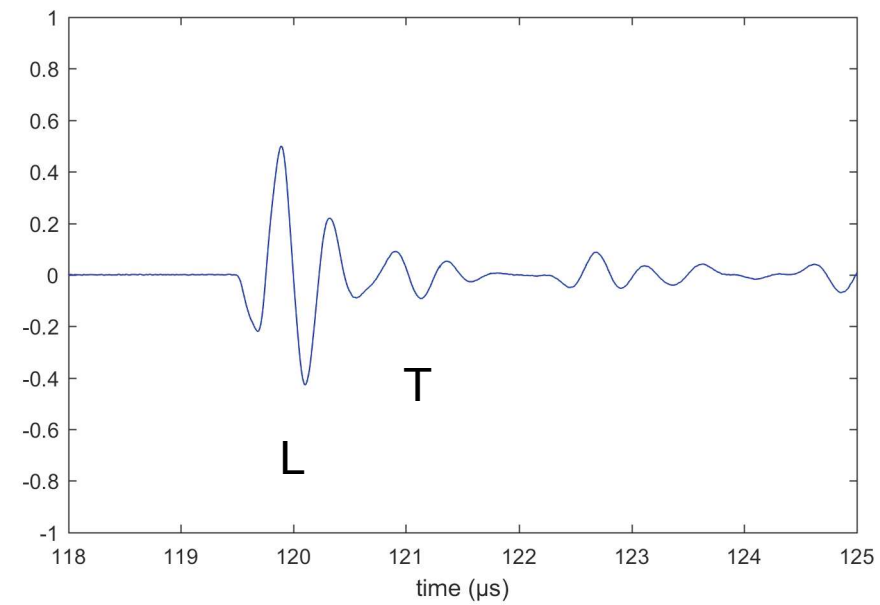
- Précision de la mesure (réglages, alignement)
- Détection des fronts d'ondes sur les signaux temporels
- Identification des modes L, T1, T2
- Choix de l'algorithme d'optimisation

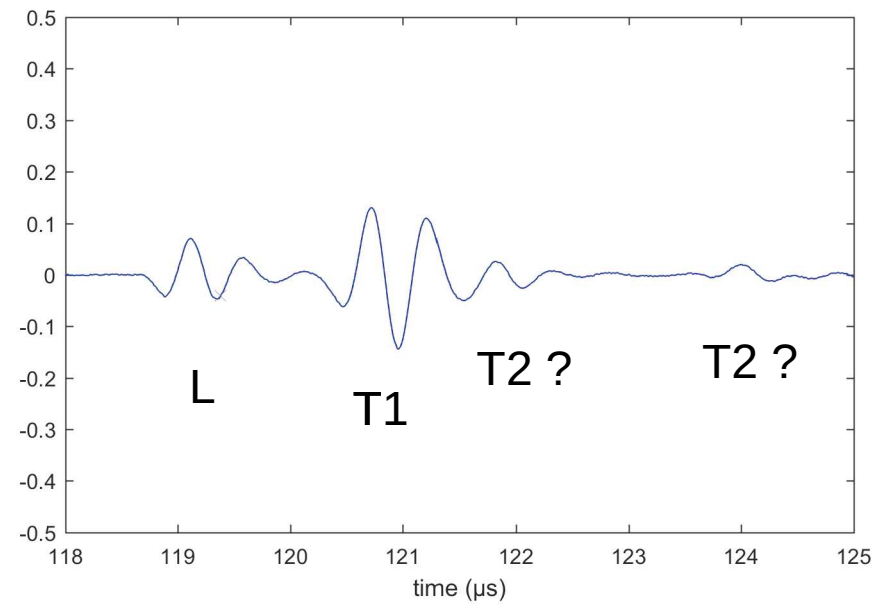


Reproductibilité des résultats ?

A) Identification et sélection des modes détectés



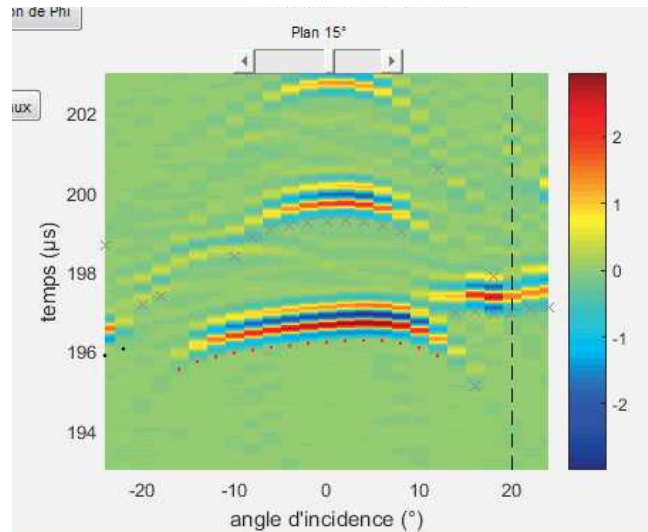
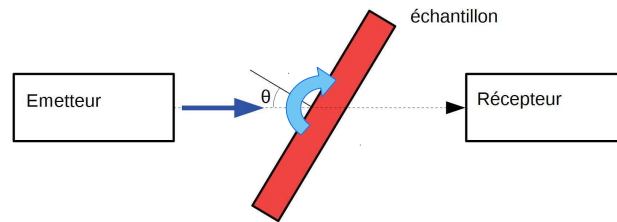




Visualisation des signaux

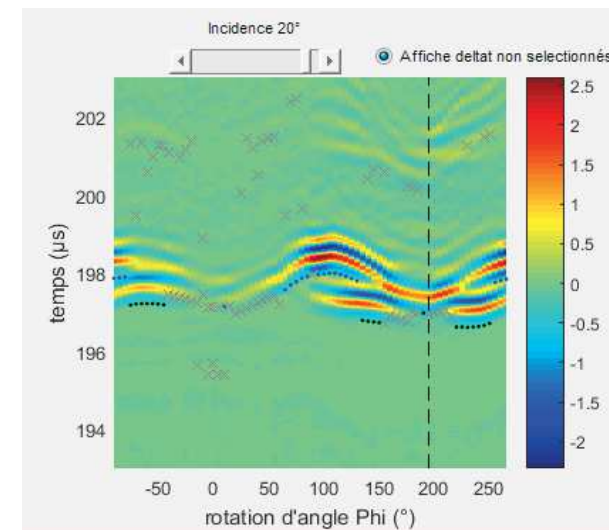
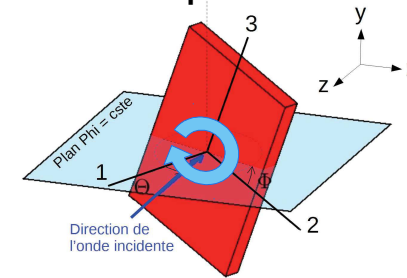
- Plan d'incidence fixe

