



HAL
open science

Application du retournement temporel aux ondes de Lamb pour le CND de structures multiplaques immergées

Jean-Christophe Vallée, Marie-Aude Ploix, Matthieu Cavaro, Francois Baqué,
Jean-Francois Chaix

► **To cite this version:**

Jean-Christophe Vallée, Marie-Aude Ploix, Matthieu Cavaro, Francois Baqué, Jean-Francois Chaix. Application du retournement temporel aux ondes de Lamb pour le CND de structures multiplaques immergées. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. hal-03847765

HAL Id: hal-03847765

<https://hal.science/hal-03847765v1>

Submitted on 12 Apr 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.

APPLICATION DU RETOURNEMENT TEMPOREL AUX ONDES DE LAMB POUR LE CONTROLE NON DESTRUCTIF DES STRUCTURES MULTI-PLAQUES IMMERGEES EN SODIUM LIQUIDE



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

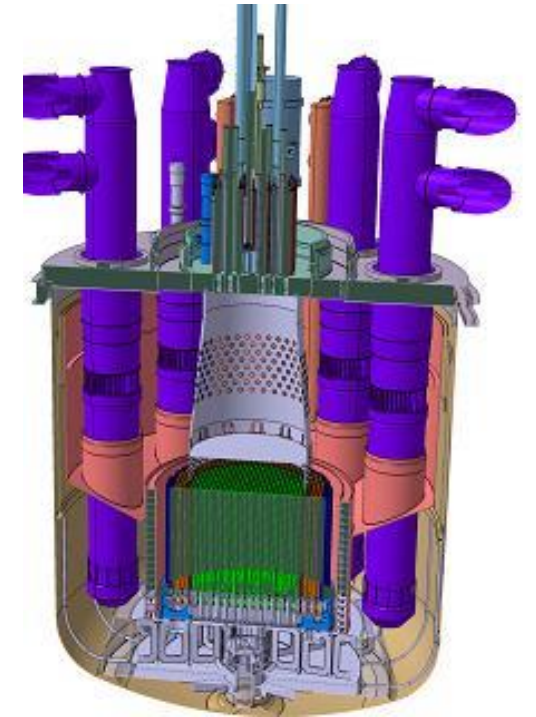
Encadrement:

Jean-François Chaix
Marie-Aude Ploix
Matthieu Cavaro
François Baqué

CFA 2022 – 11 avril 2022

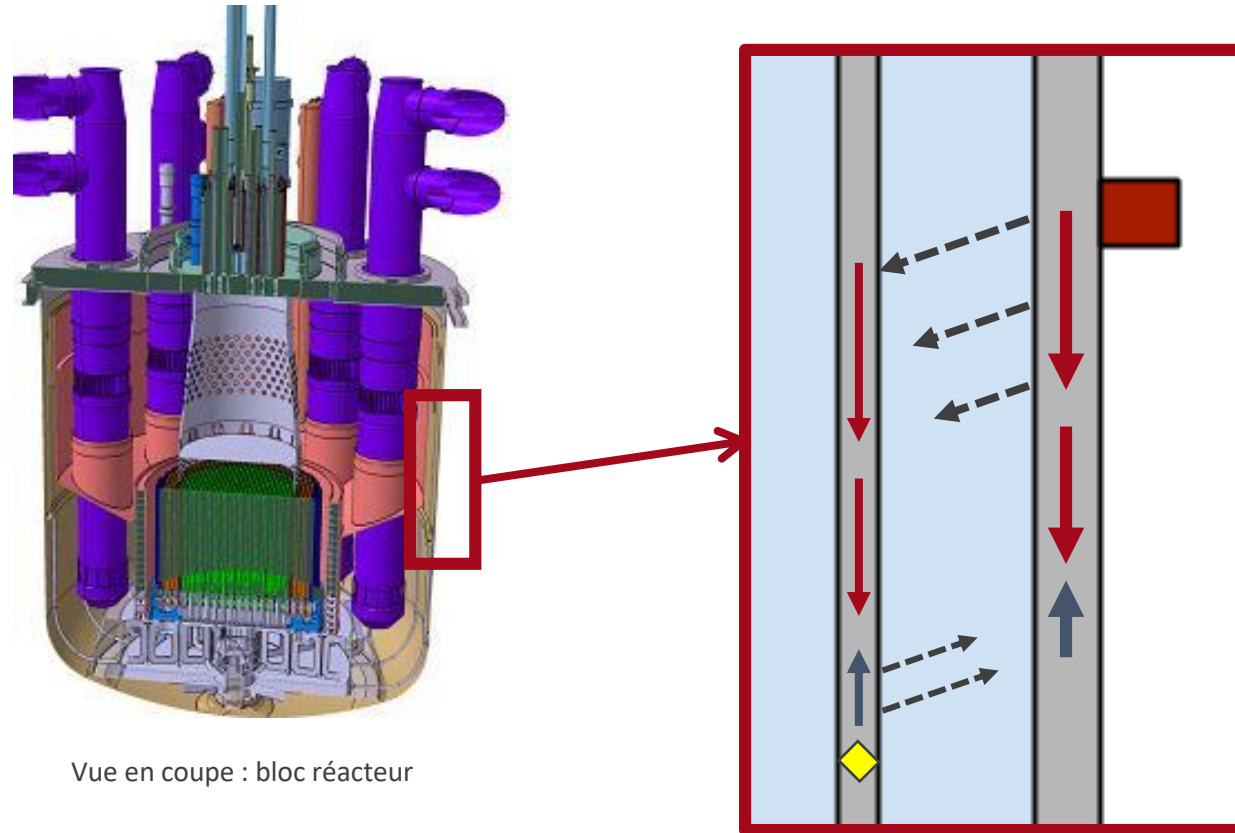


- ▶ **Démonstration de sûreté de réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium liquide (inspectabilité, ...)**
- ▶ **Sodium liquide opaque, réactif à l'air et l'eau, difficilement vidangeable**
- ▶ **Contrôle non destructif par ondes ultrasonores : bien adapté**
- ▶ **Inspection depuis l'intérieur :**
 - Immersion d'un traducteur spécifique entre 200°C et 500°C (sodium, température, mouillabilité...) : TUSHT



Vue en coupe : bloc réacteur

- ▶ **Inspection de la cuve depuis l'extérieur (avec capteur hors du sodium) :**
 - Ondes guidées dans la cuve principale qui rayonnent dans le sodium

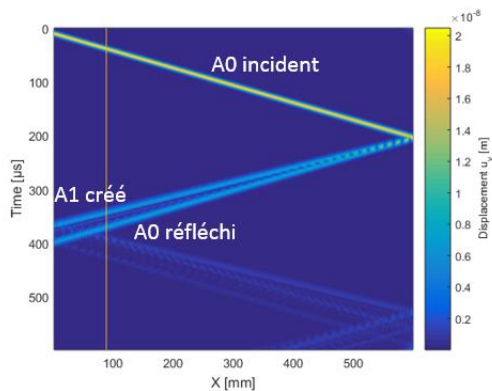


Vue en coupe : bloc réacteur

- **Inspection de la cuve depuis l'extérieur (avec capteur hors du sodium) :**
 - Ondes guidées dans la cuve principale qui rayonnent dans le sodium

Ondes de Lamb

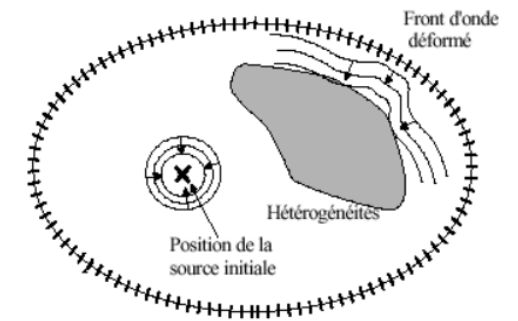
- Propagation des ondes de Lamb fuyantes (Leaky Lamb Waves) dans un système à n plaques solides immergées
- Interaction des modes de Lamb avec différents types de défauts



Bscan des déplacements d'une plaque [Kauffmann, 2018]

Retournement temporel

- Appliquer le retournement temporel sur des ondes guidées dans un système à n plaques
- Application de l'énergie topologique



Retournement temporel [Fink, 1992]

Détecter, localiser et caractériser des défauts potentiels

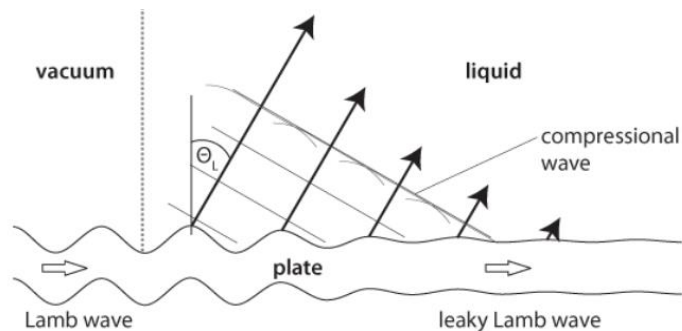
Ondes se propageant dans une plaque élastique immergée infinie

Nombres d'ondes (équations de dispersion) [Merkulov] :

