



CREATEUR DE NOUVELLES MOBILITES

# ECND APPLIQUÉ AUX COMPOSITES

Conférence du 29 mars 2019

Groupe ISAE 

# Utilisation du ECND dans les matériaux composites

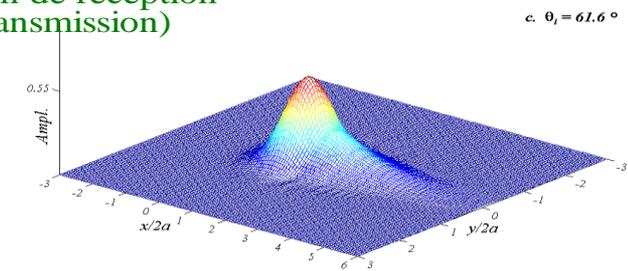
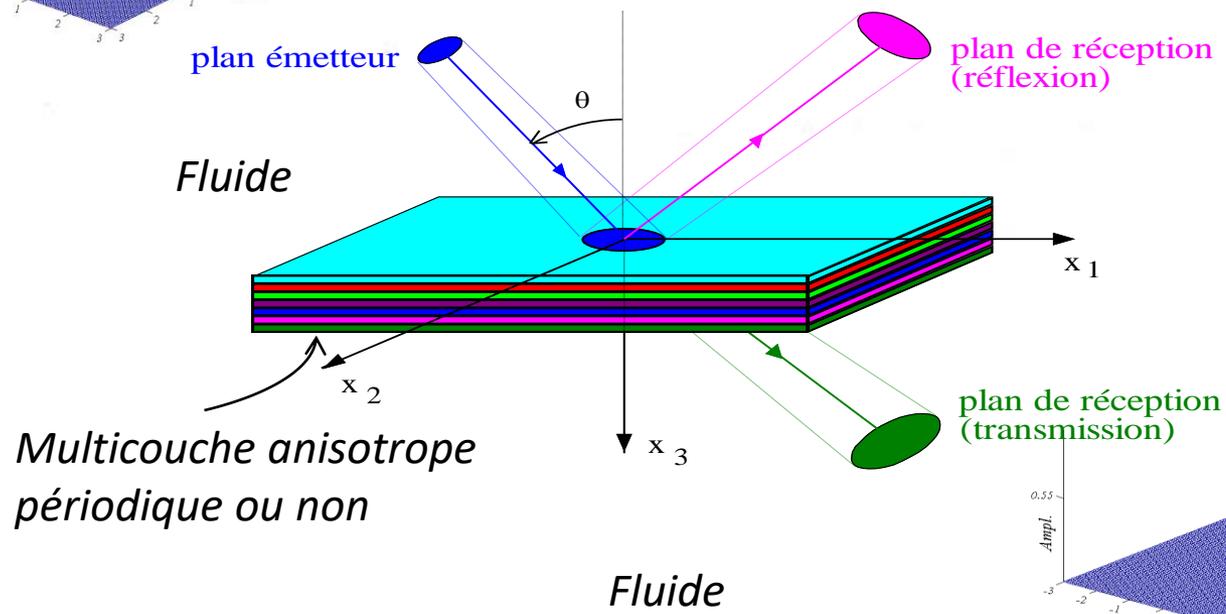
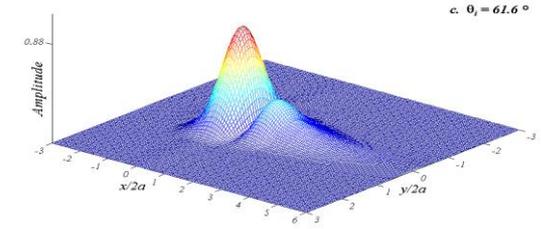
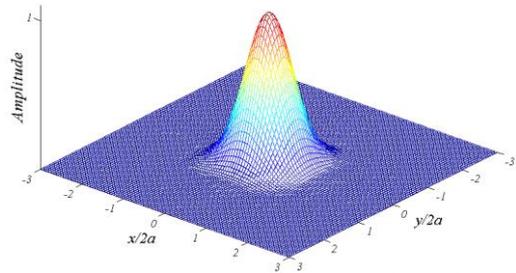
## Détection des défauts de fabrications (procédés de fabrication très complexes)