Balayage sur les angles d'incidence θ



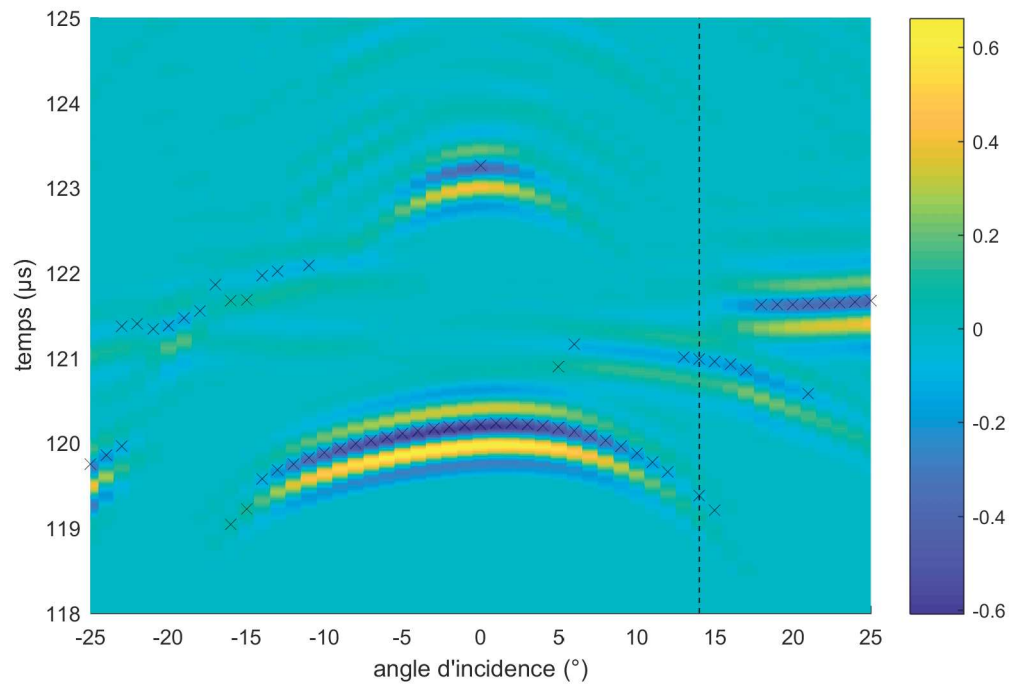
- Angle d'incidence fixe

Balayage sur les plans d'incidence Φ



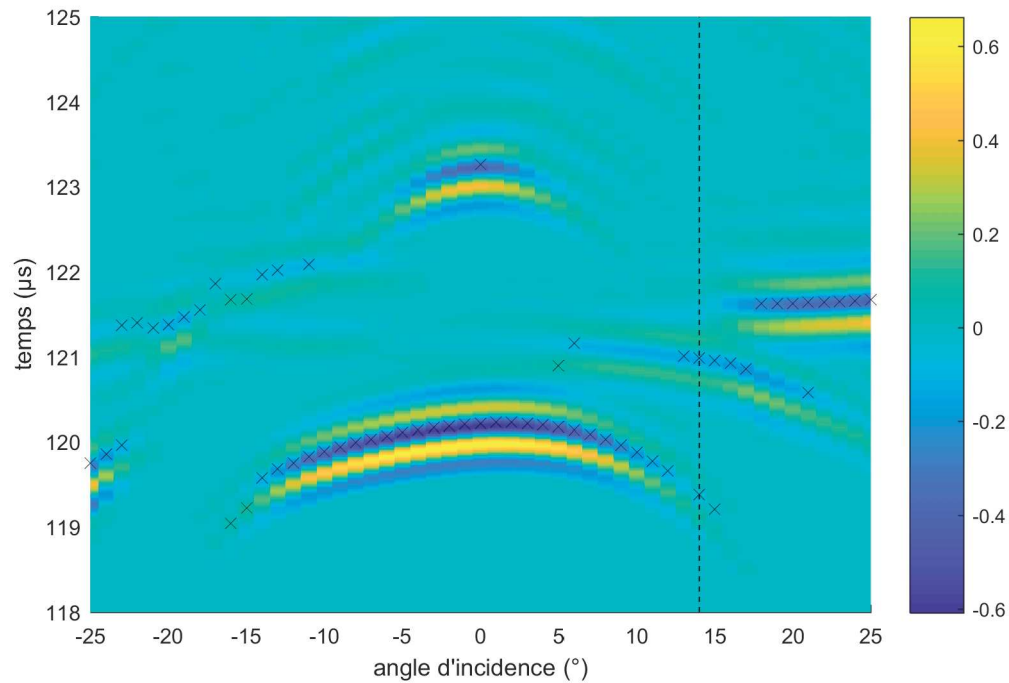
Identification des modes

Détection des échos par intercorrrelation

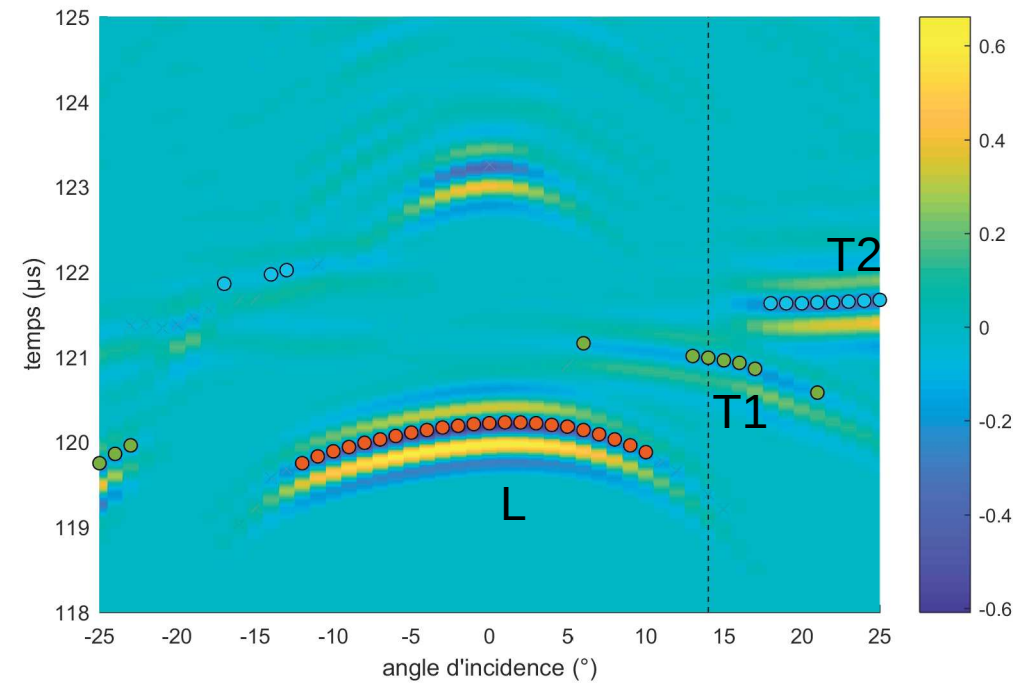


Identification des modes

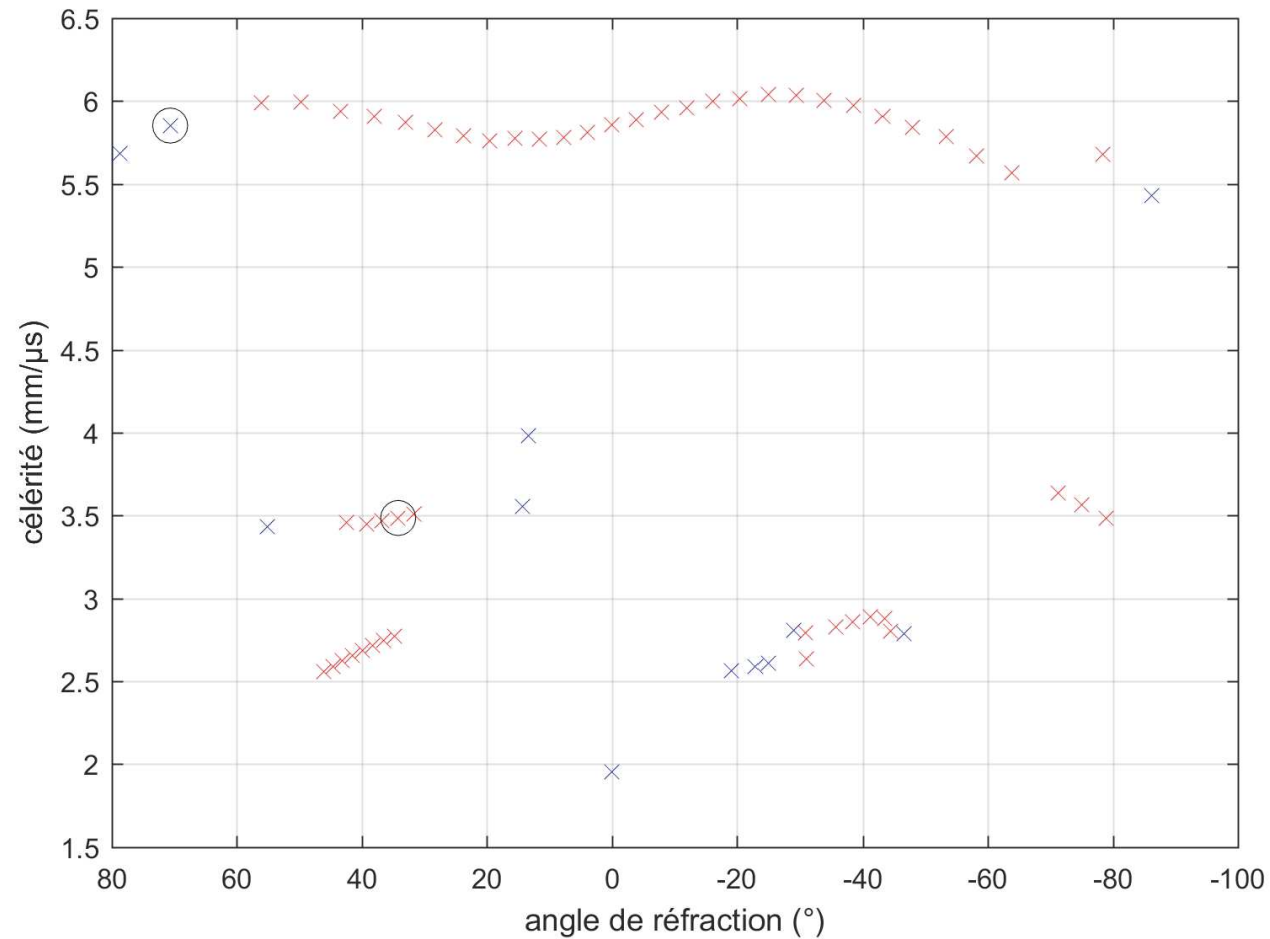
Détection des échos par intercorrélation