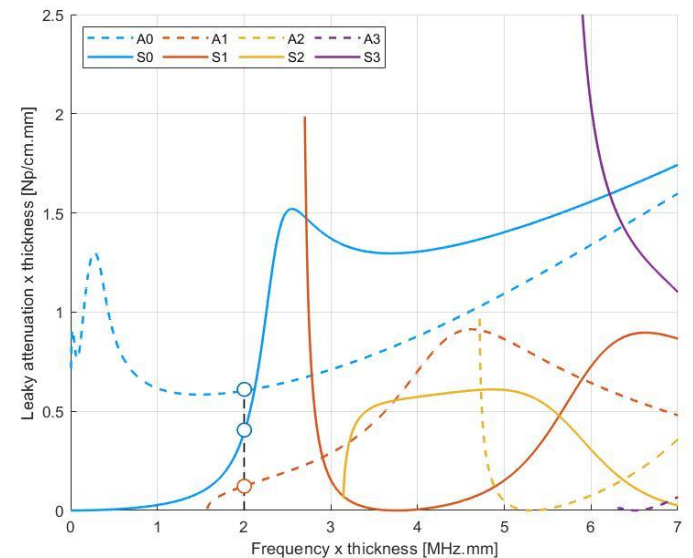
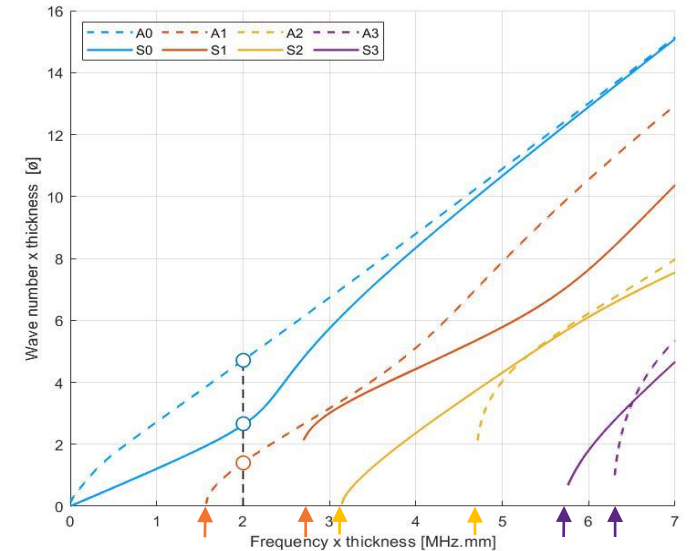
$$\text{Modes symétriques : } \frac{\tan\left(\frac{qe}{2}\right)}{\tan\left(\frac{pe}{2}\right)} + \frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} - i \frac{\rho_0 k_T^4 p \tan\left(\frac{qe}{2}\right)}{\rho \sqrt{k_0^2 - k^2} (q^2 - k^2)^2} = 0$$

$$\text{Modes antisymétriques : } \frac{\tan\left(\frac{pe}{2}\right)}{\tan\left(\frac{qe}{2}\right)} + \frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} + i \frac{\rho_0 k_T^4 p}{\rho \sqrt{k_0^2 - k^2} (q^2 - k^2)^2 \tan\left(\frac{qe}{2}\right)} = 0$$

e : épaisseur de plaque, $p^2 = k_L^2 - k^2$, $q^2 = k_T^2 - k^2$

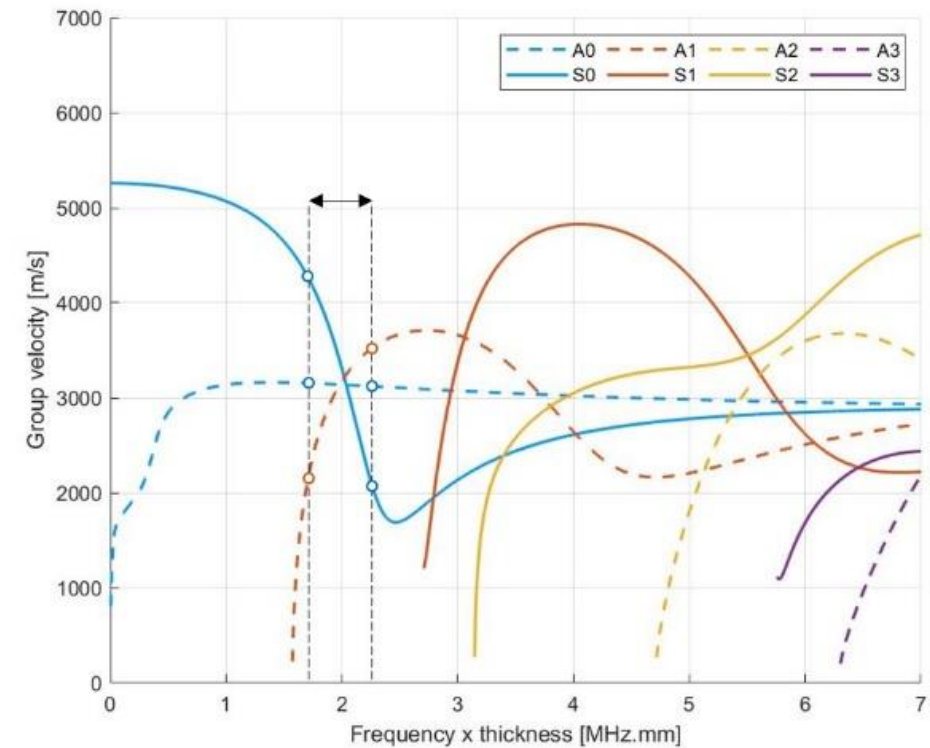
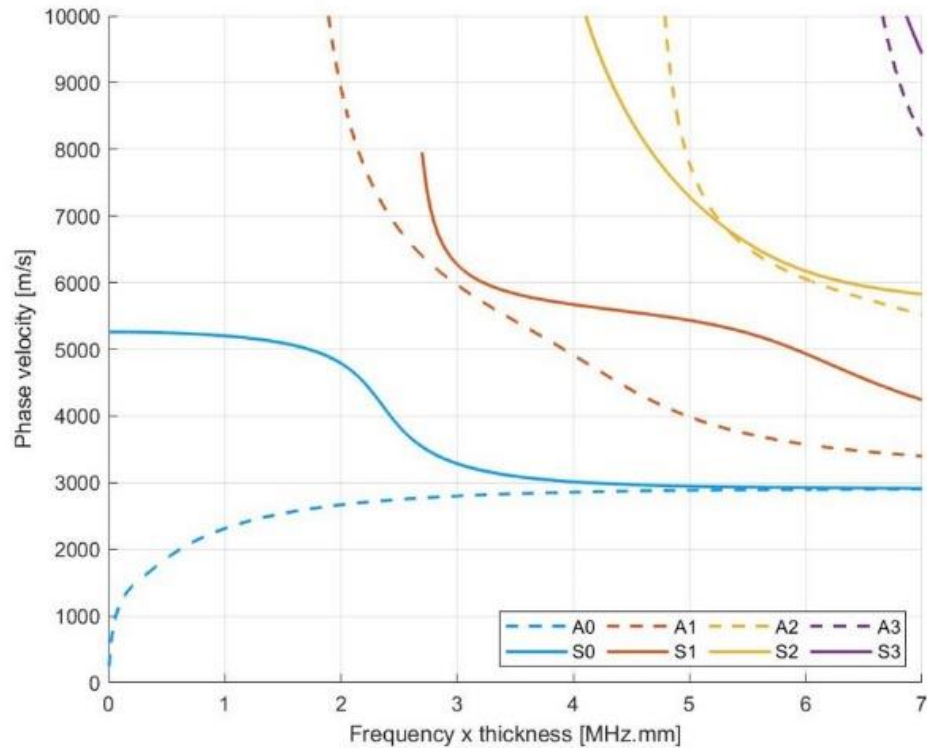


Réémission des *Leaky Lamb Waves* (LLW) (Schmitt et al. 2013)



$$c_p = \frac{2\pi f}{k}$$

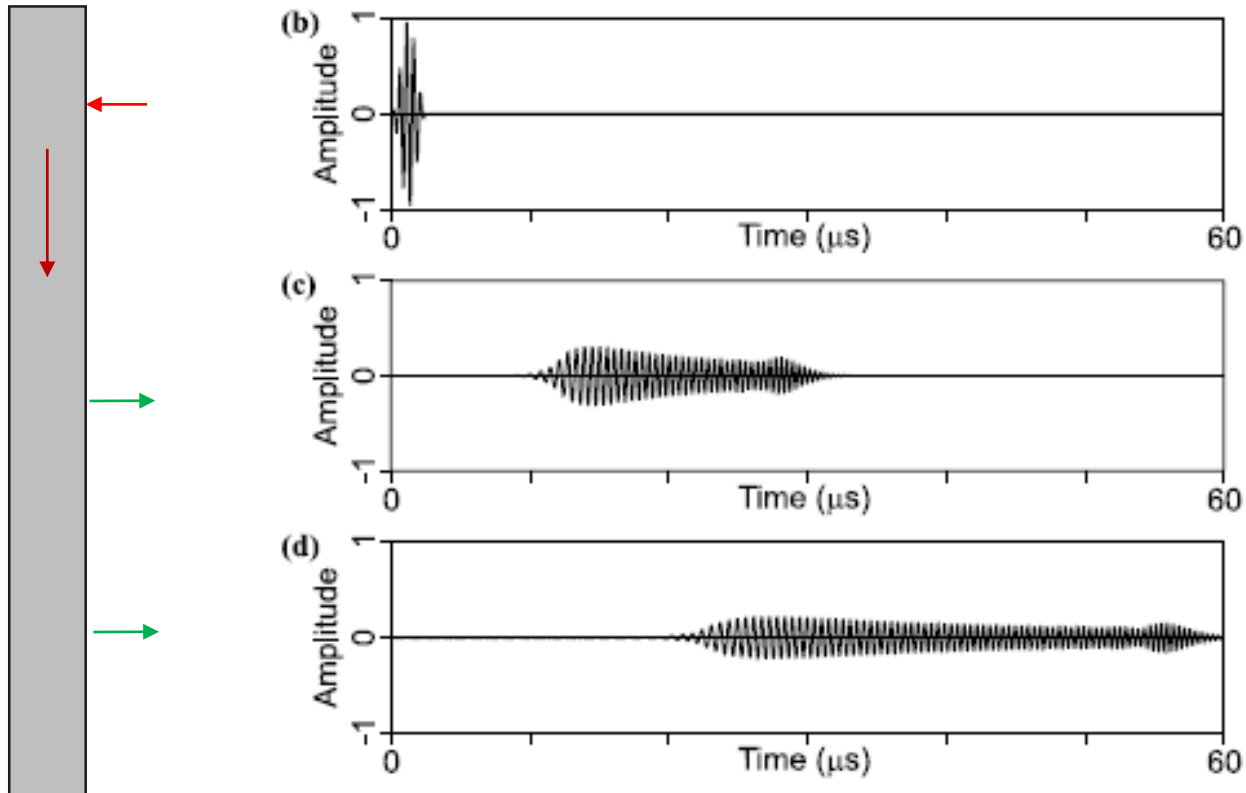
$$c_g = 2\pi \frac{\partial f}{\partial k}$$