- Inclusions
- Manque d'adhésion

## Détection des endommagement pendant ou après utilisation

- Fissuration de la matrice
- Rupture des fibres
- délaminage

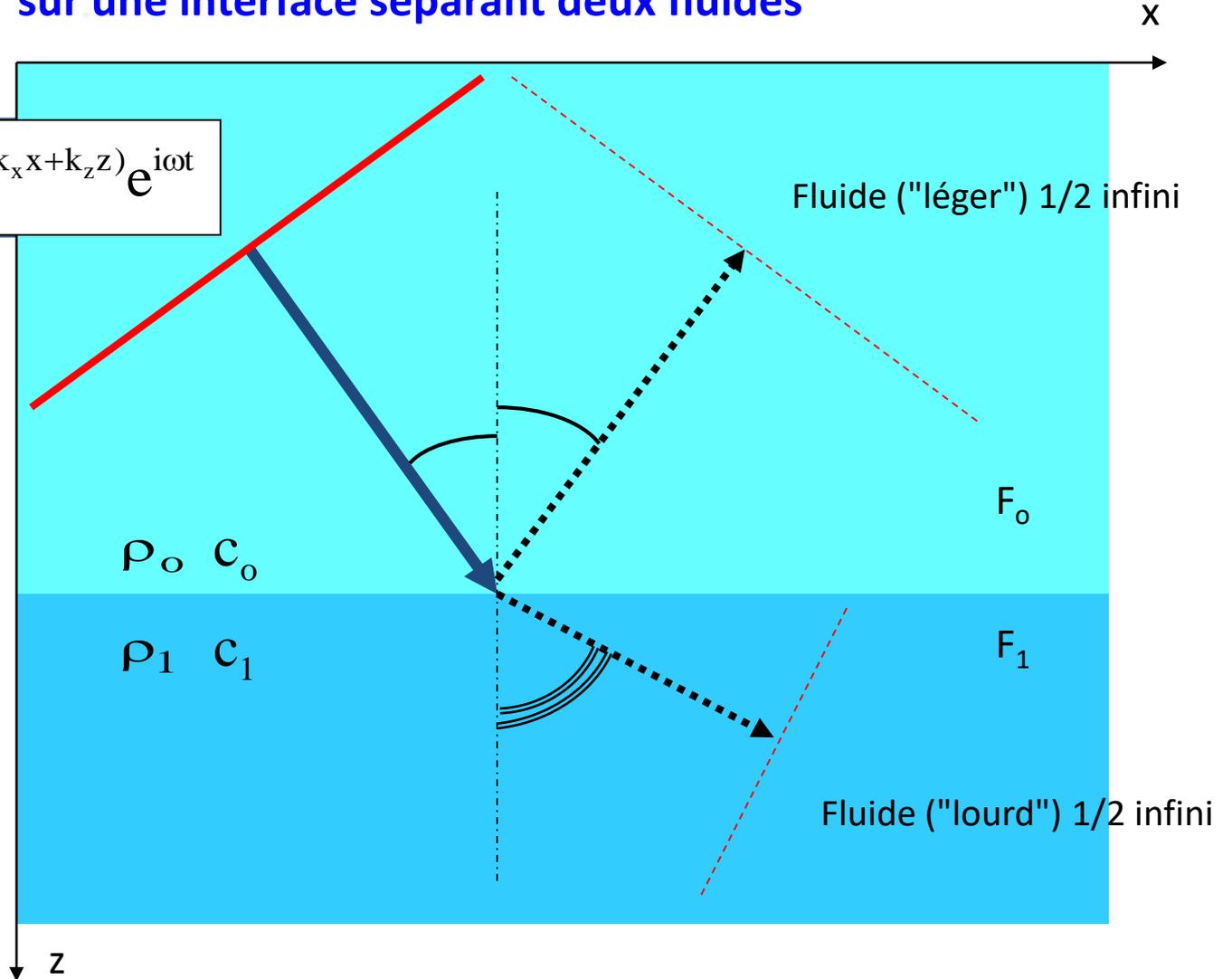
# Modélisation d'un essai par ultrasons



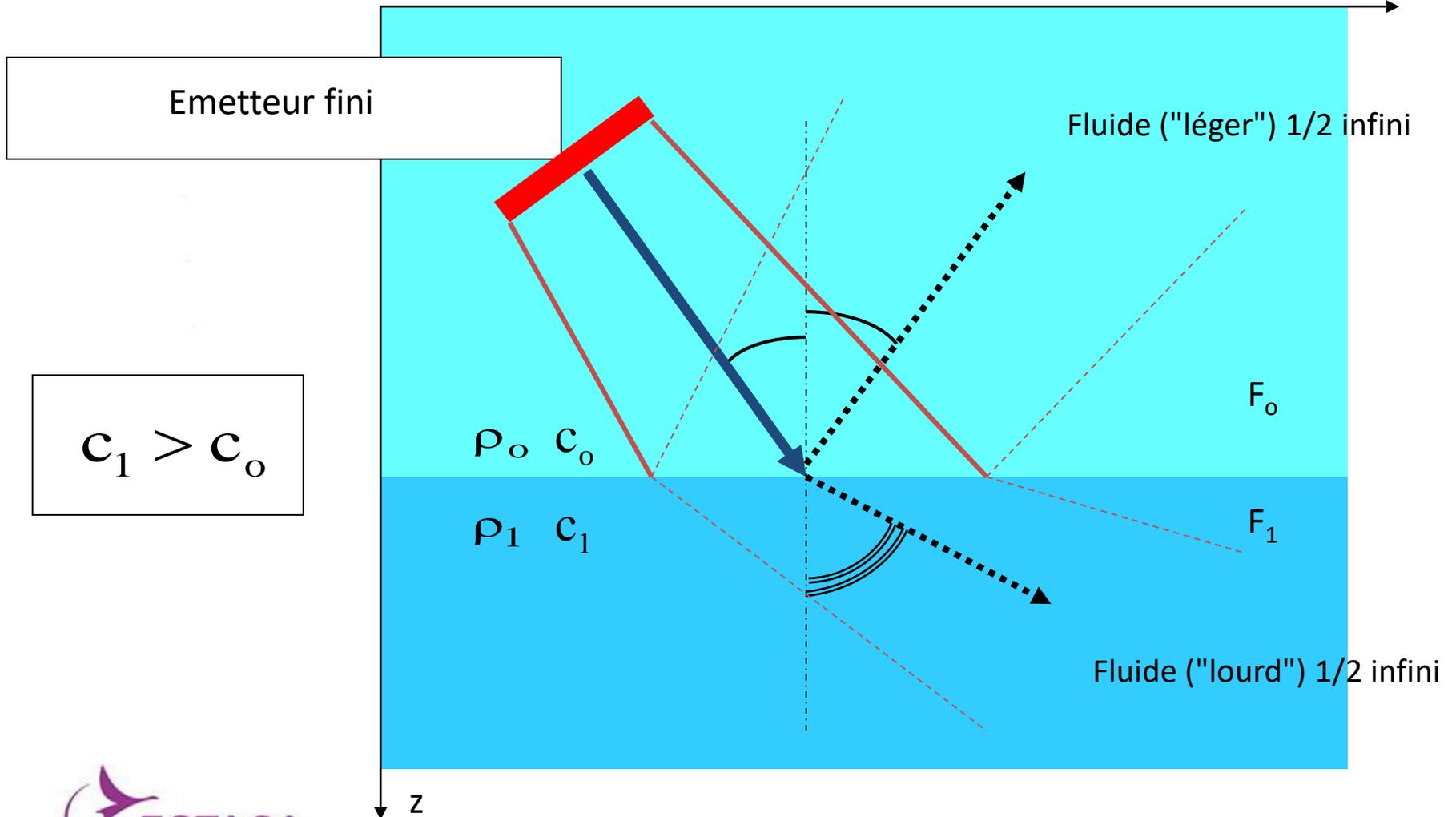
## Onde plane (harmonique) incidente sur une interface séparant deux fluides

$$p(x, z, t) = Ae^{-i(k_x x + k_z z)} e^{i\omega t}$$

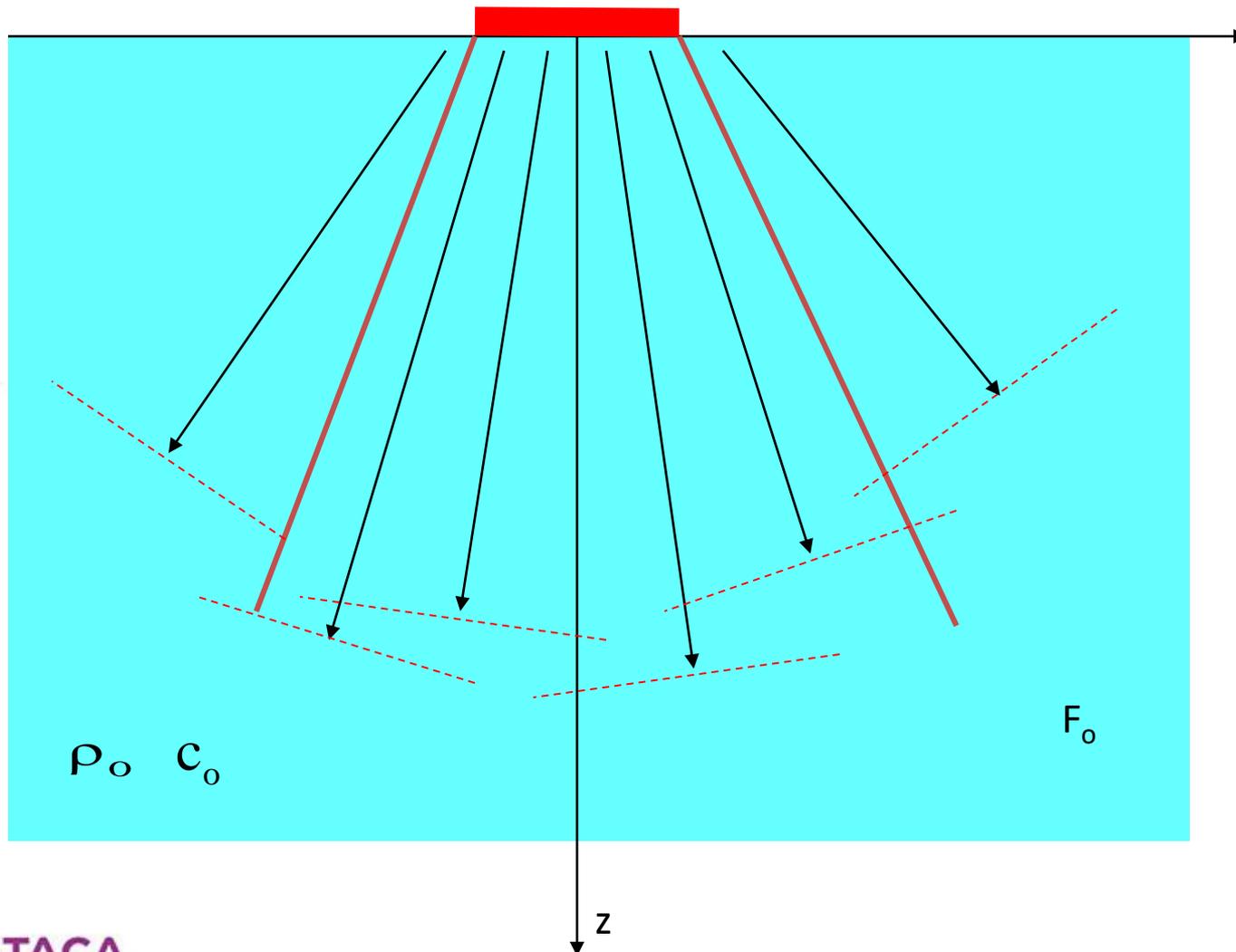
$$c_1 > c_0$$



# Faisceau acoustique incident sur une interface séparant deux fluides



## Principe de décomposition d'un faisceau en ondes planes



Emetteur  
"bafflé"

## Formulation de Fourier

Emetteur (2a) dans un écran plan

Emetteur  
"bafflé"

$$w_o(x, t) = 0$$

$$w_o(x, t) = 0$$

x

$$w_o(x, t) = W_o(x)e^{i\omega t}$$

$k_x$

$$k_x^2 + k_z^2 = k_o^2$$

$$\left( k_o = \frac{\omega}{c_o} \right)$$

$$p(x, z, t) = \int A(k_x) e^{-i(k_x x + k_z z)} dk_x e^{i\omega t}$$

$\rho_o$   $c_o$

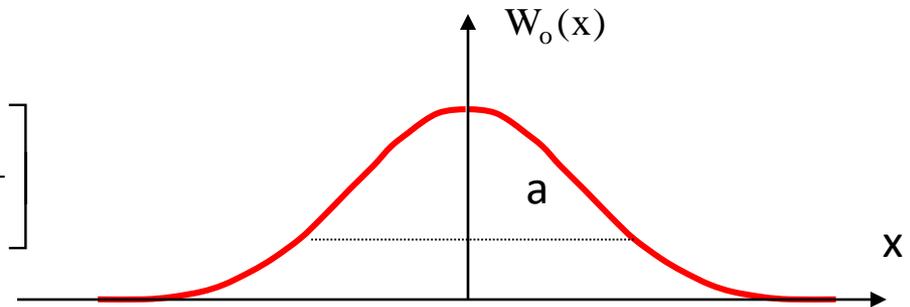
$F_o$

z

## Vitesses normales sur l'émetteur

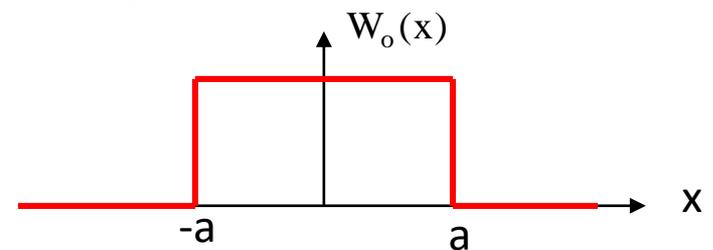
Emetteur gaussien :

$$W_o(x) = W_o \exp \left[ -\frac{x^2}{a^2} \right]$$



Emetteur en mode piston :

$$W_o(x) \rightarrow$$



$$w_0(x,t) = W_0(x) e^{i\omega t}$$

Dimension : a

(TF :  $x \rightarrow k_x$ ) → Numérique ou analytique

$$B(k_x) = \int W_0(x) e^{ik_x x} dx$$

$$\lambda_0 = \frac{2\pi}{k_0}$$

$$k_x^2 + k_z^2 = k_0^2$$

$$k_0 = \frac{\omega}{c_0}$$

Fluide

$$A(k_x) = \frac{\rho_0 \omega}{2\pi k_z} B(k_x)$$

→ Ondes planes (analytique) :  
 propagation  
 + réflexion, transmission ?