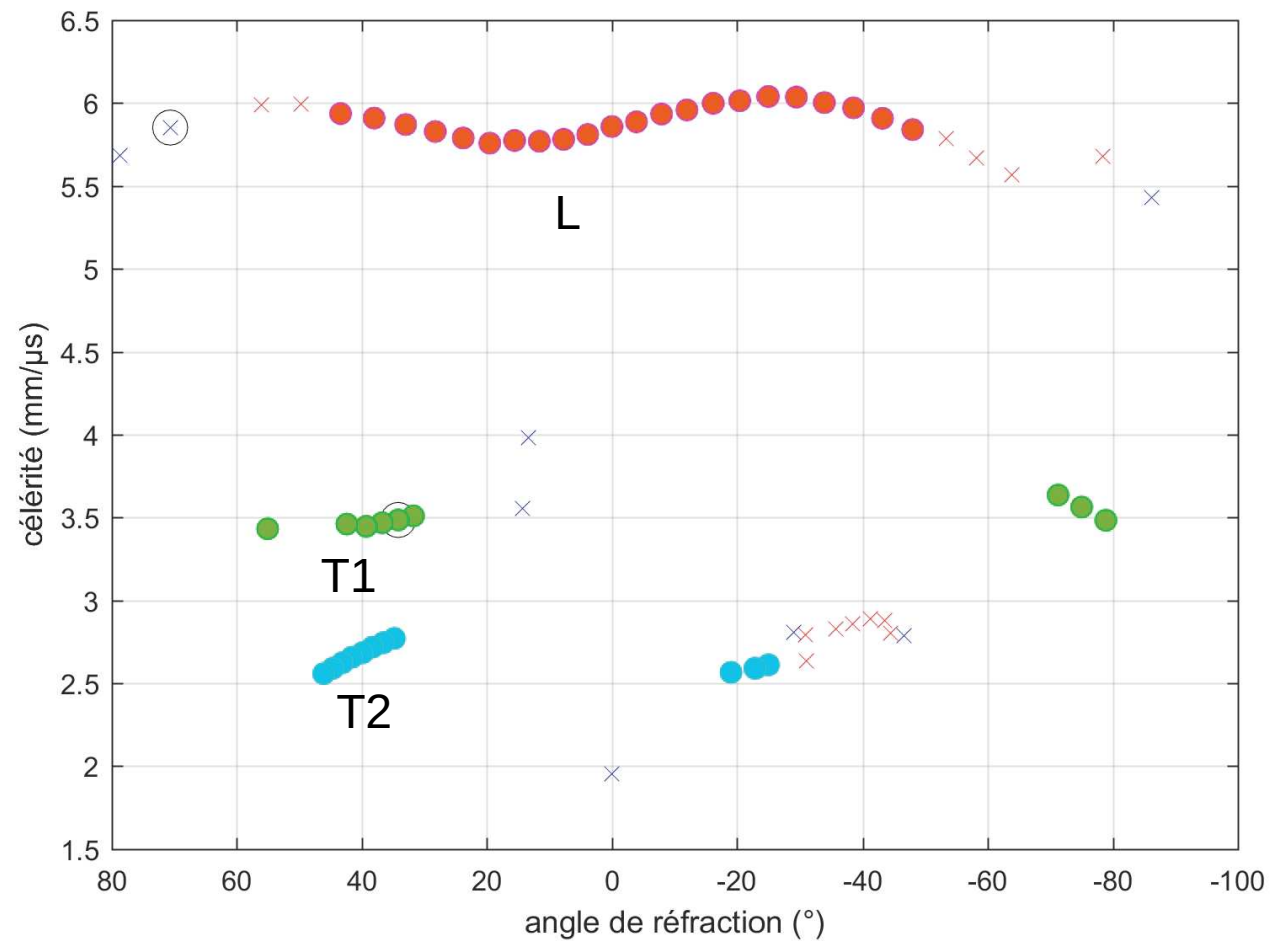
Identification des modes



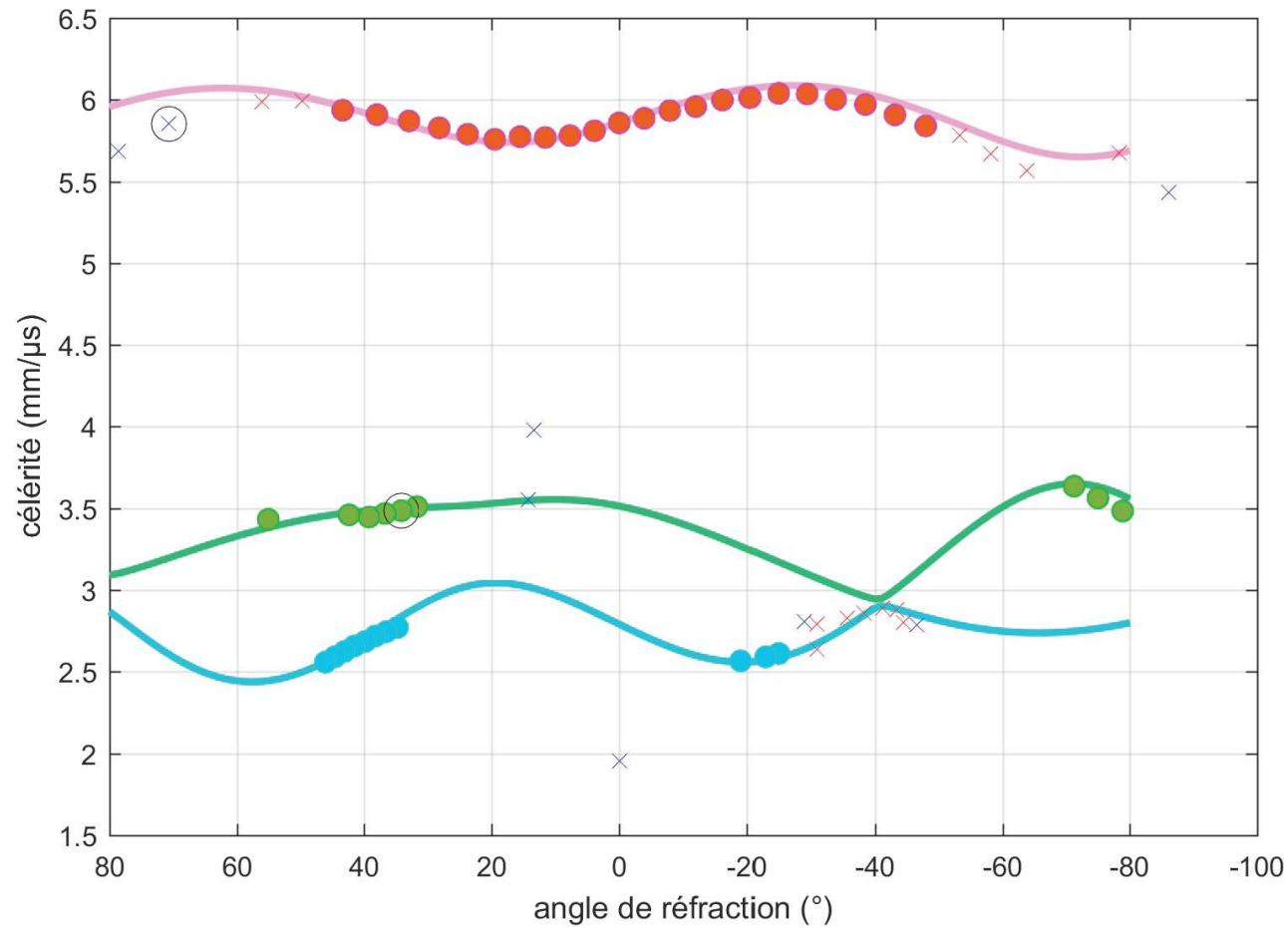
Identification des modes



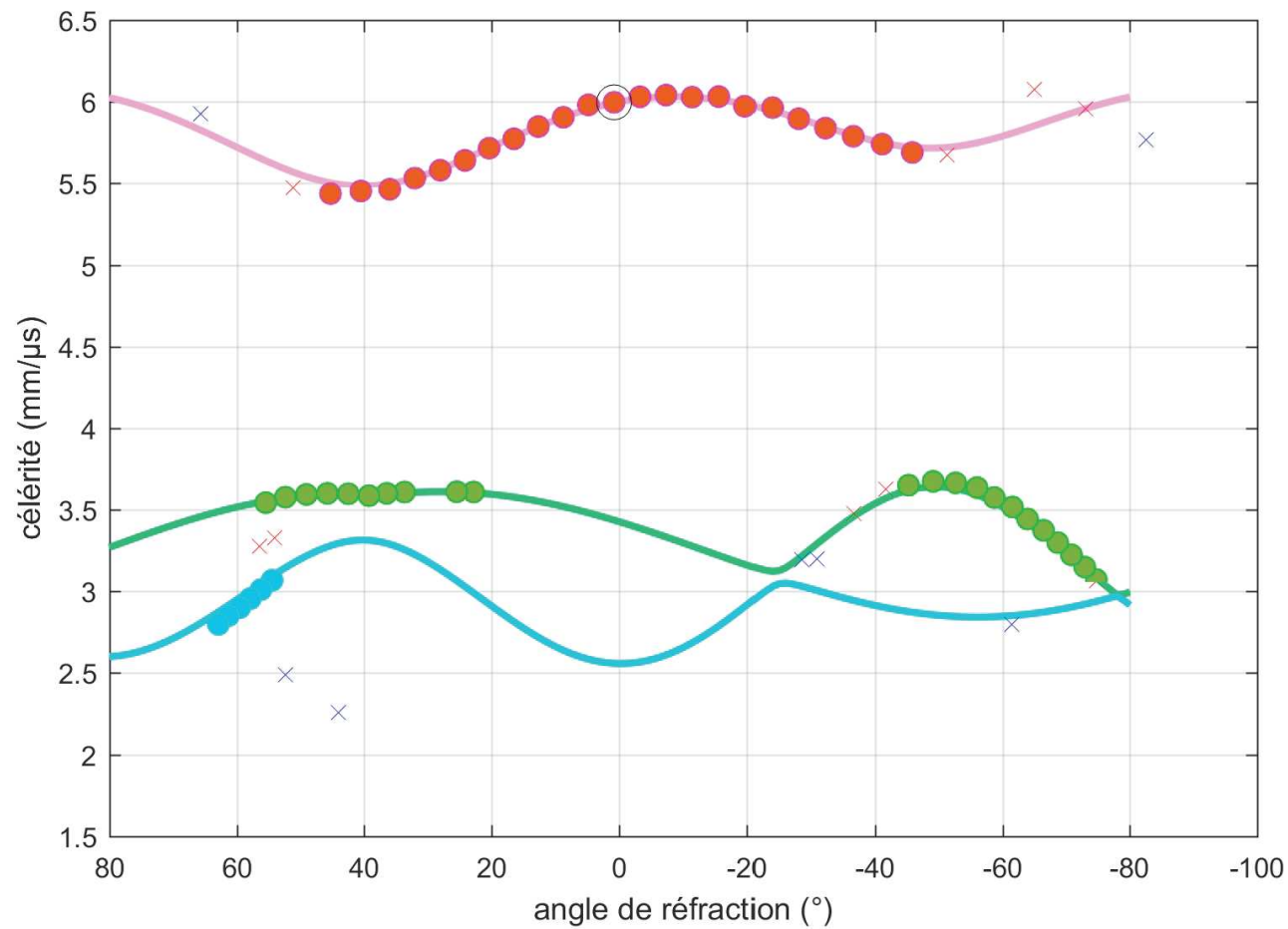
Identification des modes



Identification des modes

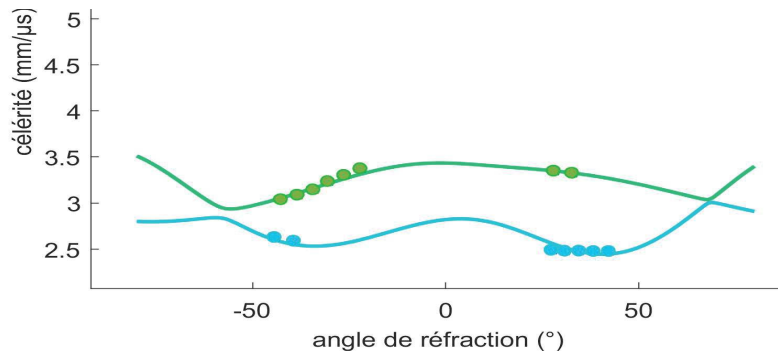


Identification des modes

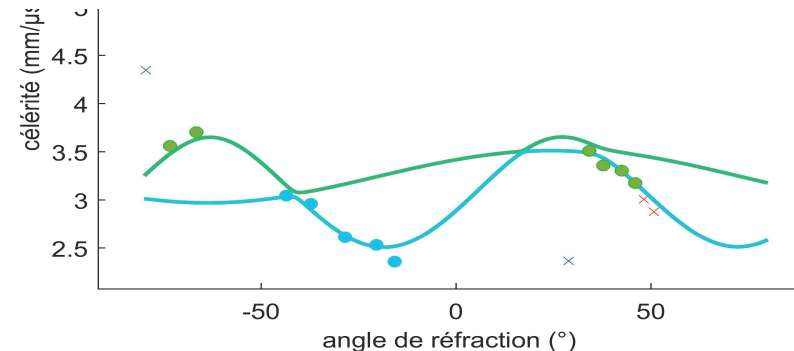


Focus sur les ondes Transverses