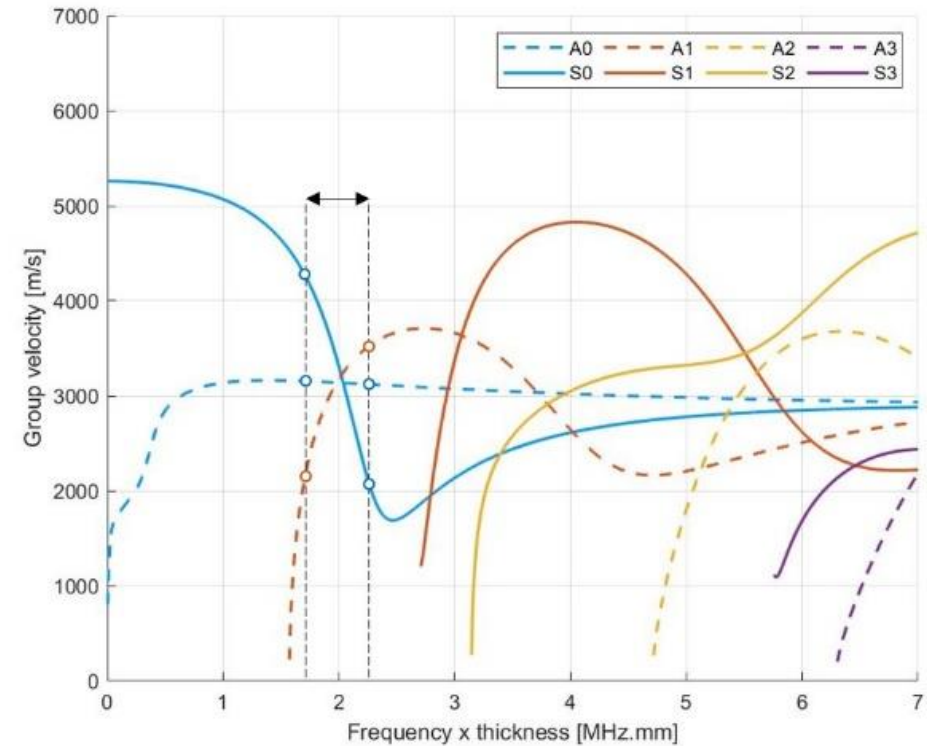
Deux remarques :

- Caractère multimodal de la propagation des ondes de Lamb : plusieurs modes coexistent à une même fréquence
- Caractère dispersif de la propagation des ondes de Lamb : variation de vitesse de groupe sur la plage de fréquences

[Wilcox 2001]



$$c_g = 2\pi \frac{\partial f}{\partial k}$$



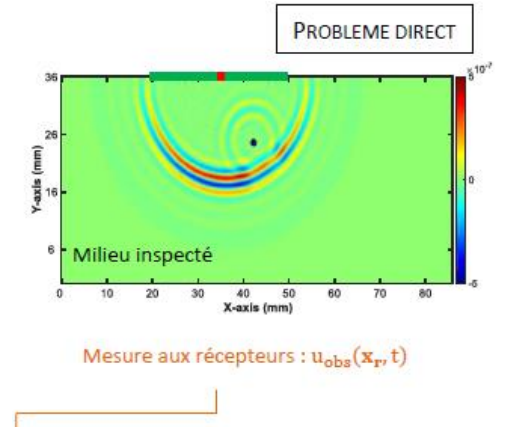
Deux remarques :

- Caractère multimodal de la propagation des ondes de Lamb : plusieurs modes coexistent à une même fréquence
- Caractère dispersif de la propagation des ondes de Lamb : Variation de vitesse de groupe sur la plage de fréquences

Etapes du process de l'énergie topologique [Dominguez, 2005]

1. **Mesure dans le milieu inconnu** Ω_{insp} avec un réseau linéaire de transducteurs :

On obtient $u_m(\vec{r}, t)$ sur le bord Γ_m pour $t \in [0, T]$.



[Lubeigt, 2017]

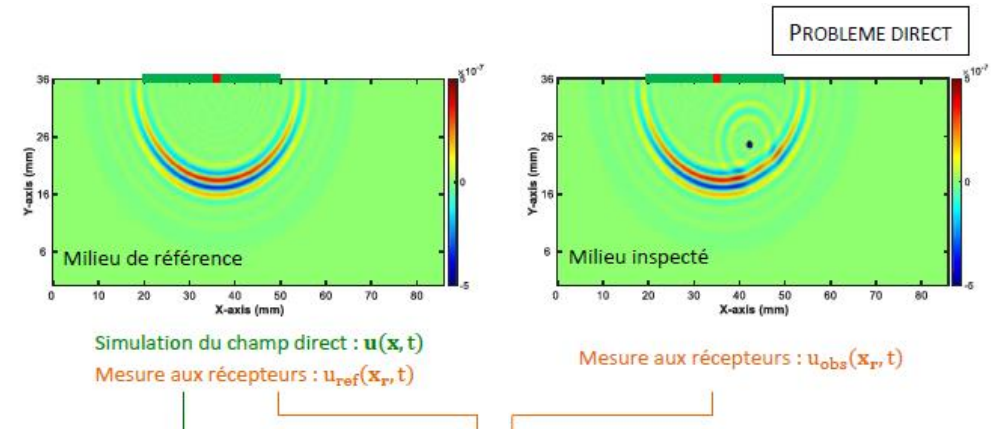
Etapes du process de l'énergie topologique [Dominguez, 2005]

- Mesure dans le milieu inconnu** Ω_{insp} avec un réseau linéaire de transducteurs :

On obtient $u_m(\vec{r}, t)$ sur le bord Γ_m pour $t \in [0, T]$.

- Résolution numérique du problème direct** dans le milieu de référence Ω_0 :

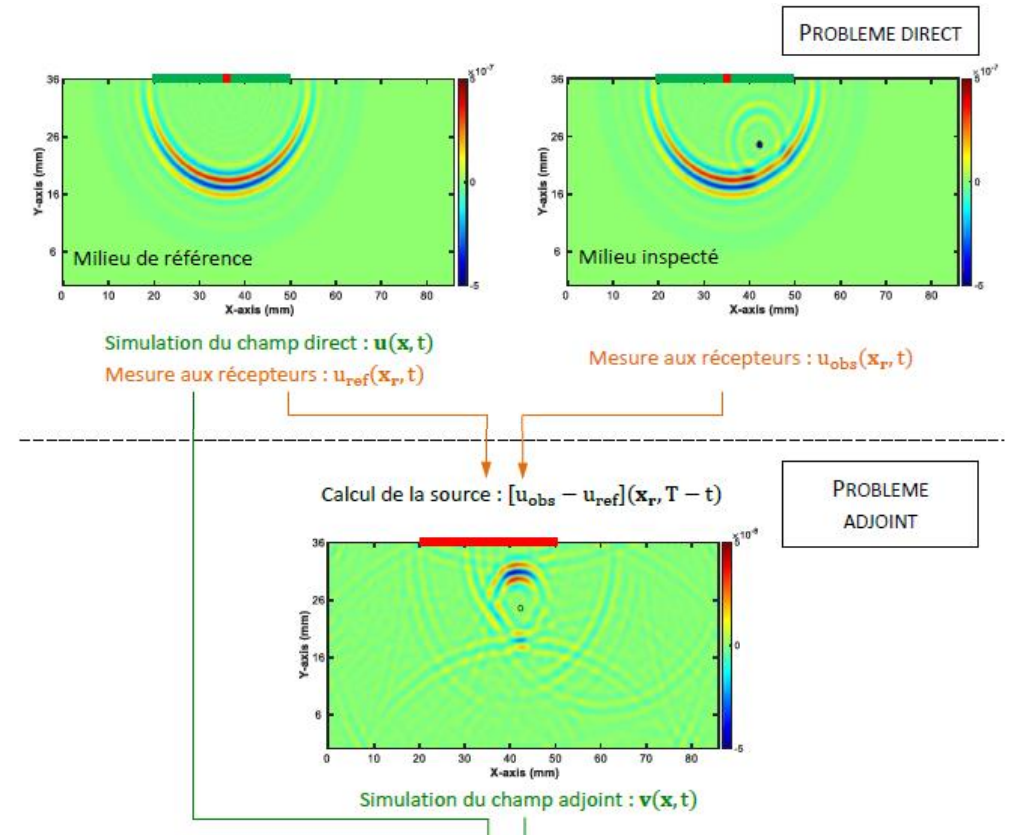
On enregistre $u_0(\vec{r}, t)$ dans le milieu Ω_0 et sur le bord Γ_m pour $t \in [0, T]$.



[Lubeigt, 2017]

Etapes du process de l'énergie topologique [Dominguez, 2005]

- Mesure dans le milieu inconnu** Ω_{insp} avec un réseau linéaire de transducteurs :
 On obtient $u_m(\vec{r}, t)$ sur le bord Γ_m pour $t \in [0, T]$.
- Résolution numérique du problème direct** dans le milieu de référence Ω_0 :
 On enregistre $u_0(\vec{r}, t)$ dans le milieu Ω_0 et sur le bord Γ_m pour $t \in [0, T]$.
- Résolution numérique du problème adjoint** dans le milieu de référence, avec comme terme source $-(u_0 - u_m)(\vec{r}, T - t) \delta_{\Gamma_m}$:
 On enregistre $v_0(\vec{r}, T - t)$ dans le milieu Ω_0 et sur le bord Γ_m pour $t \in [0, T]$.



[Lubeigt, 2017]

Etapes du process de l'énergie topologique [Dominguez, 2005]

- Mesure dans le milieu inconnu** Ω_{insp} avec un réseau linéaire de transducteurs :

On obtient $u_m(\vec{r}, t)$ sur le bord Γ_m pour $t \in [0, T]$.