(TF :  $k_x \rightarrow x$ ) → Numérique ou asymptotique :

$$p(x,z,t) = \int A(k_x) e^{-i(k_x x + k_z z)} dk_x e^{i\omega t}$$

Haute fréquence  $a \gg \lambda_0$  ( $k_0 a \gg 1$ )

Champ lointain  $r \gg a, \lambda_0$

Distance d'observation : r

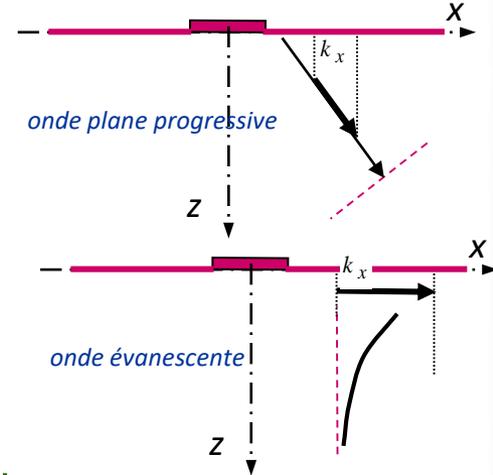
# Choix de la détermination de $\hat{k}_z$

$\hat{k}_z$

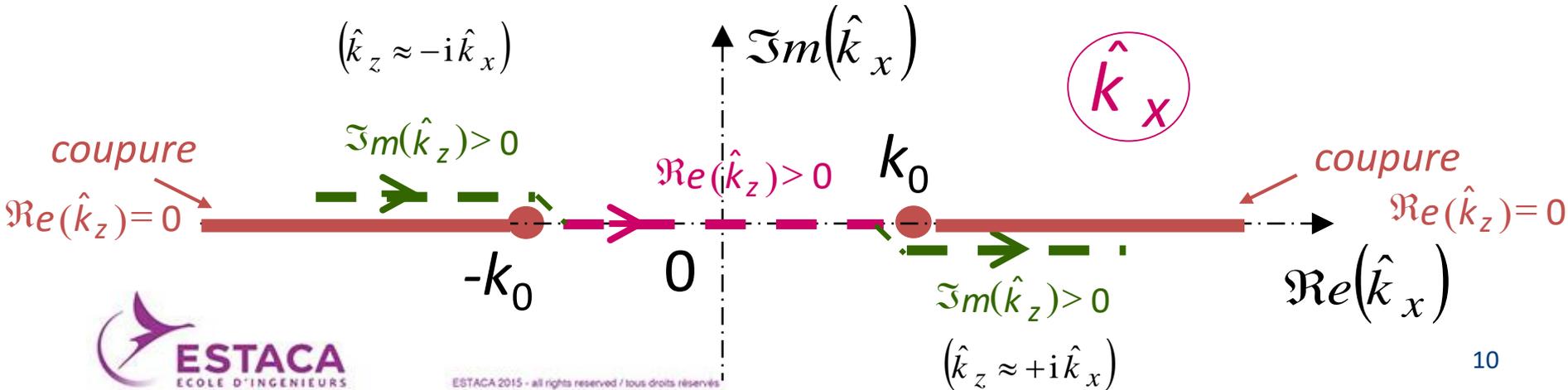
- Condition de rayonnement ou de décroissance à l'infini ( $z \rightarrow +\infty$ )

$$k_x^2 + \hat{k}_z^2 = k_0^2 = \left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2$$

$|k_x| \leq k_0 \implies \hat{k}_z \in \mathbb{R}$   
 $|k_x| > k_0 \implies \hat{k}_z \in \mathbb{C} \text{ (branché)}$   
 $\hat{k}_z = i k''_z$  ( $k''_z > 0$ )



Fonction  $\hat{k}_z(\hat{k}_x) = \sqrt{k_0^2 - \hat{k}_x^2}$  dans le plan complexe de  $\hat{k}_x$





# Calcul rapide d'intégrales de Fourier

● Intégrales de la forme

$$I(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{F}(k_x) \exp\{i(k_x x + \hat{k}_z z)\} dk_x$$

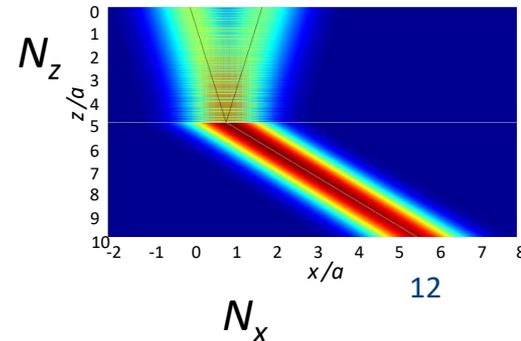
	Algorithme FFT	Méthode des trapèzes - programmation matricielle
$k_x$	réel	réel ou complexe trajet d'intégration déformable dans $(\hat{k}_x)$
échantillonnage	équiréparti ( $2^p$ )	peut être quelconque
points $(x, z)$	ligne // émetteur	localisation indifférente
nb points en $x$ / nb points en $k_x$	égaux	indépendants

● Calcul matriciel

$$\int_a^b f(x) dx = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left[ \frac{f(a)}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + \frac{f(b)}{2} \right] \Delta x$$

$$\left[ \exp(i \hat{k}_z z) \right] * \left[ \hat{F}(k_x) \right] * \left[ \exp(i k_x x) \right] * \Delta k_x$$

$(N_z \times N_{k_x})$       $(N_z \times N_{k_x})$       $(N_{k_x} \times N_x)$   
 ESTACA  
 ÉCOLE D'INGÉNIEURS *N<sub>z</sub> lignes identiques* / tous droits réservés



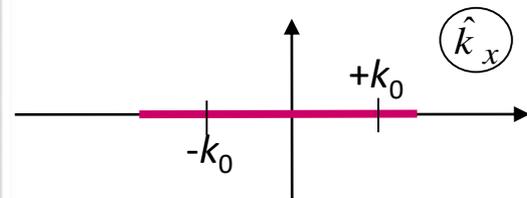
# Temps de calcul

Fabricant et support technique :

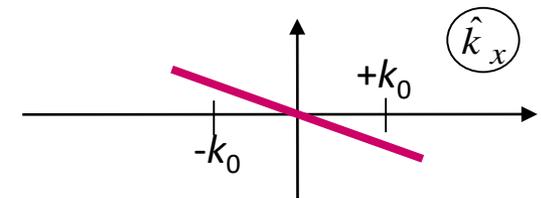
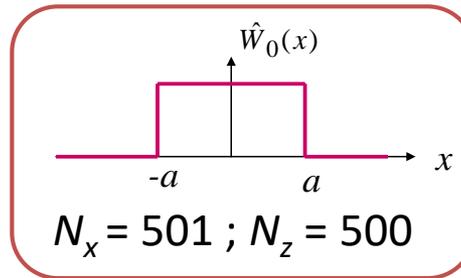


Dell Latitude D630  
 Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU  
 T7500 @ 2.20GHz  
 789 MHz, 1.99 Go de RAM  
 Extension d'adresse physique

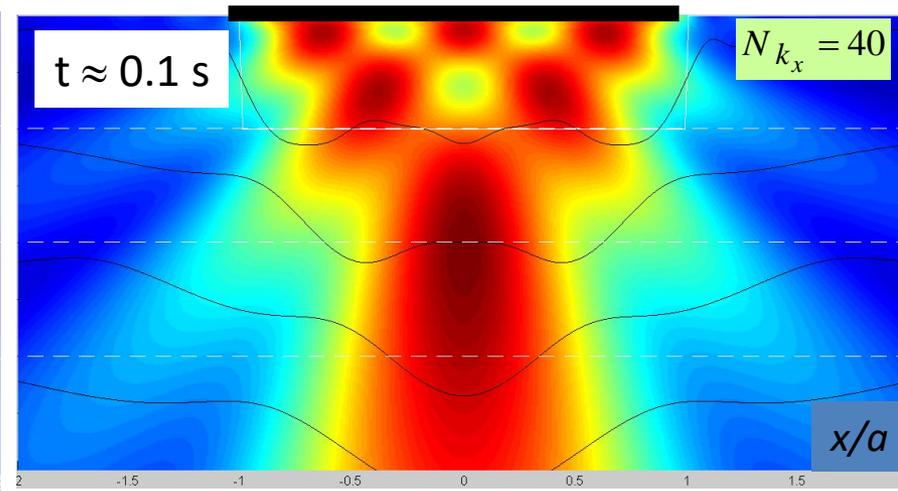
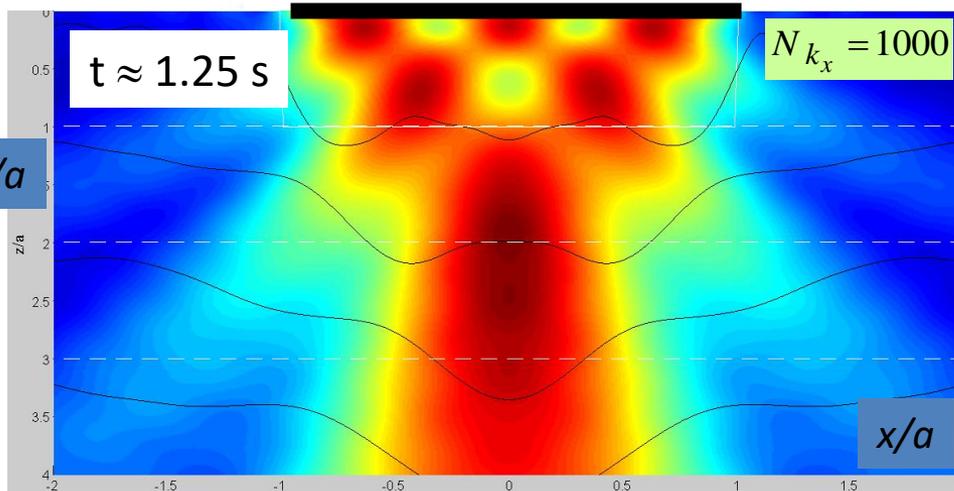
- Précision augmentée en x et z : 250 000 intégrales à calculer