2 ondes T : Rapide identifiable Polarisation TH non identifiable
Lente TV

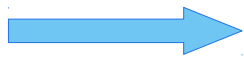


A) ondes T rapides et lentes séparées



B) ondes T rapides et lentes sur une branche continue (TV)

1 seule onde T : quel mode attribuer ?



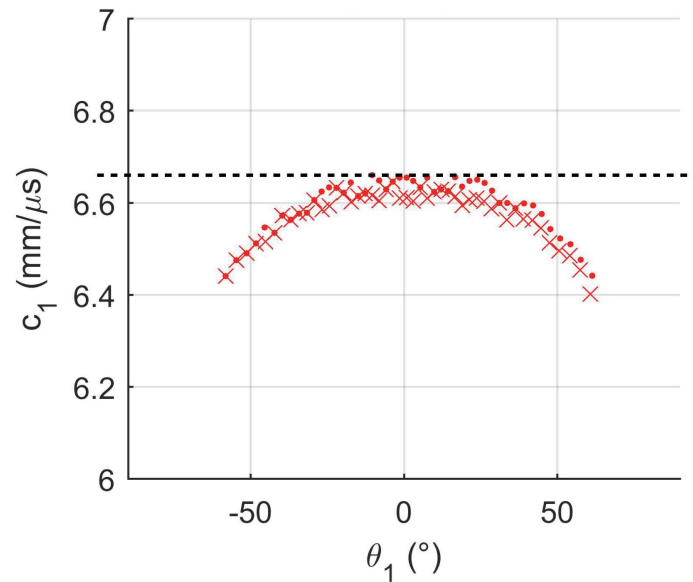
La sélection du mode des ondes Transverses conditionne le résultat d'optimisation