- Résolution numérique du problème direct** dans le milieu de référence Ω_0 :

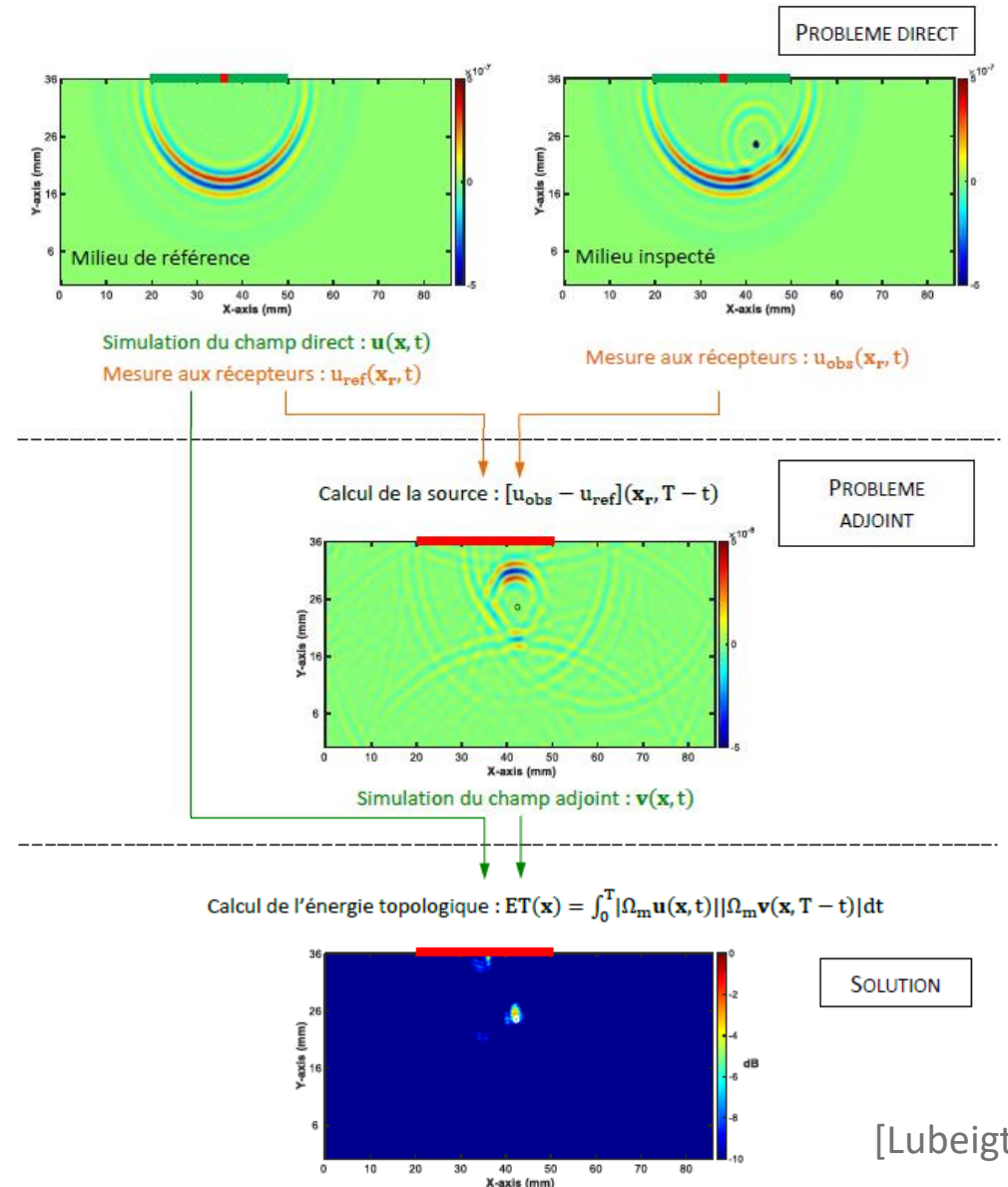
On enregistre $u_0(\vec{r}, t)$ dans le milieu Ω_0 et sur le bord Γ_m pour $t \in [0, T]$.

- Résolution numérique du problème adjoint** dans le milieu de référence, avec comme terme source $-(u_0 - u_m)(\vec{r}, T - t) \delta_{\Gamma_m}$:

On enregistre $v_0(\vec{r}, T - t)$ dans le milieu Ω_0 et sur le bord Γ_m pour $t \in [0, T]$.

- Calcul de l'énergie topologique**

Dans notre cas, $u_{ref} = 0$ car le milieu sain est supposé infini



[Lubeigt, 2017]

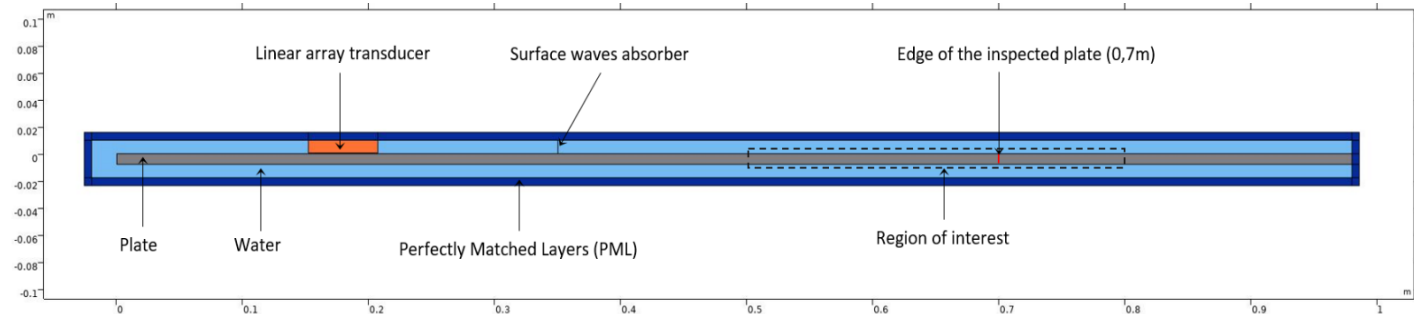
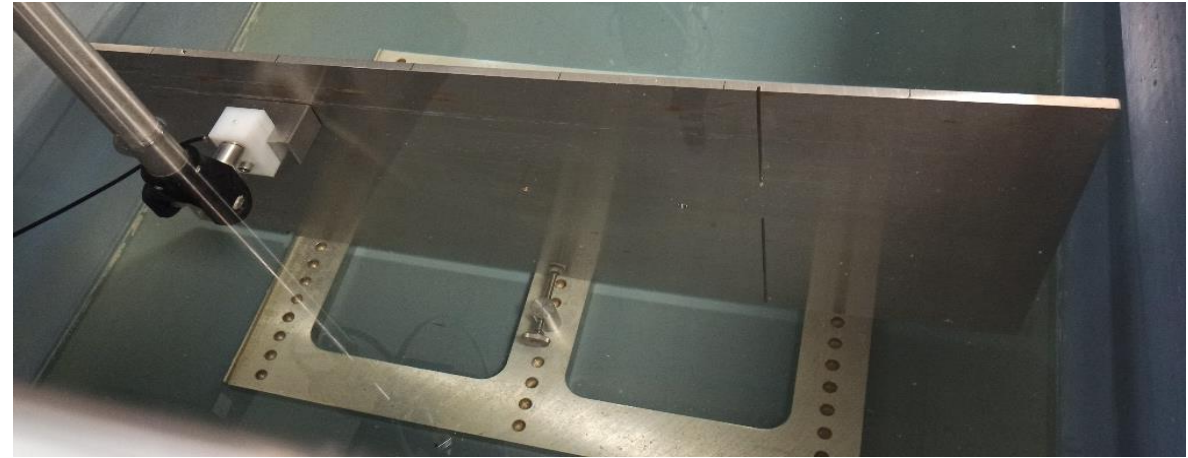
Deux plaques en acier inoxydable de **7,8mm d'épaisseur** dont une présentant une entaille

Transducteur linéaire Sonaxis **16 éléments**
400 kHz - Pitch : 3 mm

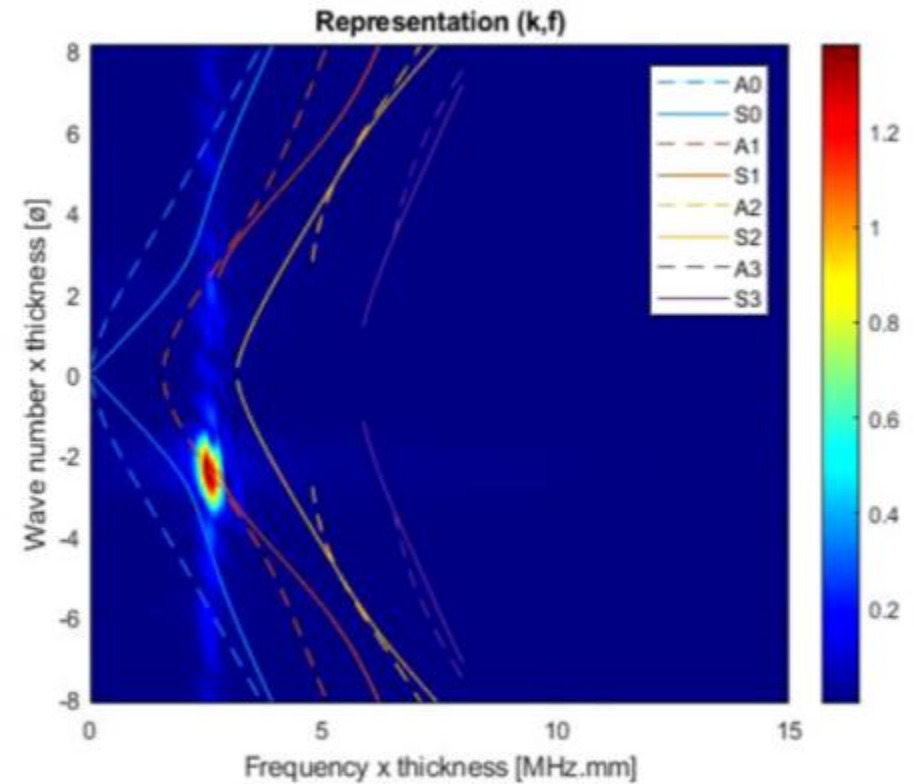
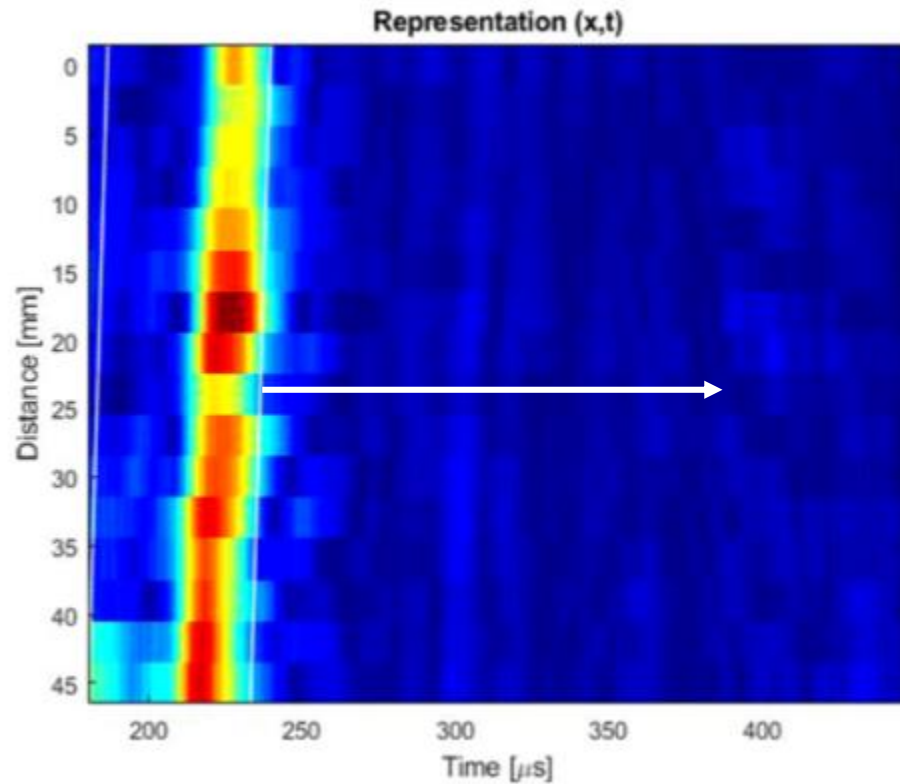
Système d'acquisition : **OPEN** de Lecoeur