$k_x a \in [-12; 12]$

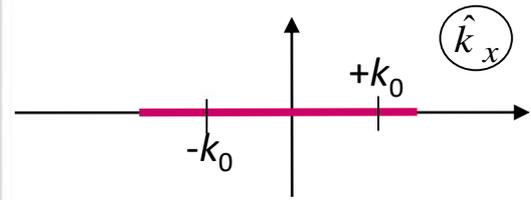


$k_x a \in [-12+0.5 i; 12-0.5 i]$

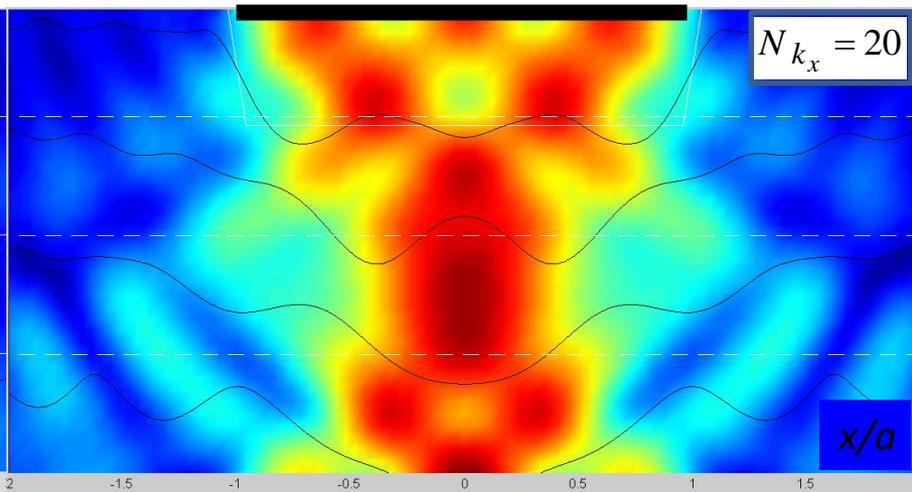
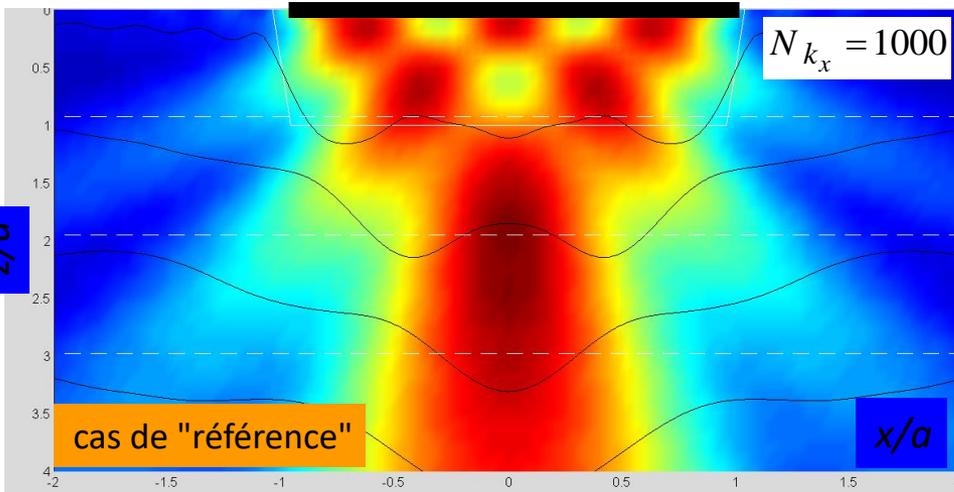
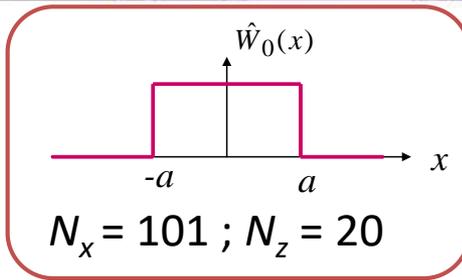


- Certains cas nécessitent ainsi beaucoup de points de calcul dans l'espace physique en z (multicouches, phénomènes d'interférences, incidence oblique, ...)