B) Influence des réglages expérimentaux

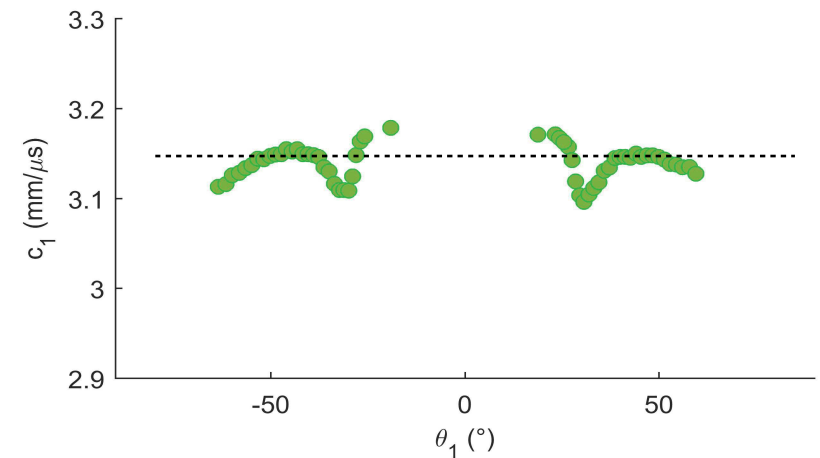
Influence du faisceau acoustique

Milieu isotrope : Aluminium

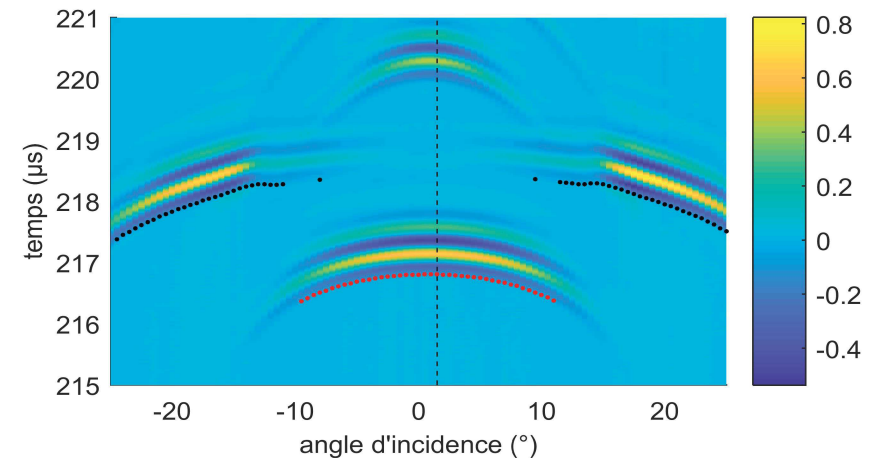
Ondes Longitudinales



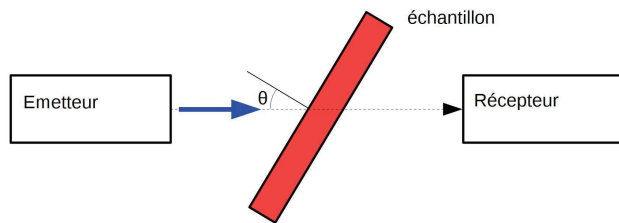
Ondes Transverses



Sélection des vitesses L
pour $-45^\circ < \theta < +45^\circ$

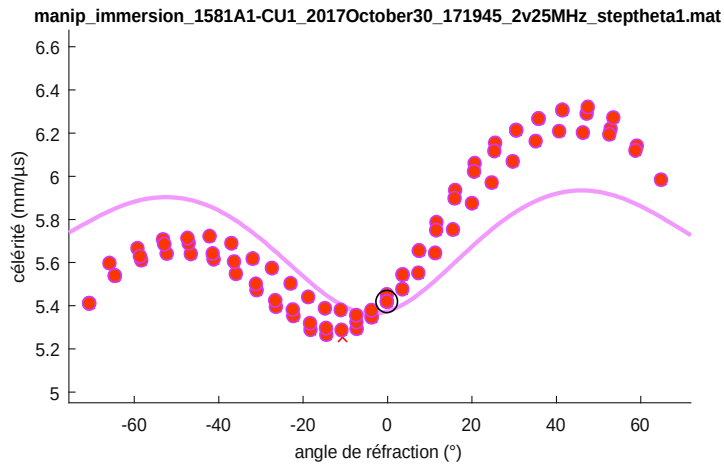


Influence de la précision de l'angle d'incidence

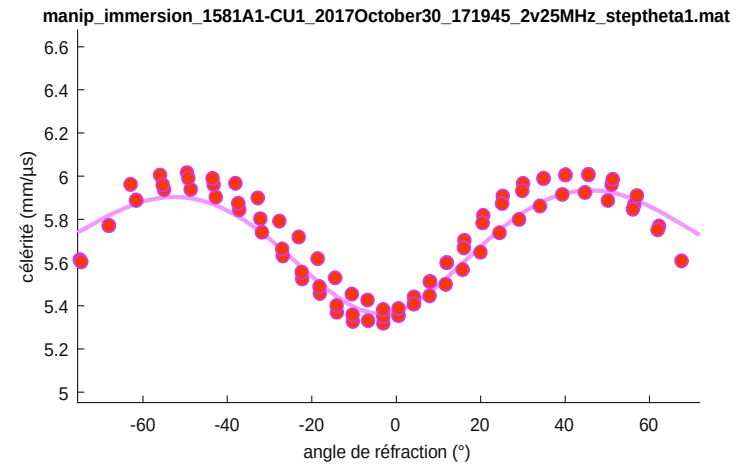


$$\theta_0 \text{ réel} = \theta_0 \text{ mesuré} + \Delta\theta_0$$

Vitesse de l'onde réfractée $c_1 = f(c_0, c_{1Lp}, \theta_0, e, dt)$



θ_0 initial

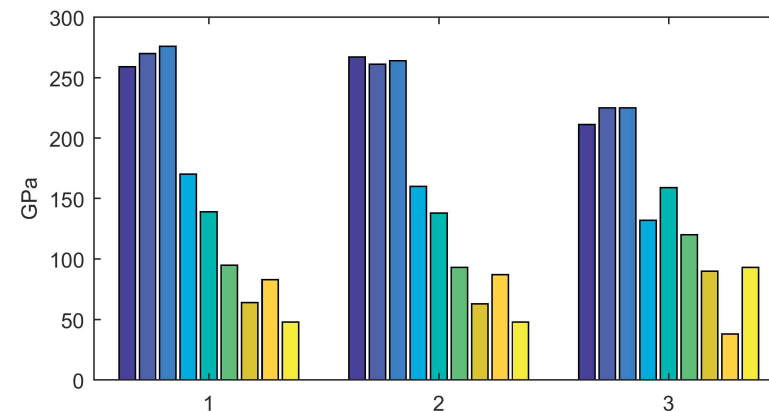
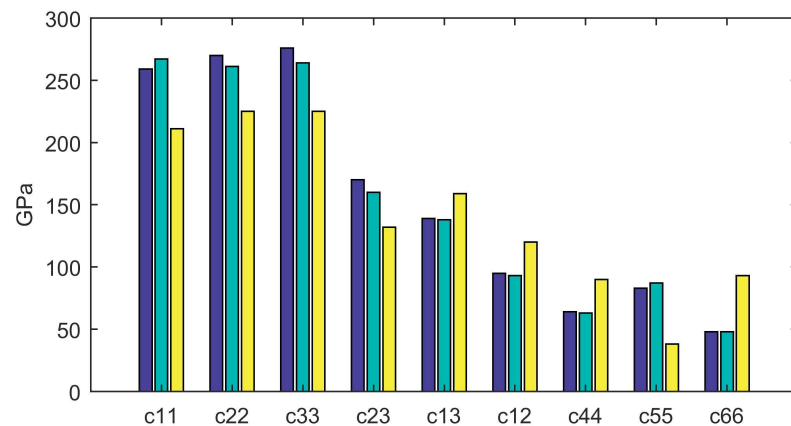


Correction $\theta_0 = \theta_0 + 1.2^\circ$

Erreur sur l'angle d'incidence

Influence de la précision de l'angle d'incidence : exemple de résultats d'optimisation (1562ATP0 12 mm)

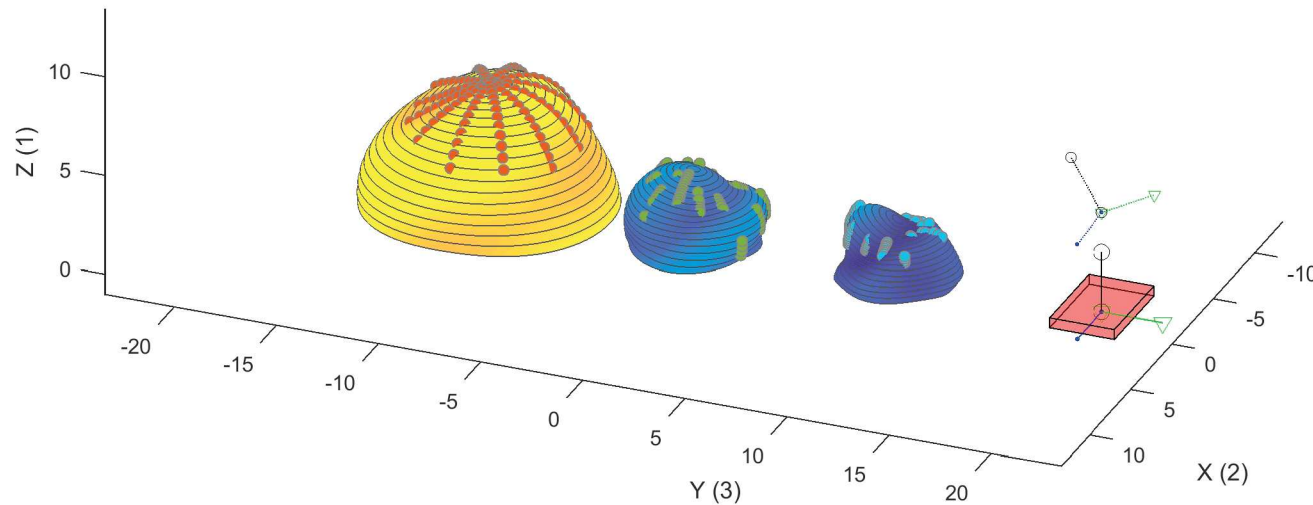
$\Delta\theta_0$	C11G Pa	C22 GPa	C33 GPa	C23G Pa	C13G Pa	C12 GPa	C44 GPa	C55G Pa	C66 GPa	ϕ	θ	ψ	Fval
-0,1°	259	270	276	170	139	95	64	83	48	1°	41°	-3°	0,7
-0,5°	267	261	264	160	138	93	63	87	48	-2°	40°	-3°	0,59
-0,68°	211	225	225	132	159	120	90	38	93	-4°	84°	-2°	0,45