Simulations éléments finis sous **COMSOL**

Angle d'incidence piloté par des lois de retard afin de viser un mode précis (**Snell-Descartes**)

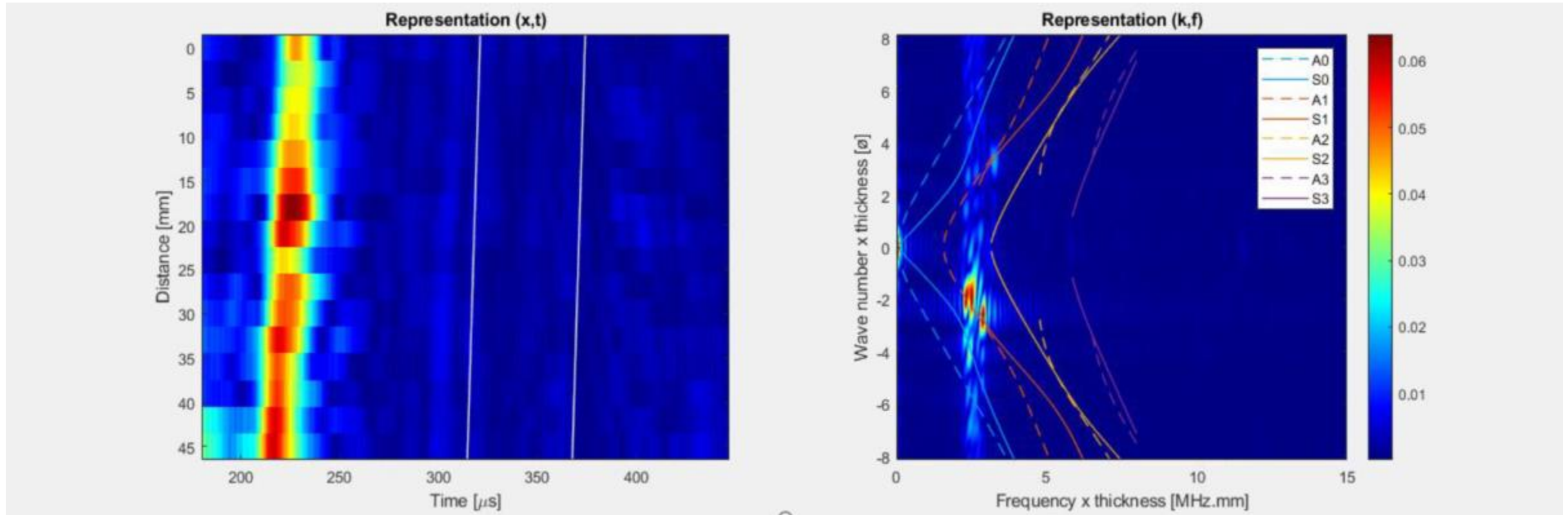


Signal d'émission : 10 cycles sinusoïdaux à $f = 320 \text{ kHz}$ et $\theta = 12,6^\circ$ (mode A1 car peu réémis dans le fluide)



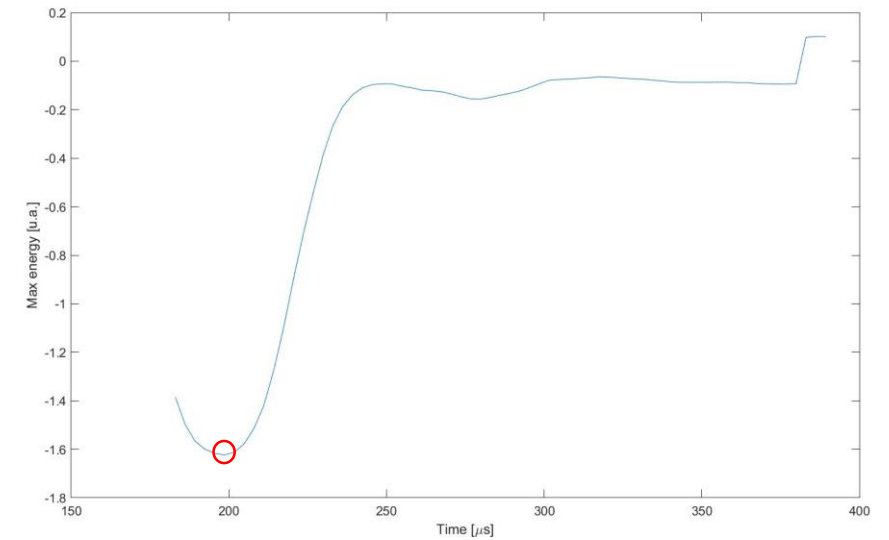
On effectue une FFT2D à fenêtre glissante sur le Bscan obtenu et on trace l'énergie en fonction du temps, pondéré par le signe du nombre d'onde

Signal d'émission : 10 cycles sinusoïdaux à $f = 320 \text{ kHz}$ et $\theta = 12,6^\circ$ (mode A1 car peu réémis dans le fluide)



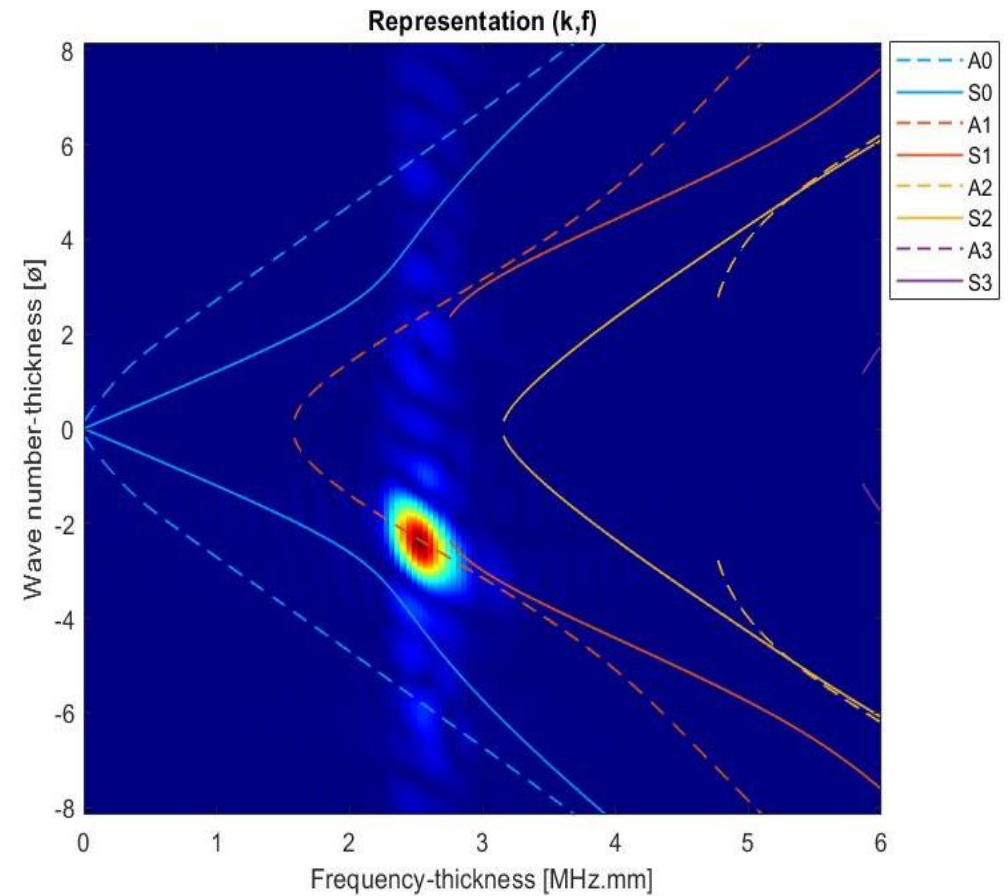
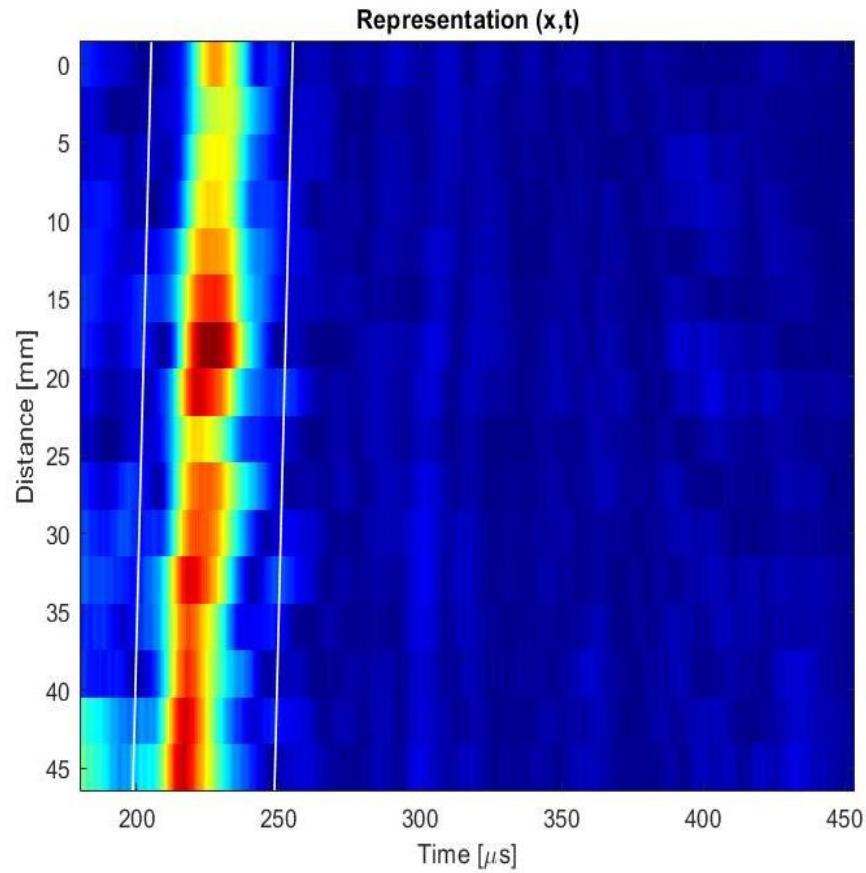
On effectue une FFT2D à fenêtre glissante sur le Bscan obtenu et on trace l'énergie en fonction du temps, pondéré par le signe du nombre d'onde