# Trajet d'intégration réel : diminution du nombre de points d'intégration

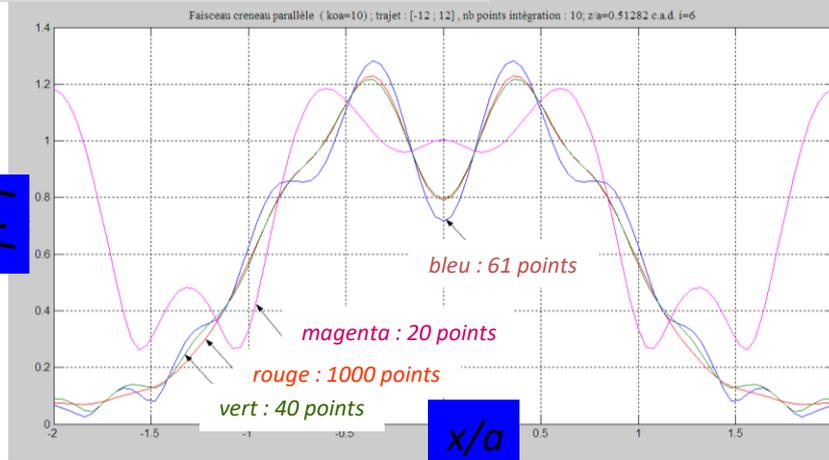


$k_x a \in [-12; 12]$



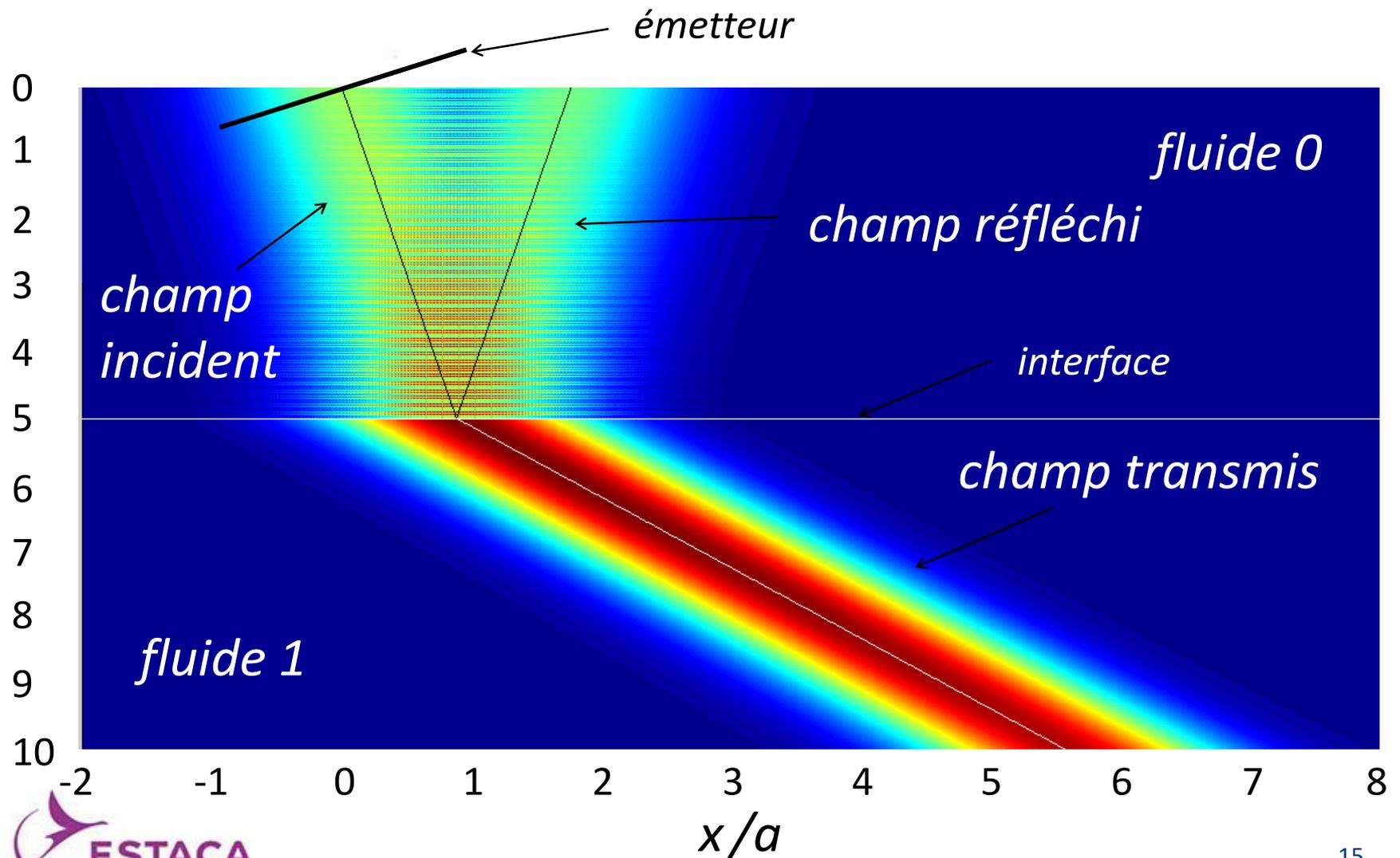
$z/a=0.5$

$|P|$

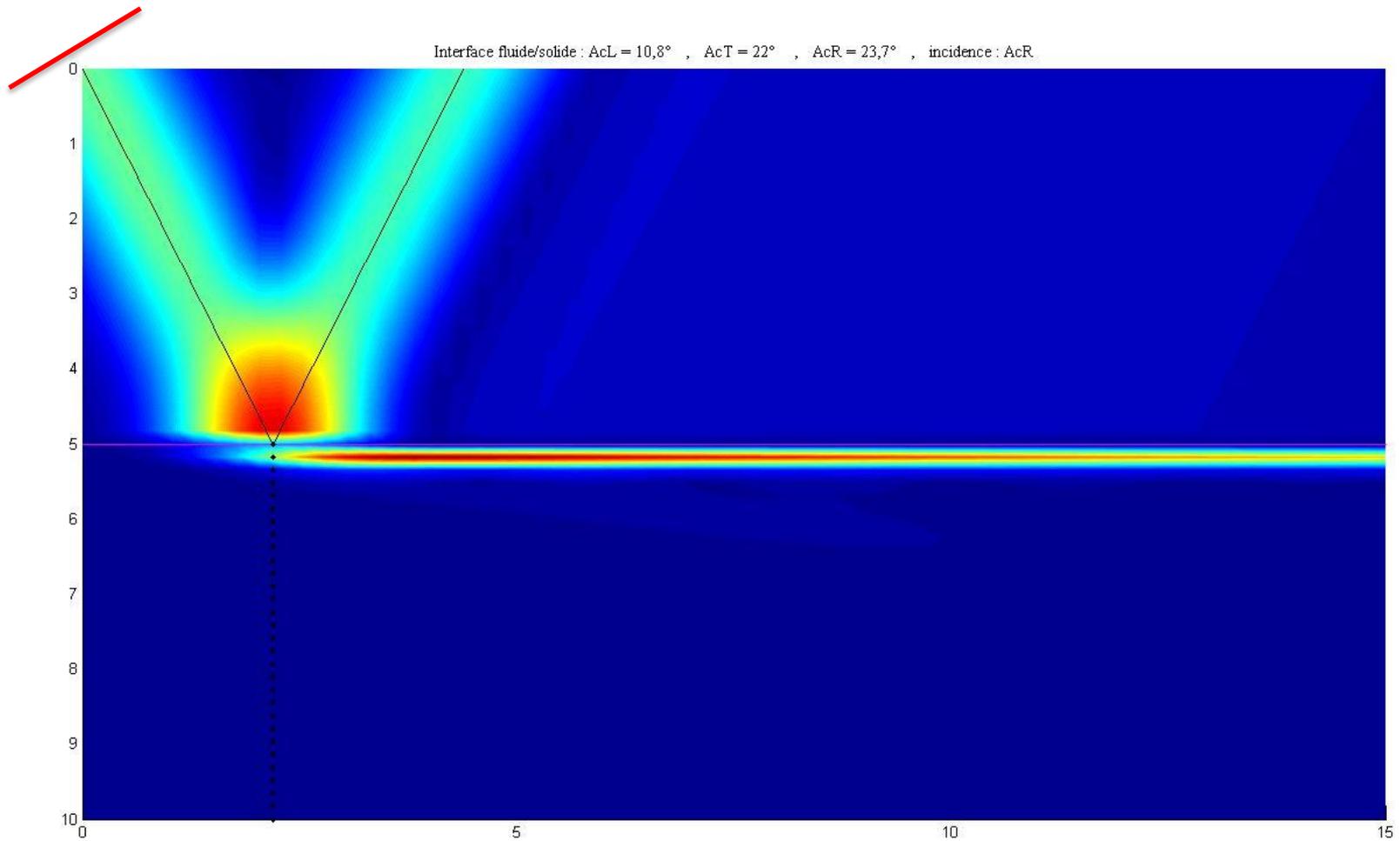


zoom sur le transparent suivant

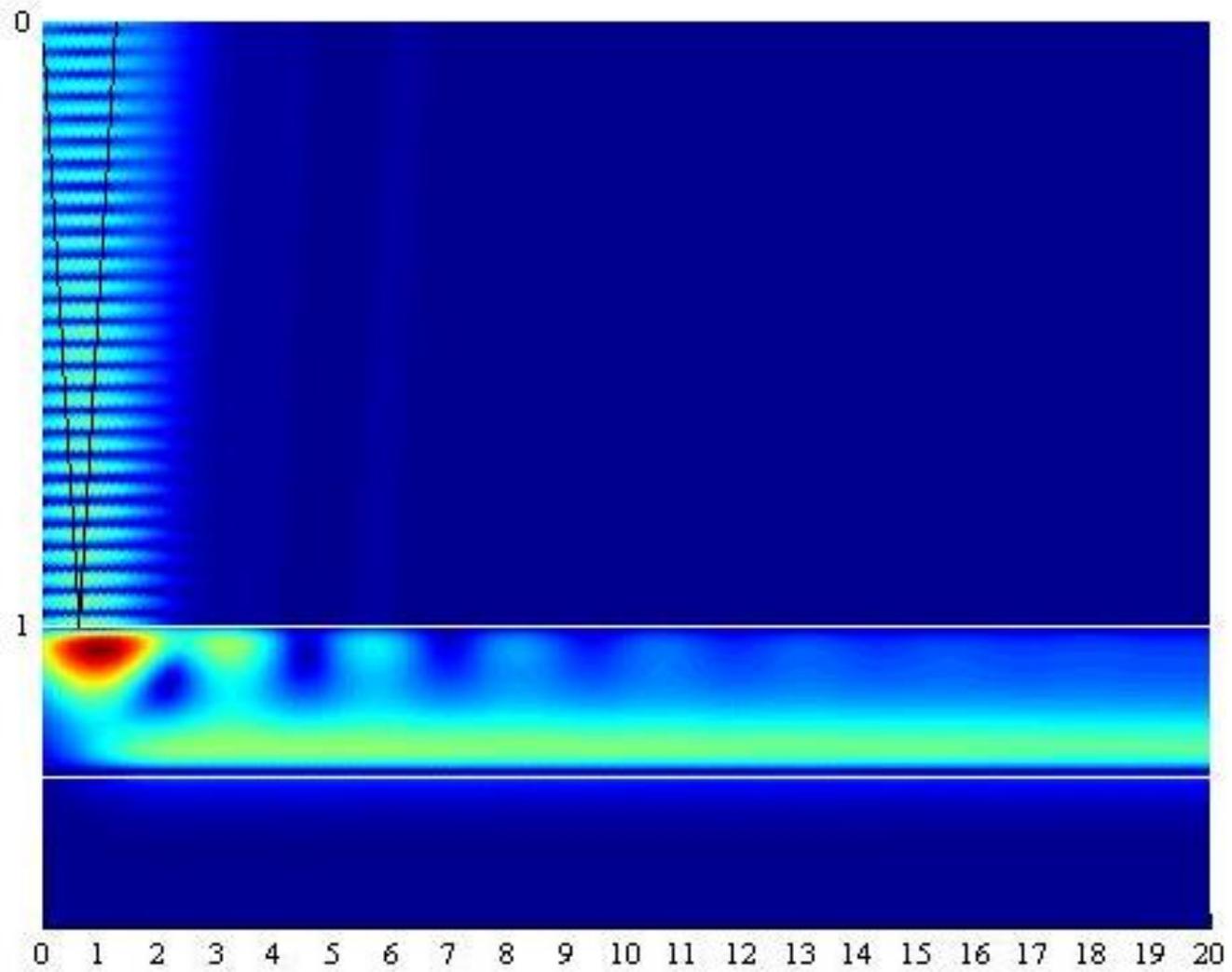
$f=5\text{ MHz}$ ,  $a=10\text{ mm}$ ,  $\theta=10^\circ$