Solutions pour améliorer la fiabilité des résultats

- Alignement très précis des transducteurs
- Compensation de voilage lors de la rotation sur les différents plans d'incidence ($0,1^\circ$ à $0,2^\circ$)
- Sélection des modes transverses sur des plages où l'on obtient 2 modes séparés (transverse rapide et lente)
- Visualisation sous plusieurs modalités des vitesses mesurées

Validations sur des échantillons à différents angles de coupe

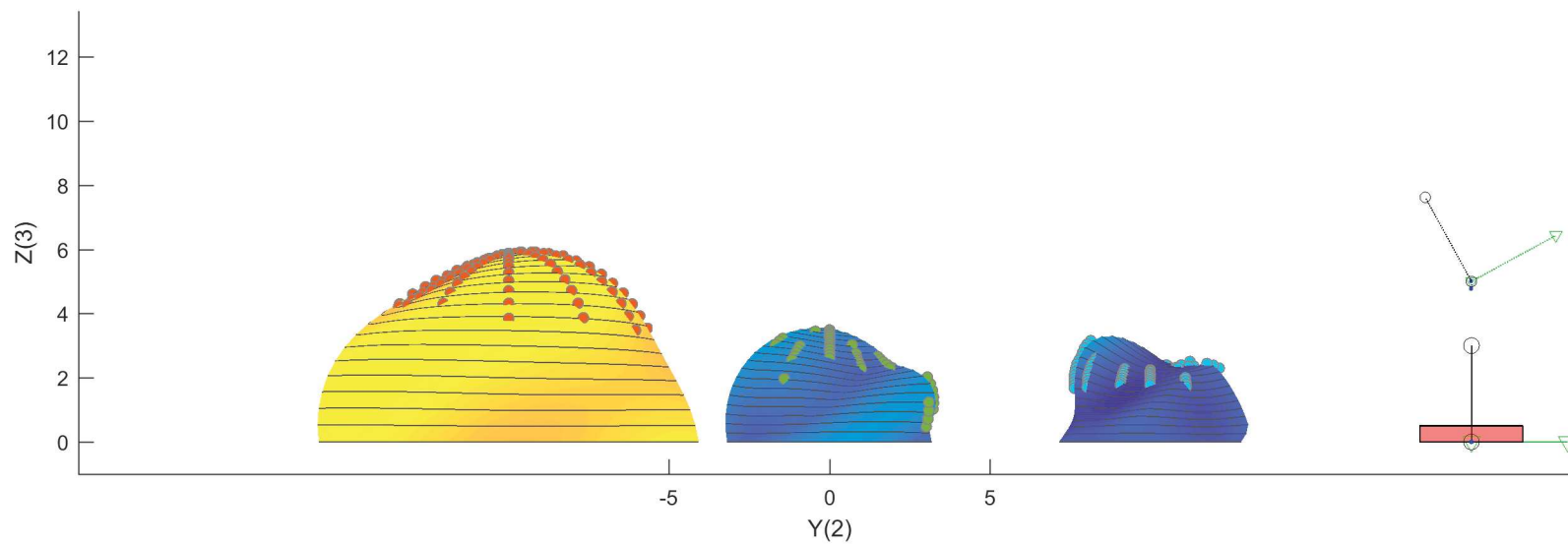


manip_immersion_1581A1-CU2_2018January26_161240_2.25MHz_avec_correction
oilage_stepphi30_SA_sol_output_123BUNGE.mat