Sélection de la fenêtre temporelle correspondant au minimum de la fonction



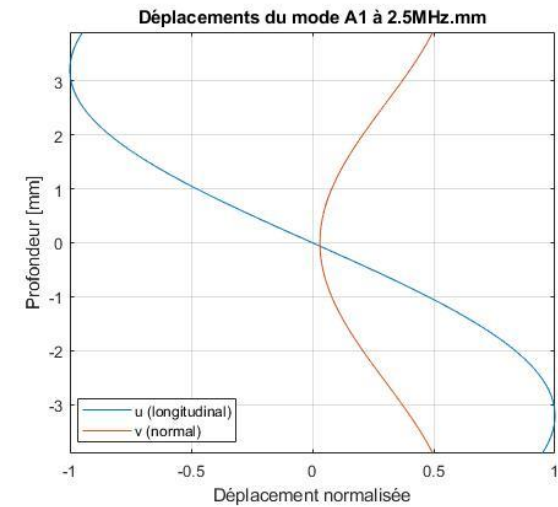
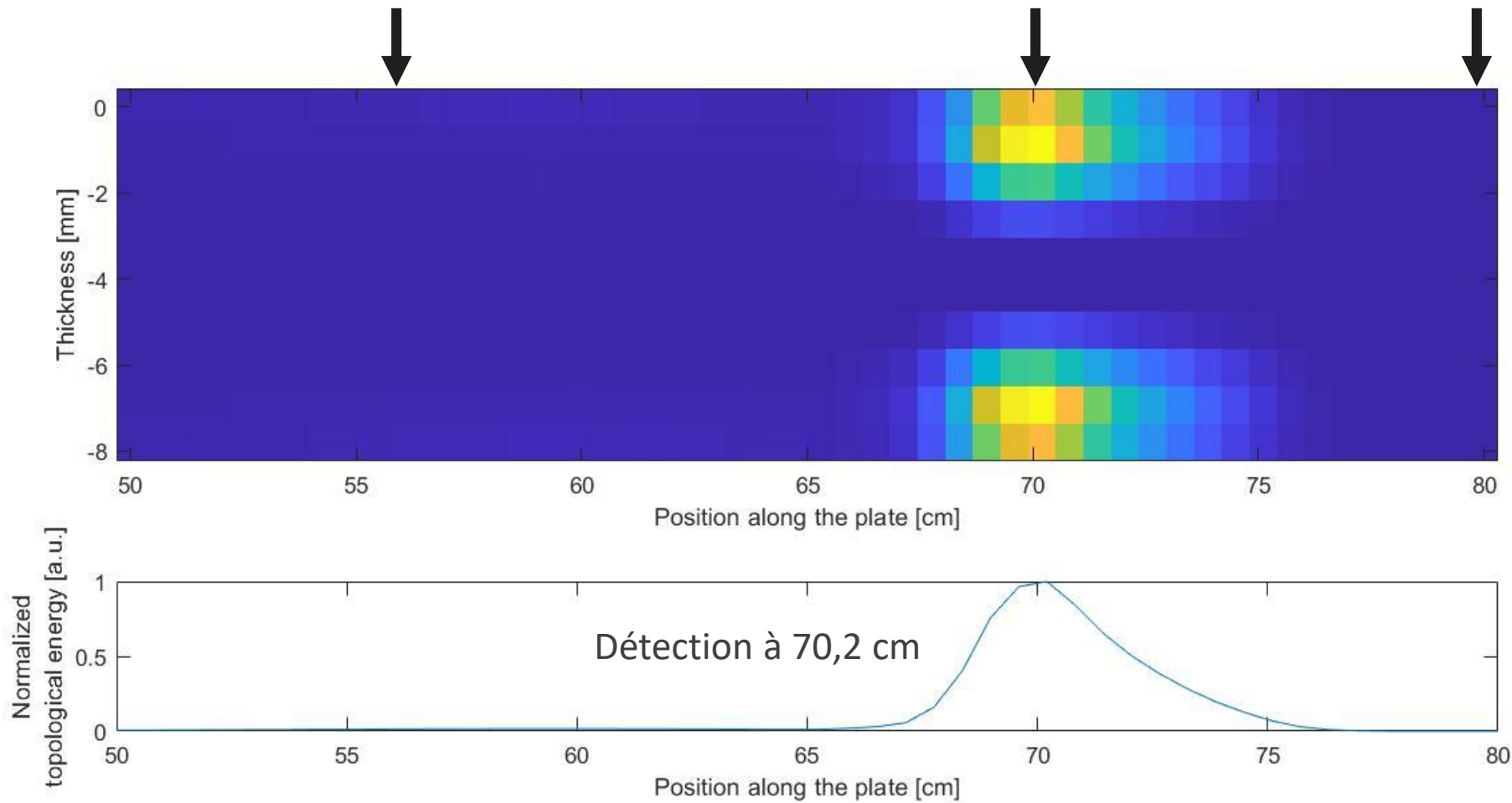
Rétropropagation dans le modèle COMSOL de ce paquet d'onde

Sélection de la fenêtre temporelle correspondant au minimum de la fonction

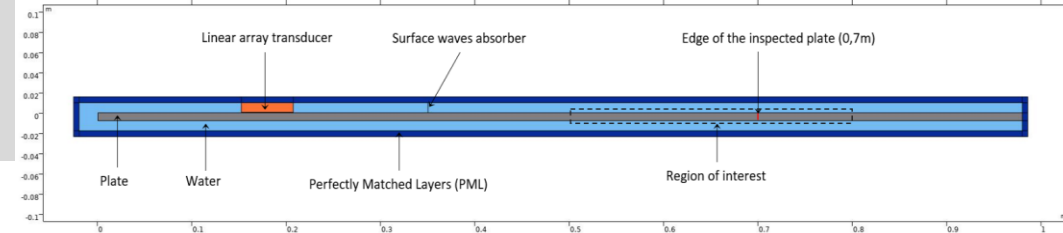


Rétropropagation dans le modèle COMSOL de ce paquet d'onde

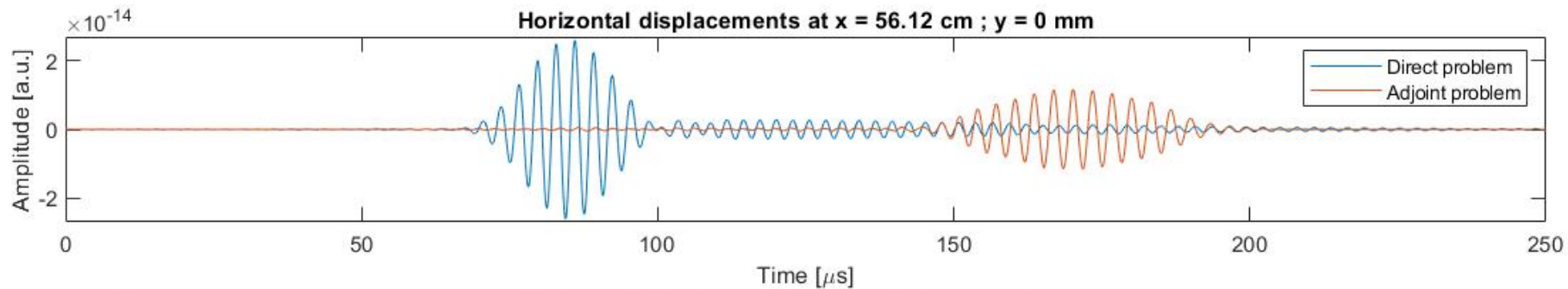
Bord de plaque situé à 70 cm



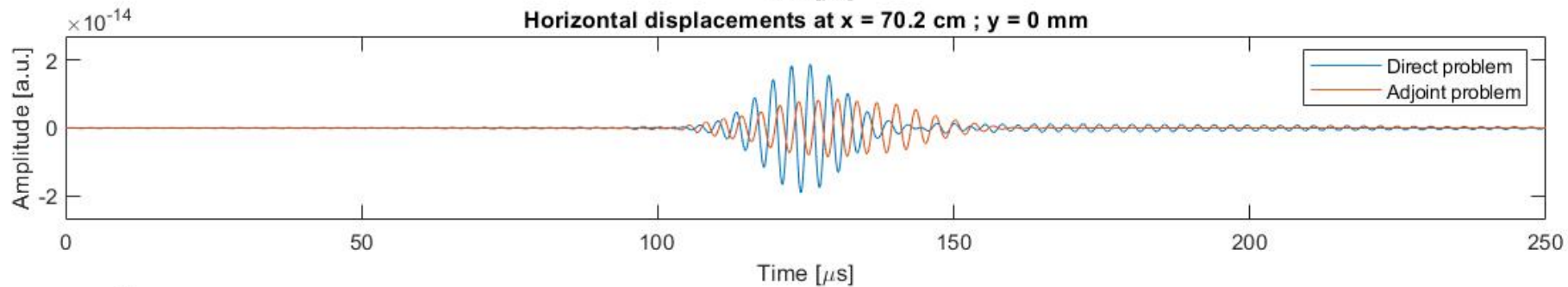
La distribution de l'énergie topologique correspond au profil de déplacement du mode étudié dans la plaque