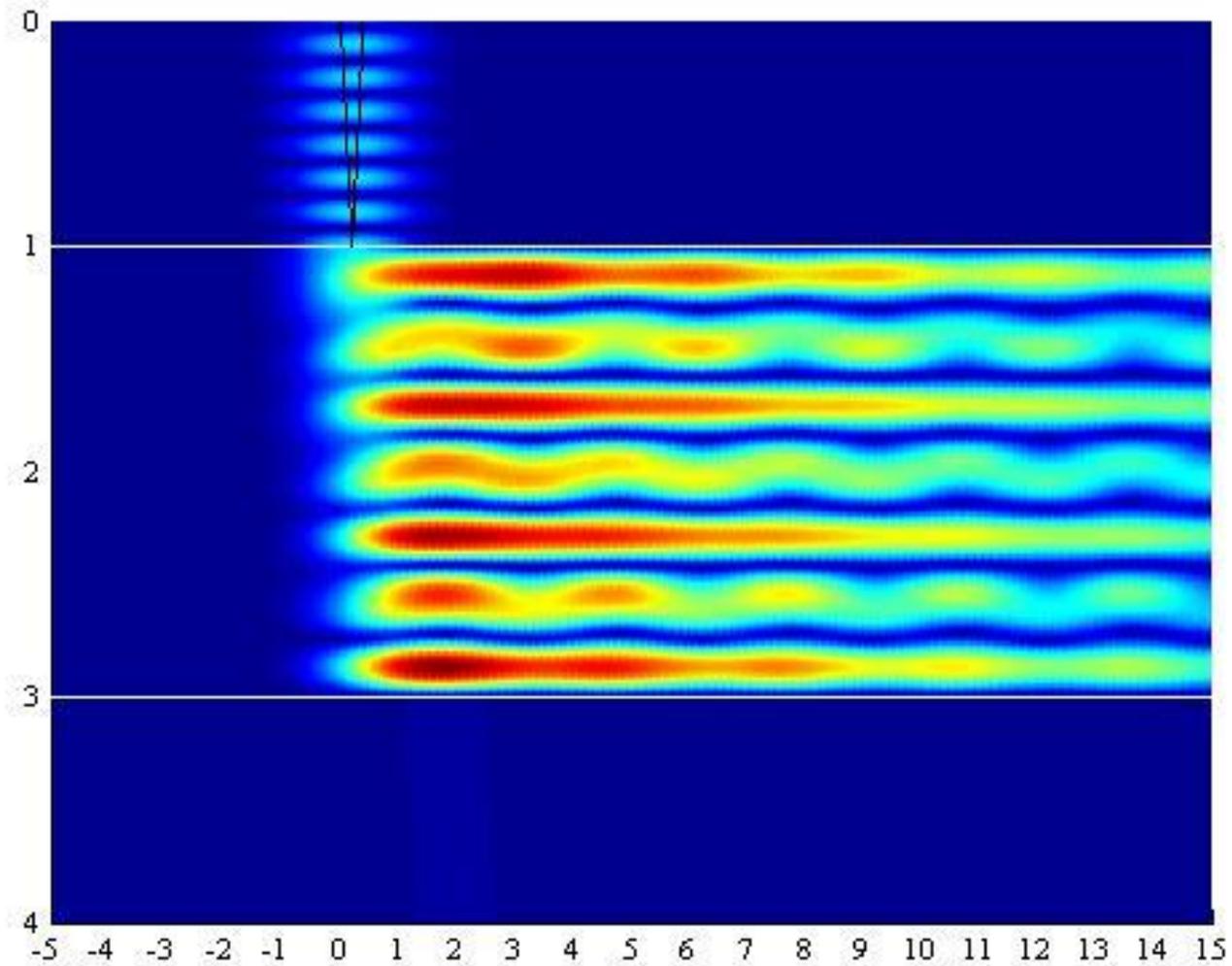
## Génération d'ondes de Rayleigh (2/2)



## Génération d'onde de Stoneley



## Génération d'onde de Lamb



## ❑ Intégrales de Fourier

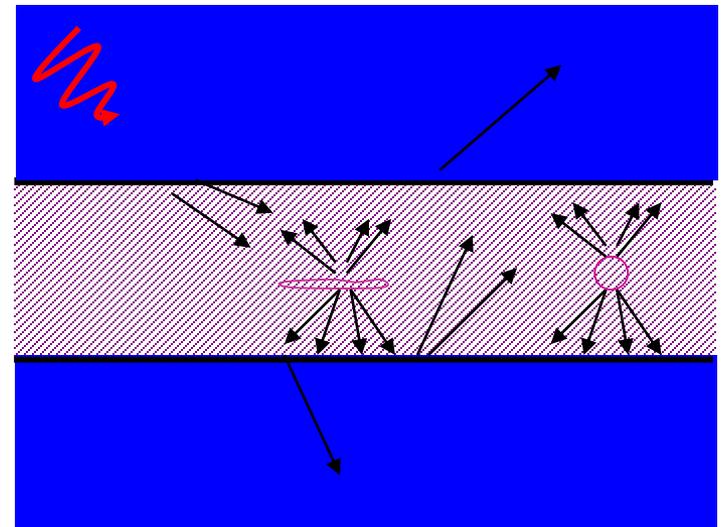
Propagation dans les milieux sains et traversées des interfaces

## ❑ Méthode des équations intégrales (BEM)

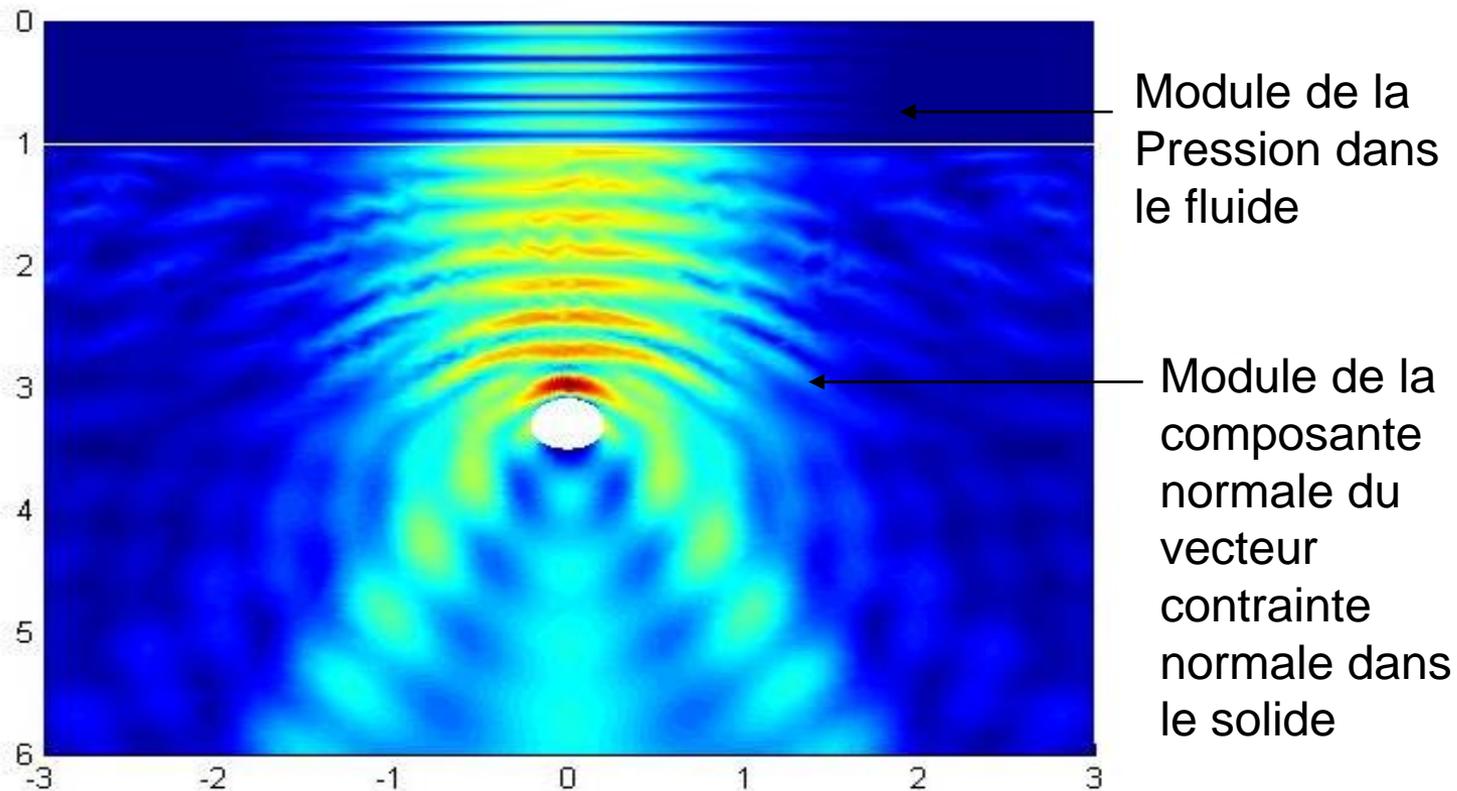
Diffusion par le défaut

## ❑ Méthode hybride itérative

Interactions successives entre le défaut et les interfaces



## Interaction d'un faisceau ultrasonore avec un défaut cylindrique

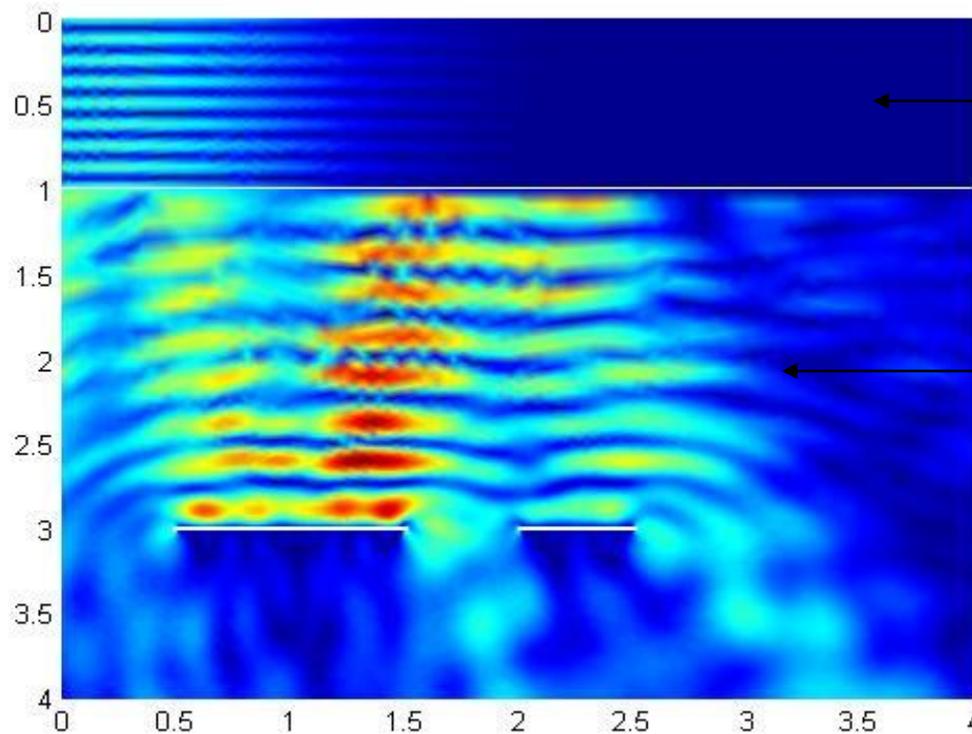


**N. BEDRICI**, M.BEN TAHAR, Ph. GATIGNOL, "A Fourier Integral Boundar Element Method applied to the scattering of a beam by defect under an interface" (Acustica/Acta Acustica), Vol. 103 (2017) 200 – 209