C11	249
C22	249
C33	234
C23	138
C13	144
C12	130
C44	109
C55	110
C66	76

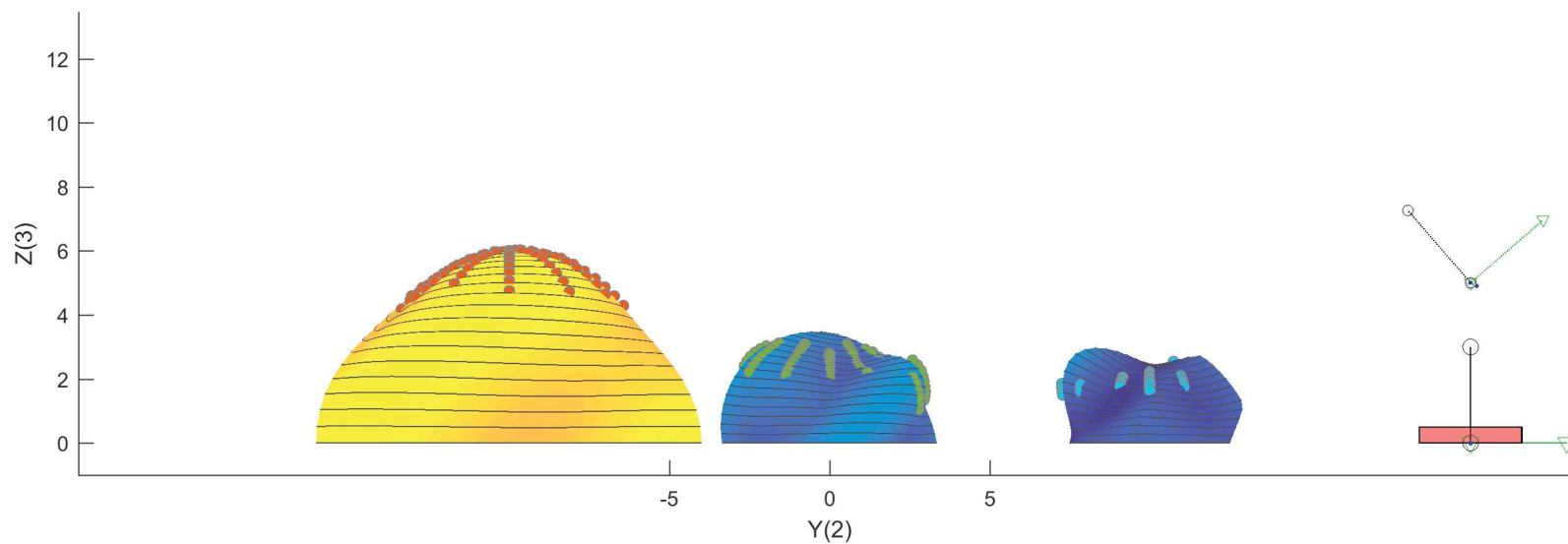
Phi	8
Theta	29
Psi	-9

rho	8.2
-----	-----



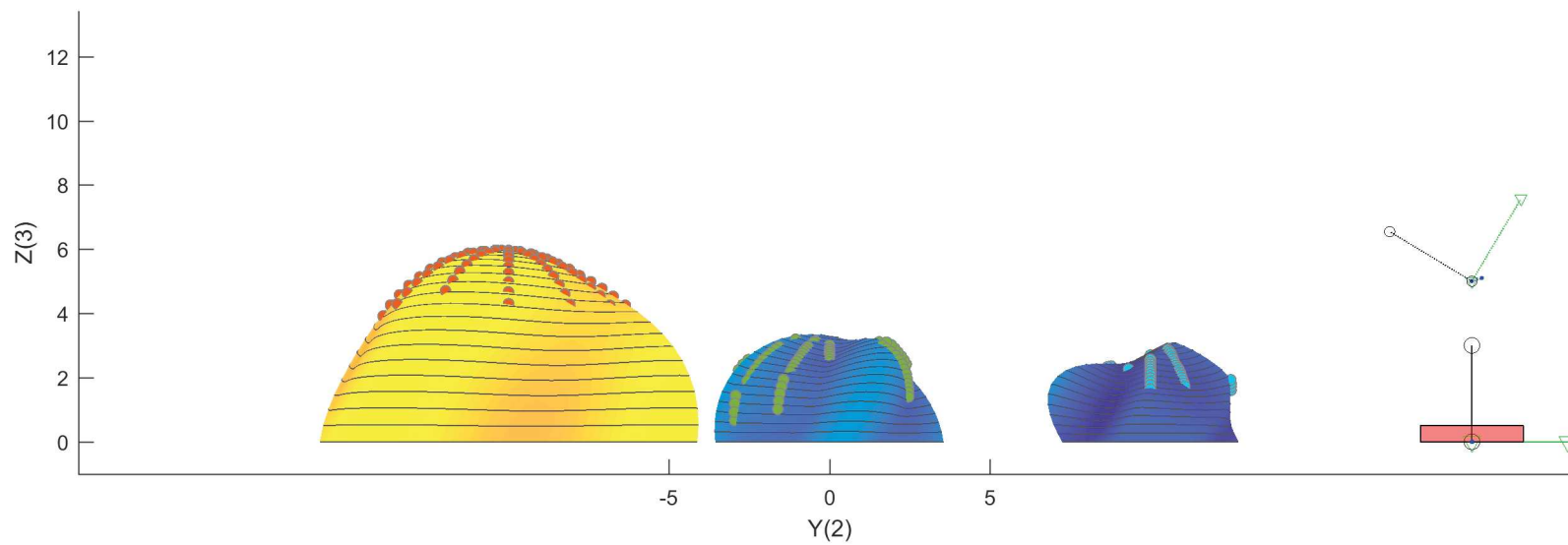
C11	249	
C22	249	
C33	234	
C23	138	
C13	144	GPa
C12	130	
C44	109	
C55	110	
C66	76	
Phi	8	
Theta	29	Deg
Psi	-9	

manip_immersion_1581A1-CU2_2018January26_161240_2.25MHz_avec_correction_voila
_stepphi30_SA_sol_output_123BUNGE.mat



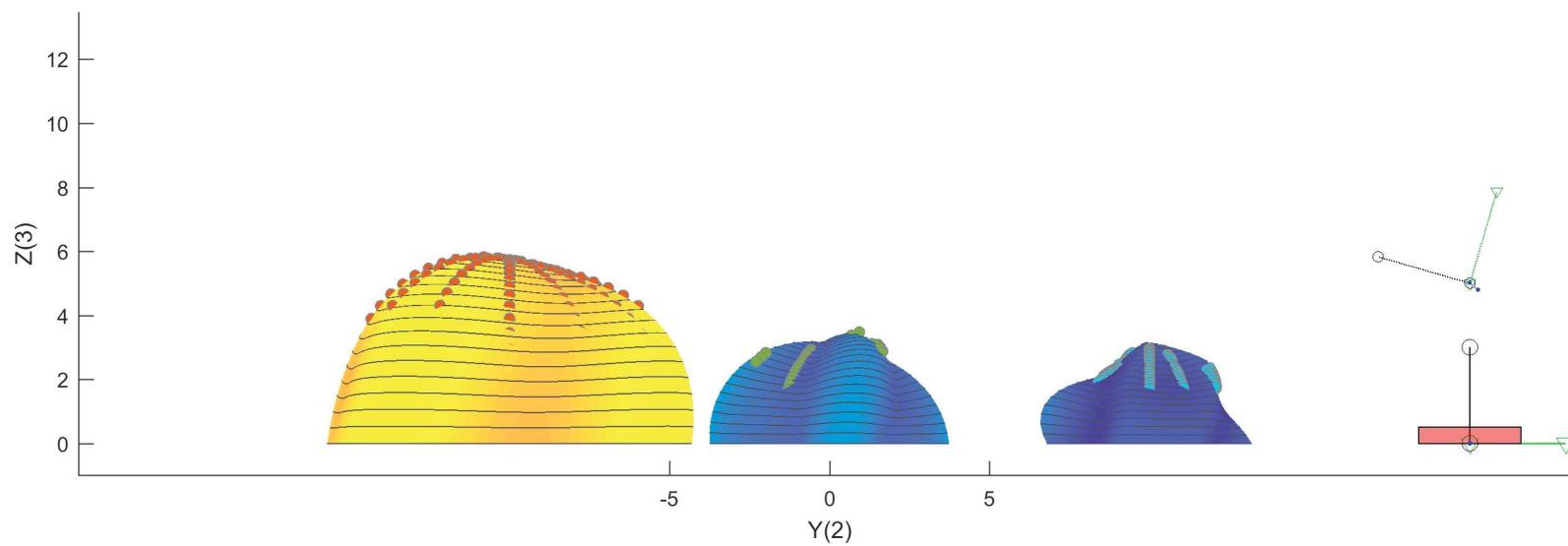
C11	249	
C22	244	
C33	234	
C23	140	
C13	143	GPa
C12	130	
C44	108	
C55	110	
C66	80	
Phi	6	
Theta	41	Deg
Psi	-3	

manip_immersion_1581A1-CU3_2018January26_172611_2.25MHz_avec_correction_voila
_stepphi30_SA_sol_output_123BUNGE.mat



C11	246	
C22	255	
C33	233	
C23	136	
C13	137	GPa
C12	124	
C44	105	
C55	113	
C66	81	
Phi	5	
Theta	59	Deg
Psi	2	

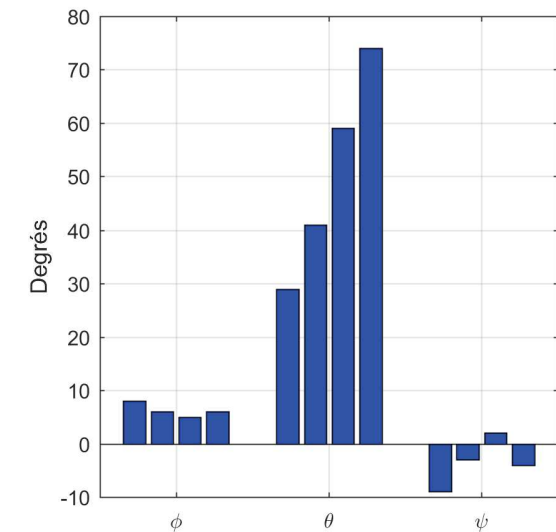
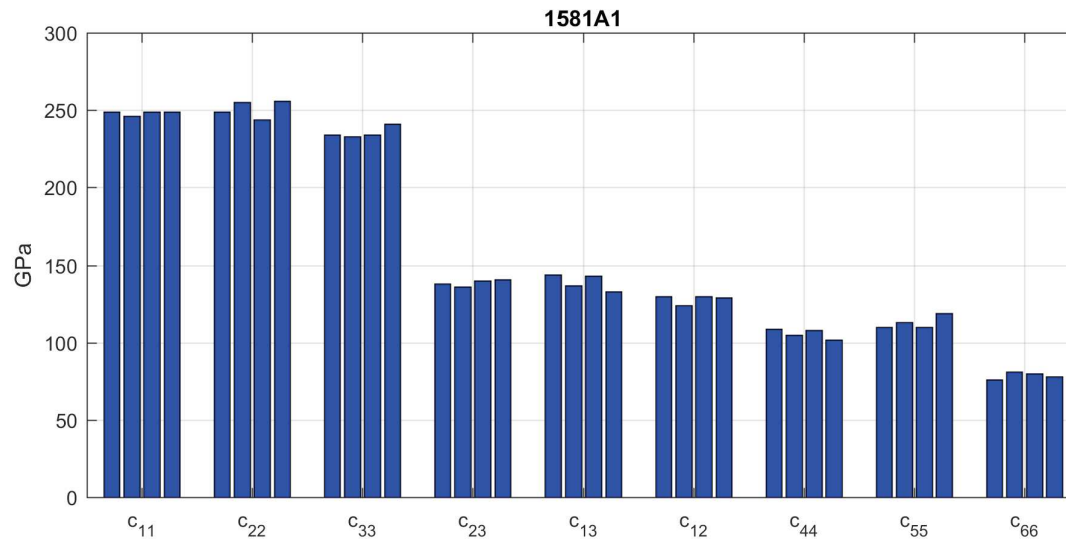
manip_immersion_1581A1-CU4_2018January29_093636_2.25MHz_avec_correction_voila
_stepphi30_SA_sol_output_123BUNGE.mat



C11	249	
C22	256	
C33	241	
C23	141	
C13	133	GPa
C12	129	
C44	102	
C55	119	
C66	78	
Phi	6	
Theta	74	Deg
Psi	-4	

manip_immersion_1581A1-CU5_2018January29_103748_2.25MHz_avec_correction_voila
_stepphi30_SA_sol_output.mat