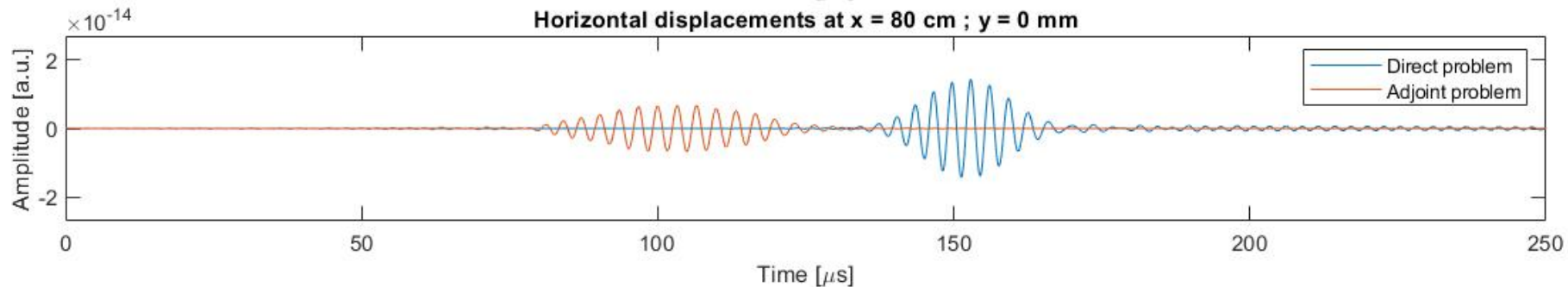
Avant le bord de plaque



Bord de plaque

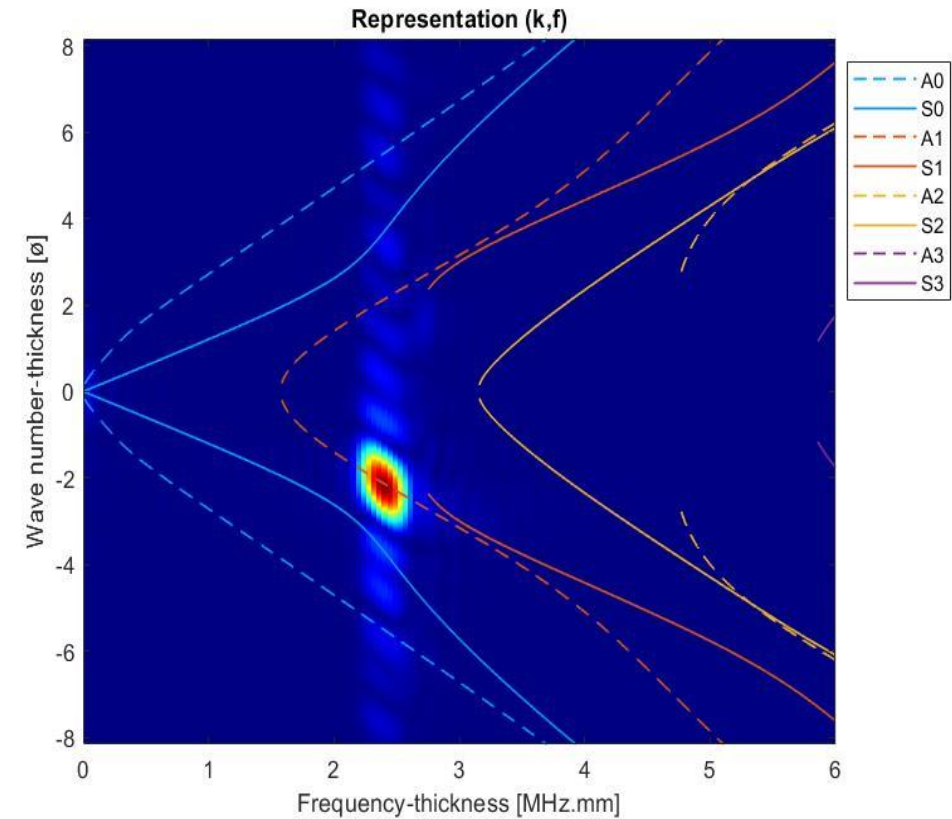
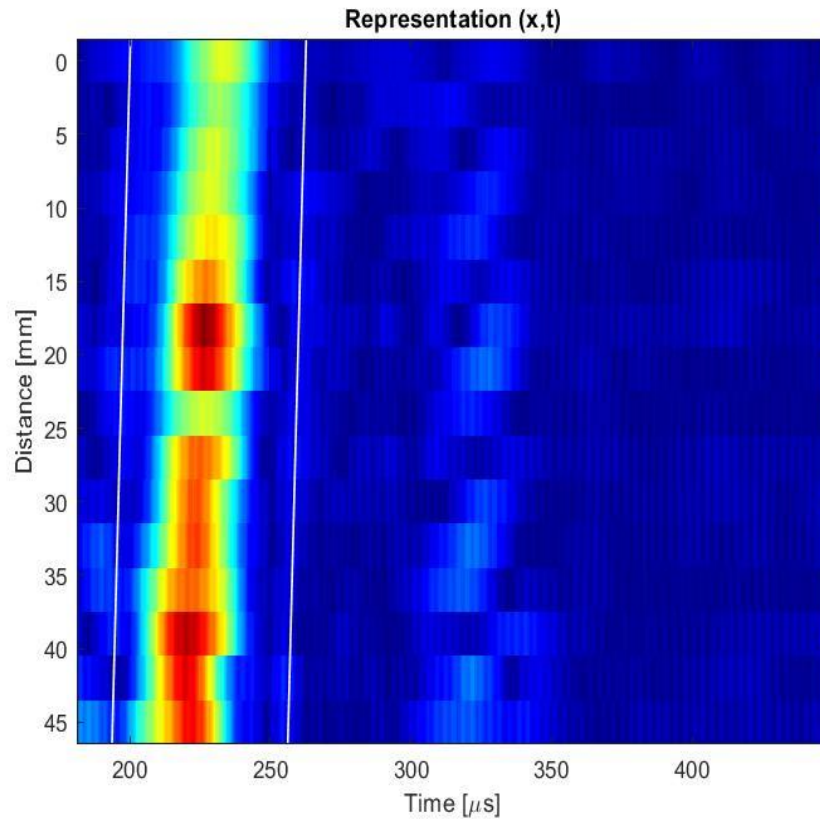


Après le bord de plaque





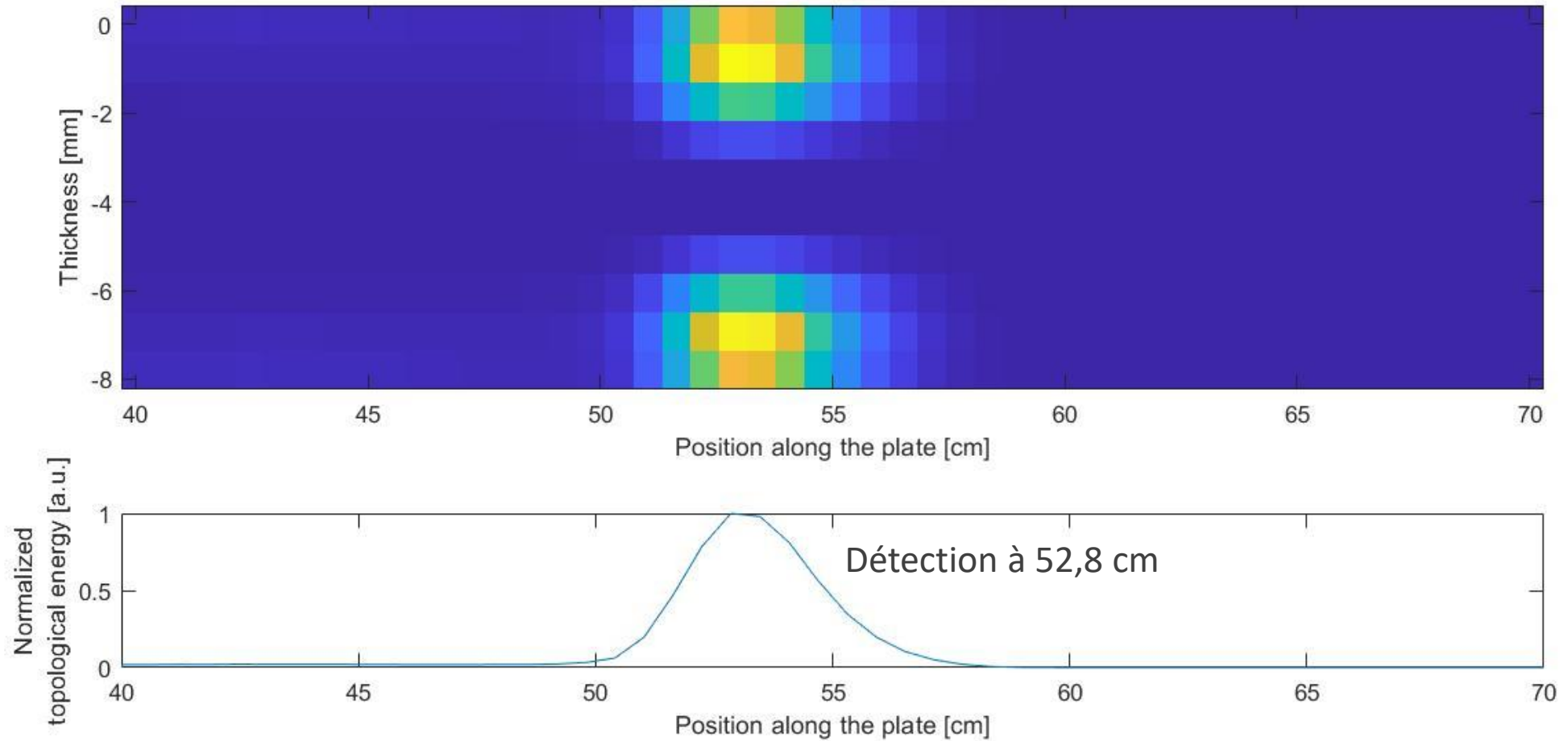
Signal d'émission : 10 cycles sinusoïdaux à $f = 320 \text{ kHz}$ et $\theta = 12,6^\circ$ (mode A1)