Incidence =  
 $10^\circ$

Itérations =  
15

## Interaction d'un faisceau ultrasonore avec deux défauts plans



Module de la  
Pression dans  
le fluide

Module de la  
composante  
normale du  
vecteur  
contrainte  
normale dans  
le solide

# Intégration de capteurs (SHM)



# Caractérisation d'une mousse à propriétés piézorésistive pour applications en intégration de fonctions dans les structures



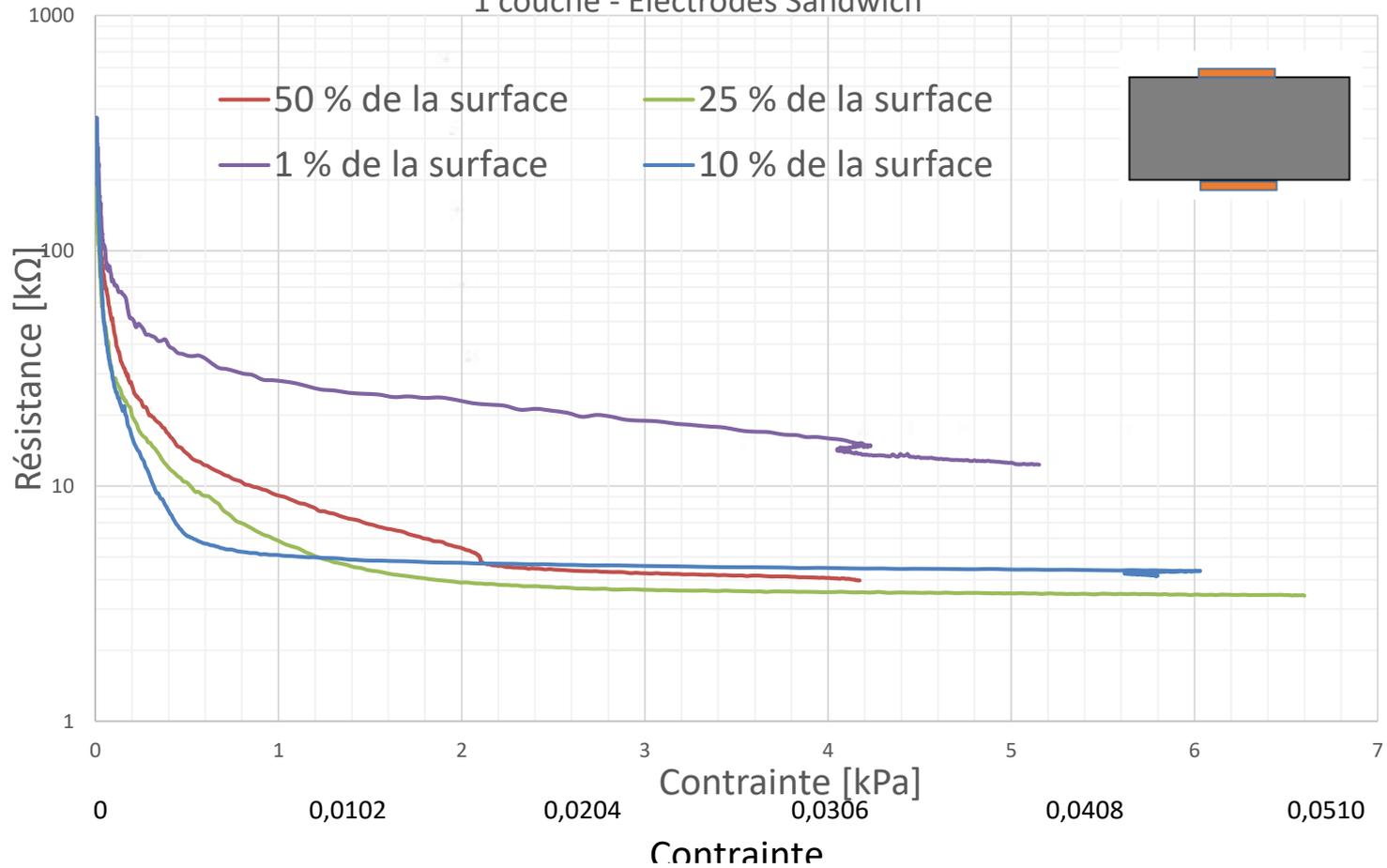
ODAXOS

- **Guillaume MAILLEY**
- **Polytech Nancy – Mécanique Structure et Matériaux**

# Résistance électrique en fonction de la contrainte pour la mousse Basse

Densité

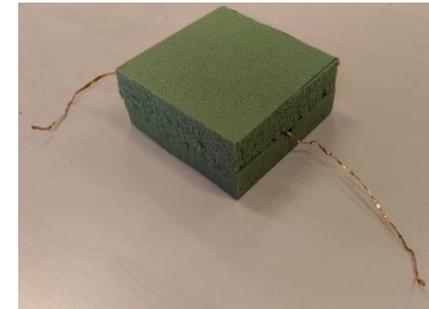
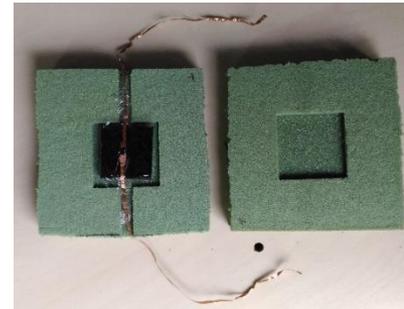
1 couche - Electrodes Sandwich



# Etudes expérimentales

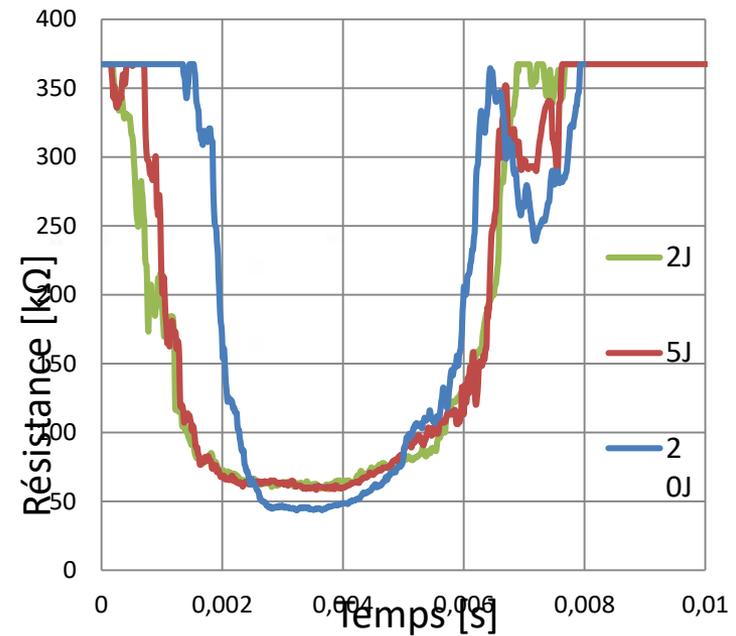
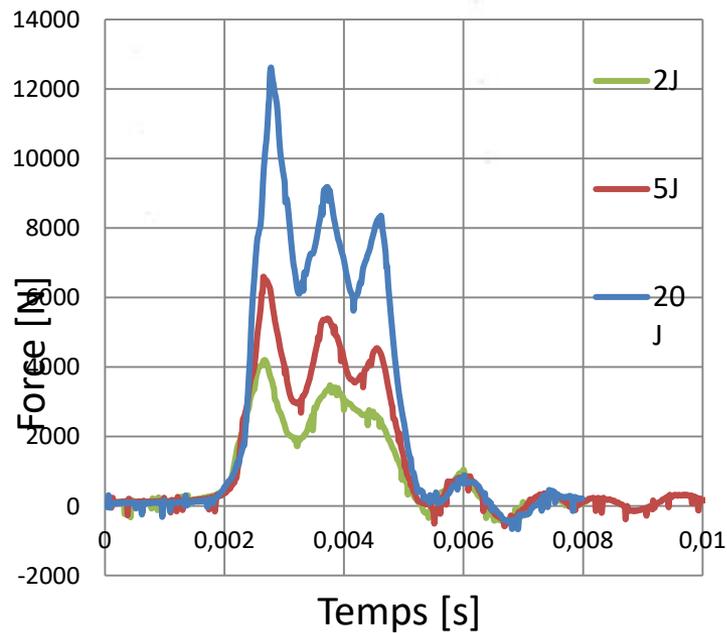
## e. Essai dynamique