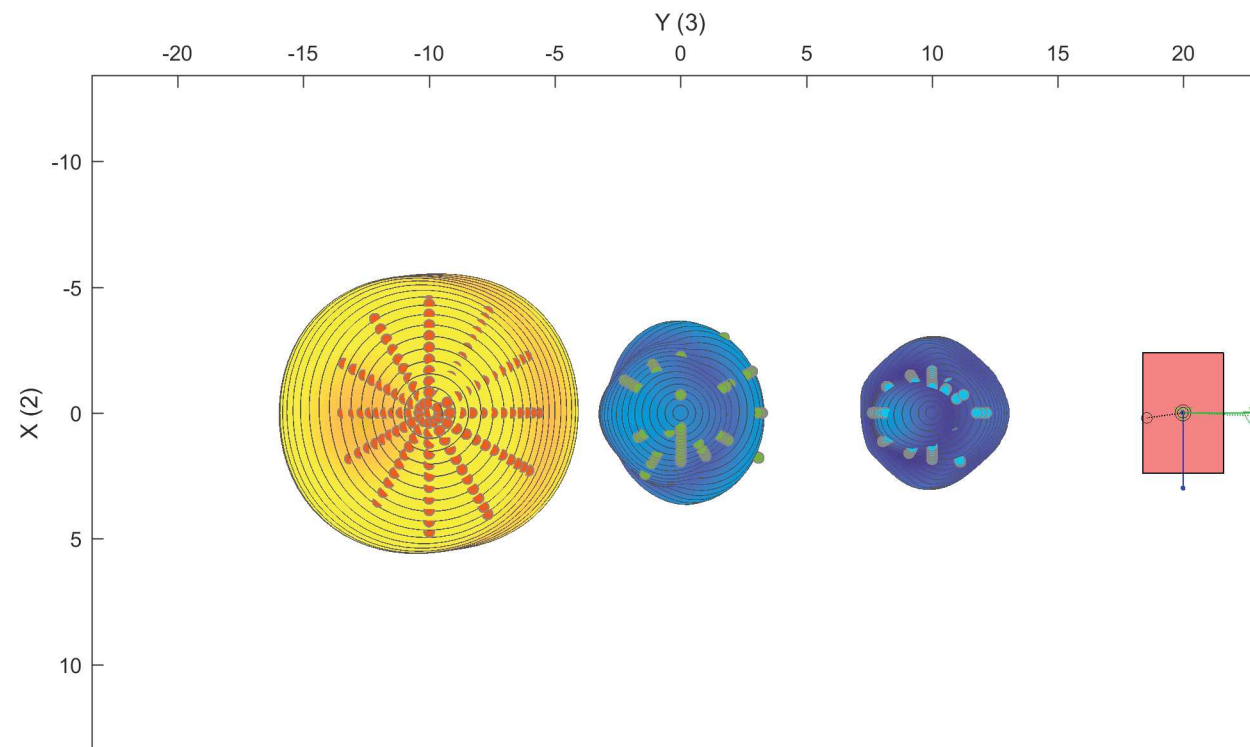
Modules c_{ij} obtenus et angles d'orientation



	c_{11}	c_{22}	c_{33}	c_{23}	c_{13}	c_{12}	c_{44}	c_{55}	c_{66}
C_{ij} moy	248	251	235	139	139	138	106	113	79
écart-type	1,5	5,6	2,2	5,1	2,9	3,1	1,2	2,2	1,2

	θ optimi	θ coupe	Δ
Ech 1	29°	37°	8°
Ech 2	41°	53°	12°
Ech 3	59°	71°	12°
Ech 4	74°	83°	9°

Augmentation de la résolution



manip_immersion_1581A1-CU2_2018January26_161240_2.25MHz_avec_correction
oilage_stepphi30_SA_sol_output_123BUNGE.mat

C11 249

C22 249

C33 234

C23 138

C13 144

C12 130

C44 109

C55 110

C66 76

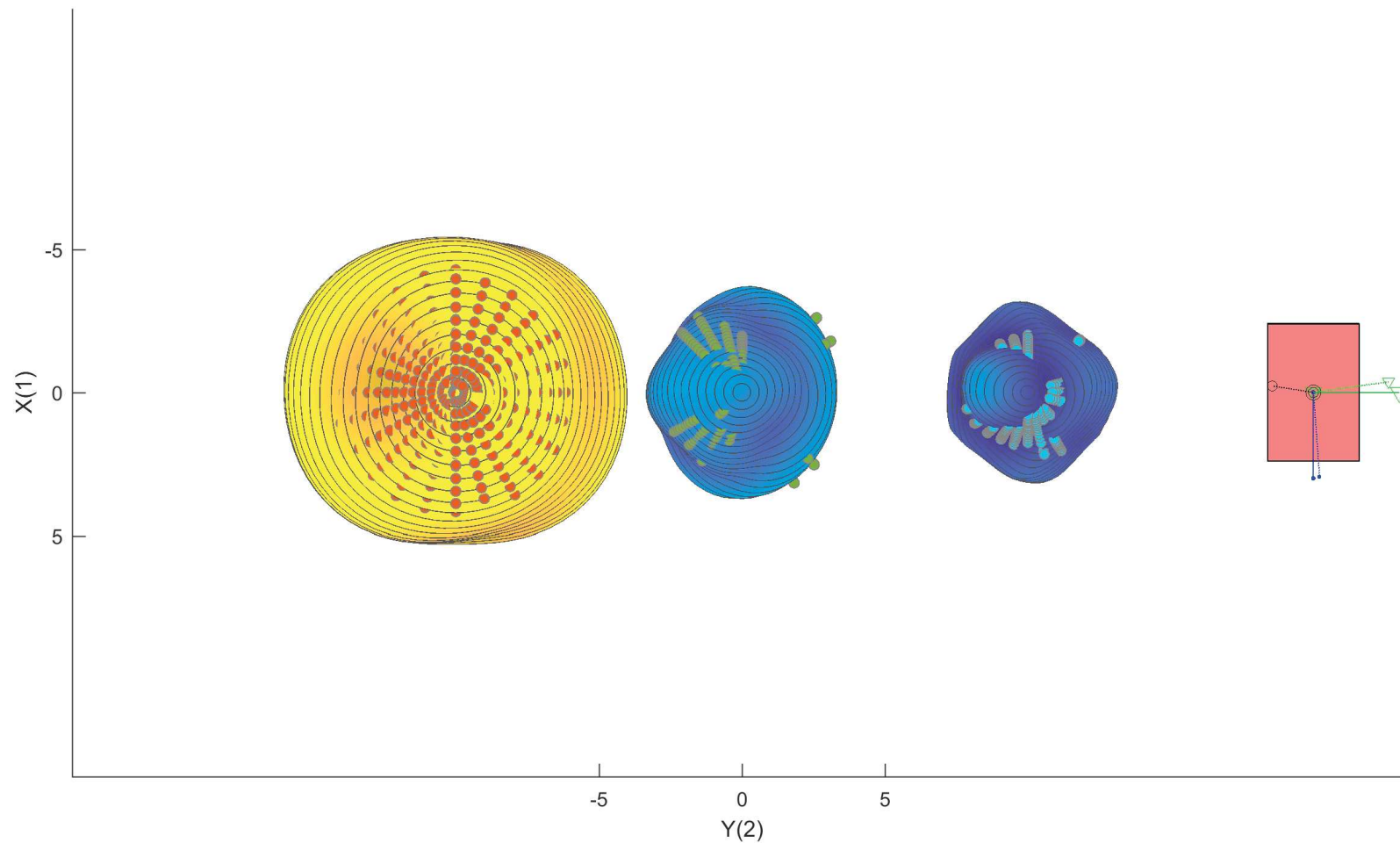
Phi 8

Theta 29

Psi -9

rho 8.2

Augmentation de la résolution



C11	225	
C22	257	
C33	227	
C23	143	
C13	131	GPa
C12	125	
C44	109	
C55	114	
C66	83	
Phi	-9	
Theta	29	Deg
Psi	15	

Augmentation de la résolution

	c_{11}	c_{22}	c_{33}	c_{23}	c_{13}	c_{12}	c_{44}	c_{55}	c_{66}
$C_{ij} \ 1$	248	251	235	139	139	128	106	113	79
$C_{ij} \ 2$	225	257	227	143	131	125	109	114	83

4 plans d'incidence

7 plans d'incidence



Affinement du résultat

Conclusions

- Avoir une très haute précision sur le réglage d'alignement
- Sélection des modes selon les ondes T rapides et lentes
- Augmenter la résolution en nombre de plans d'incidence
- Mesure de la partie réelle des aciers considérée validée