Un premier paquet d'onde réfléchi correspondant à un mode A1

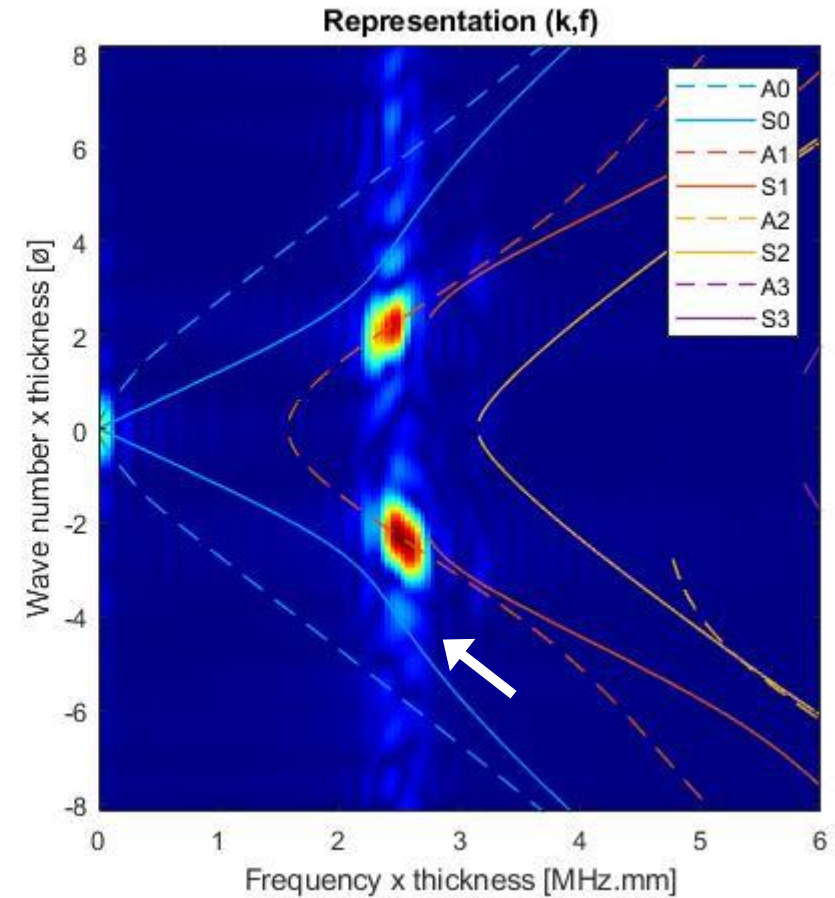
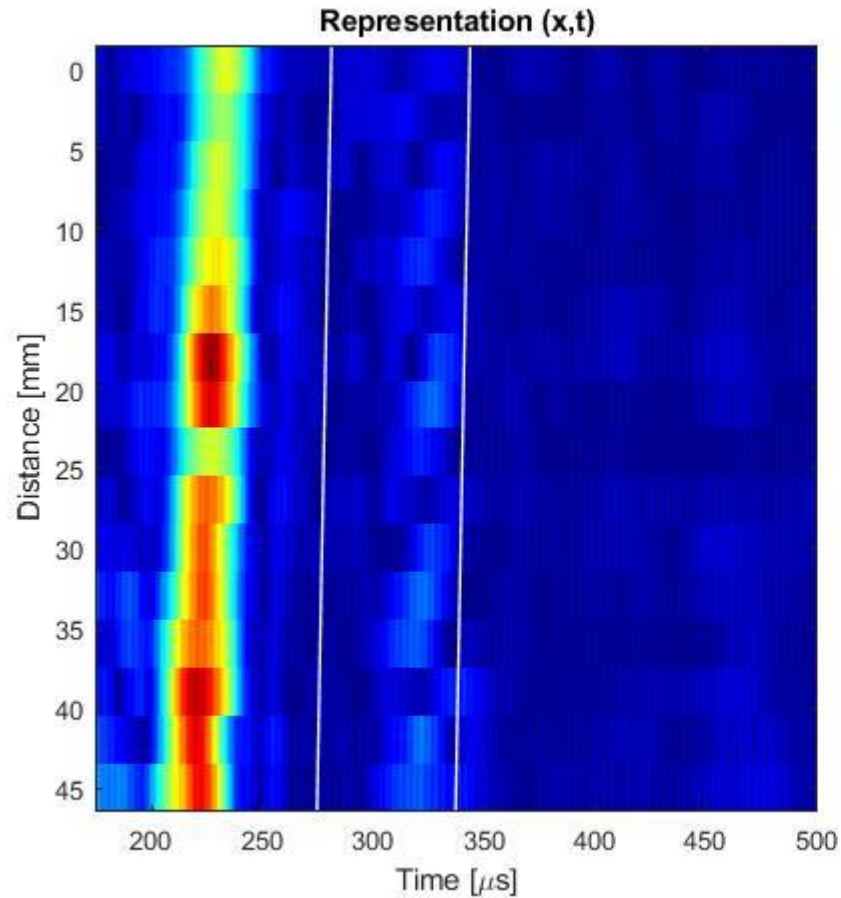


Entaille située à 52 cm



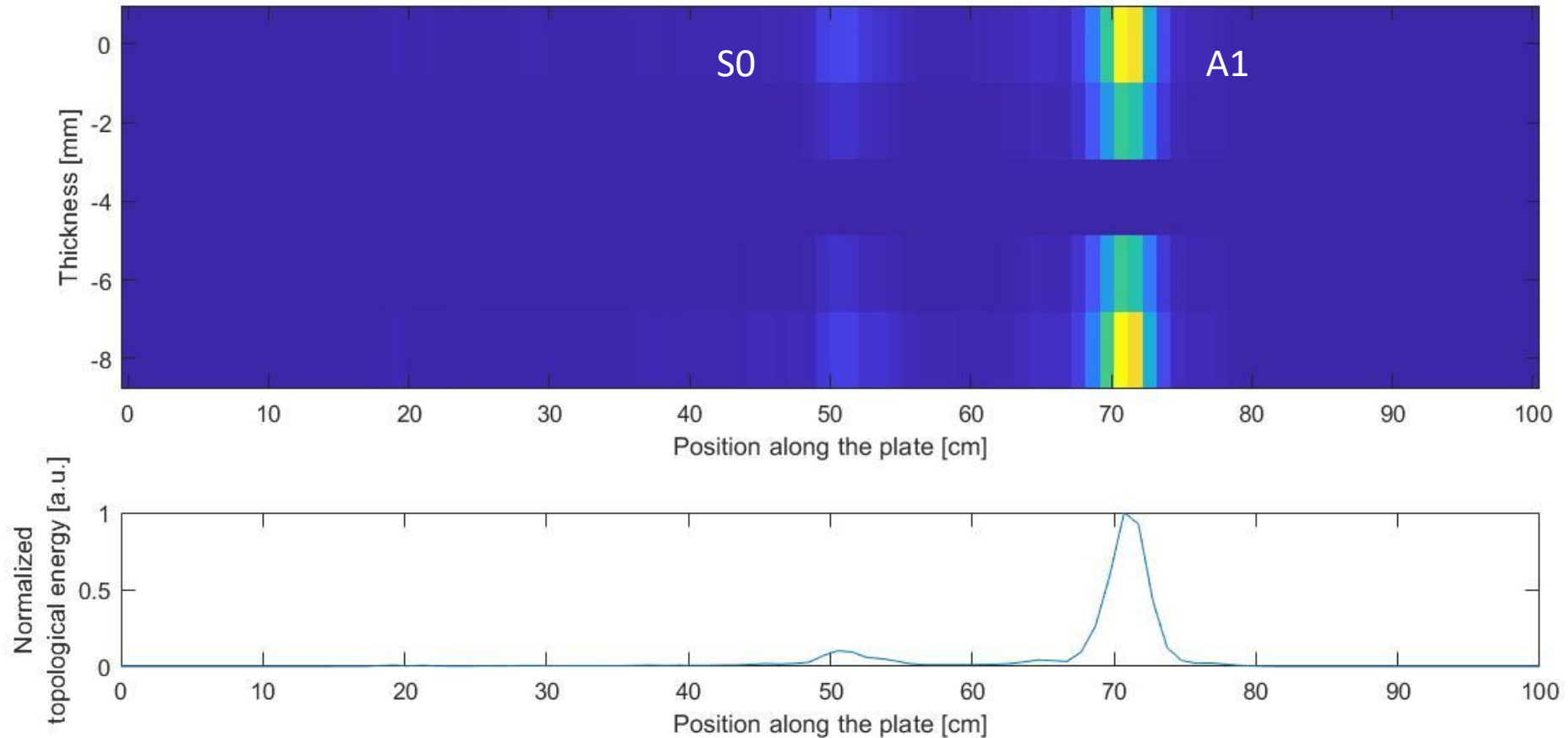
La distribution de l'énergie topologique correspond au profil de déplacement du mode étudié dans la plaque

Signal d'émission : 10 cycles sinusoidaux à $f = 320 \text{ kHz}$ et $\theta = 12,6^\circ$ (mode A1)



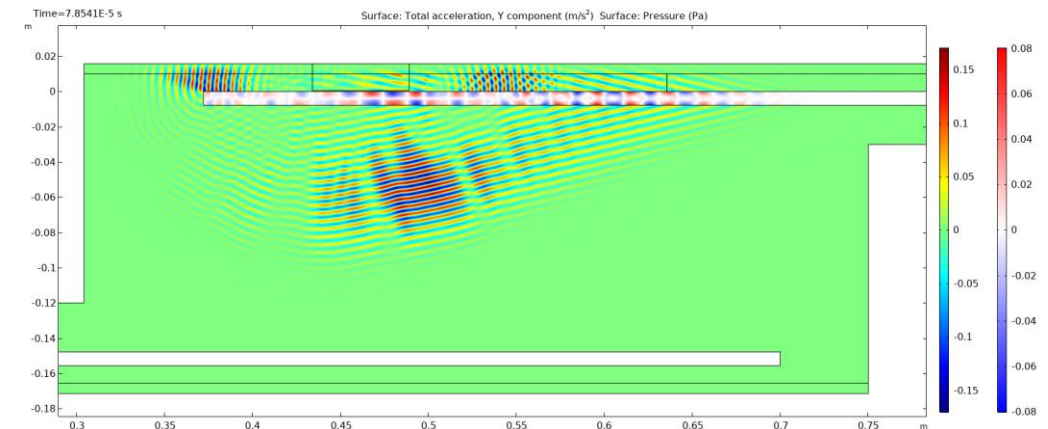
Deuxième paquet d'onde contenant un mode A1 progressif, un mode A1 régressif et un mode S0 régressif

Entaille située à 52 cm et bord de plaque à 70 cm



Le mode A1 est l'onde transmise dans l'entaille et réfléchi par le bord de la plaque
Le mode S0 correspond à une conversion d'onde qui a lieu lors de la réflexion sur l'entaille.

- L'application de l'énergie topologique à une plaque immergée permet de détecter un défaut (bord ou entaille) voir plusieurs défauts successifs en considérant les conversions de mode qui peuvent avoir lieu
- Le mode choisi ici est un mode qui s'atténue peu, afin qu'il se propage loin sans perte d'énergie
- Le cas à deux plaques parallèles est en cours d'étude
 - Modes qui réémettent dans le fluide
 - Réflexions multiples entre les plaques
 - Simulations associées plus coûteuses par maillage de l'eau très fin
- Autre(s) méthode(s) utilisant le retournement temporel : DORT, MFP ...



APPLICATION DU RETOURNEMENT TEMPOREL AUX ONDES DE LAMB POUR LE CONTROLE NON DESTRUCTIF DES STRUCTURES MULTI-PLAQUES IMMERGEES EN SODIUM LIQUIDE



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Encadrement:

Jean-François Chaix
Marie-Aude Ploix
Matthieu Cavaro
François Baqué

Merci de votre attention

1er décembre 2020