- **Utilisation d'une tour de chute permettant de solliciter le matériau à des vitesses de déformation élevées**
- **Utilisation de mousse structurale de densité  $80 \text{ kg/m}^3$** 
  - Etudier les effets d'une association de ces matériaux sur les mesures électriques
  - Dimension de la mousse structurale:  $100 \times 100 \times 20 \text{ mm}$
  - Usinage de poches ( $40 \times 40 \times 4 \text{ mm}$ ) et de rainures ( $8 \text{ mm}$  de largeur)
  - Dimension de la mousse piézorésistive:  $30 \times 30 \times 6 \text{ mm}$
- **Deux essais réalisés:**
  - Avec un impacteur de surface plane
  - Avec un impacteur hémisphérique



# Résultats essais dynamiques

## Impacteur de surface plane



Thèse de Arthur Monti (soutenue en décembre 2016)  
Elaboration et Caractérisation Mécanique d'une Structure Sandwich à base de Constituants Naturels

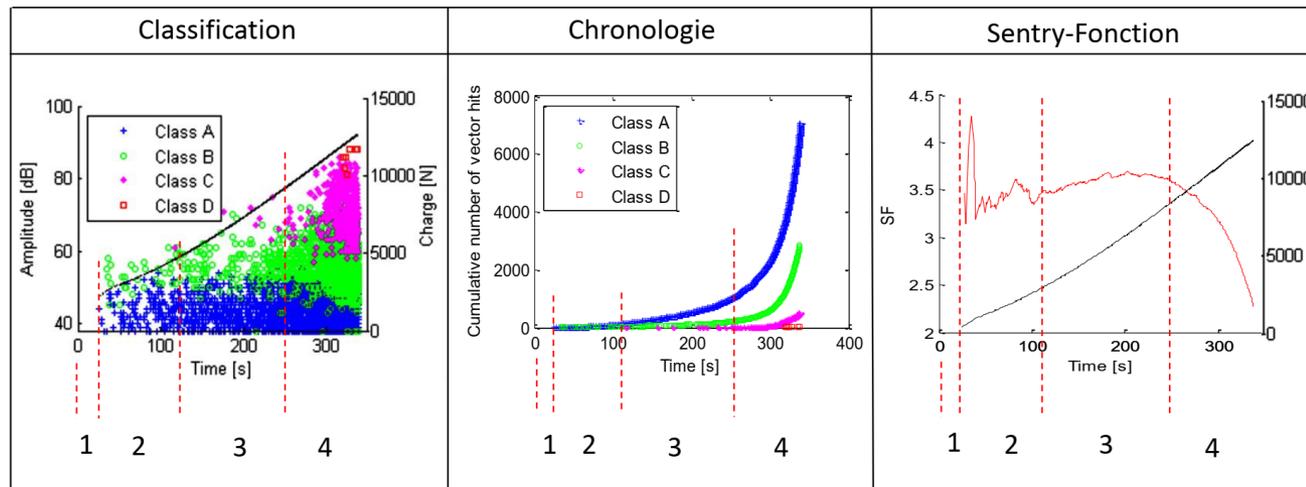


Matériau : Composites Stratifiés Lin – Elium

## Analyse des données d'Emission Acoustique

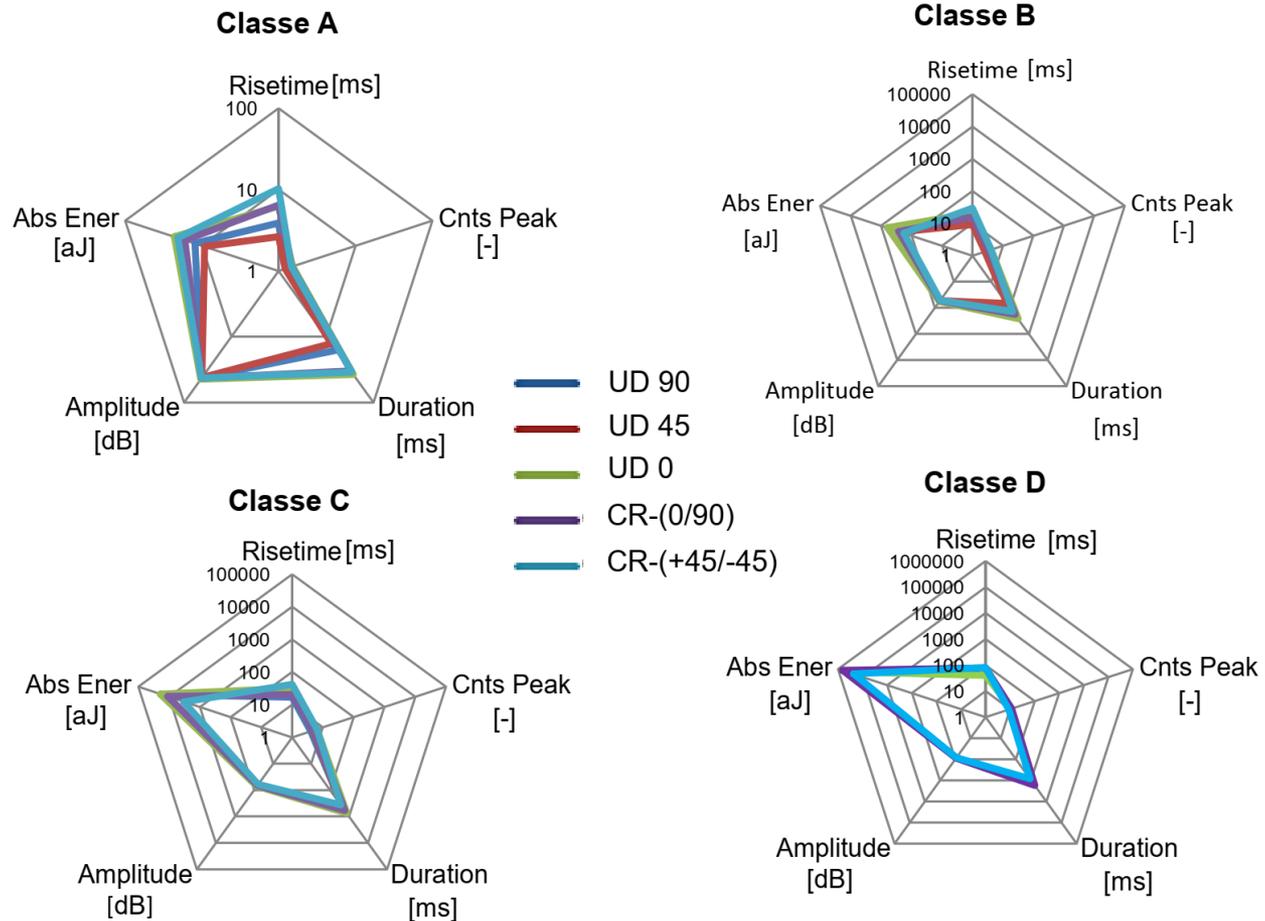


### Exemple de l'éprouvette UD-0

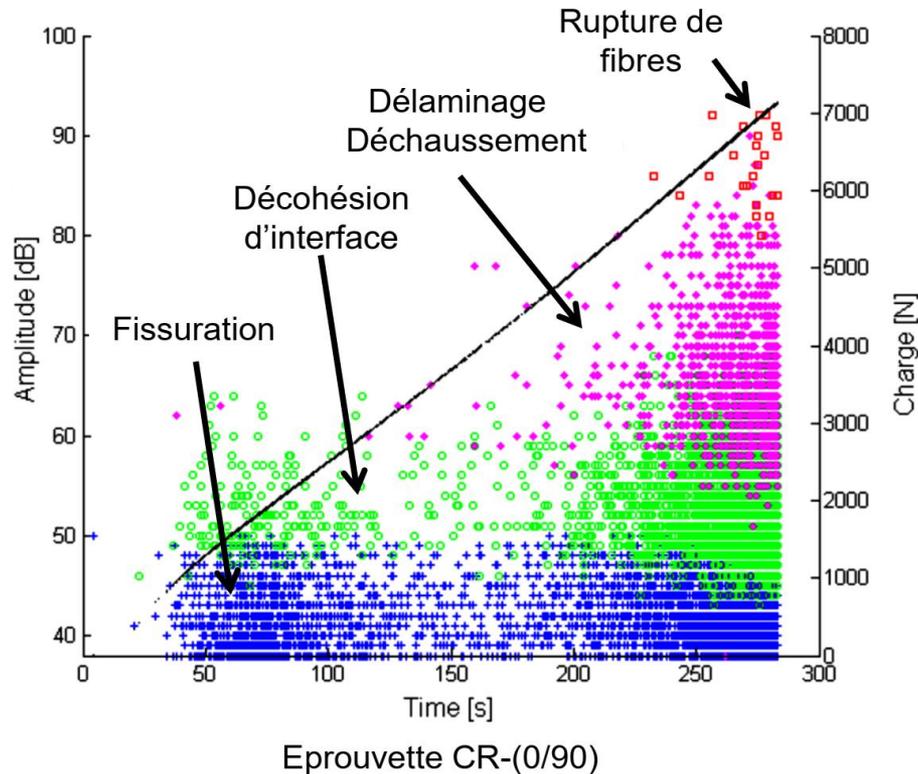


- 1) Domaine élastique
- 2) Endommagement de type fissuration
- 3) Inflexion - rigidification
- 4) Accélération de l'endommagement.

# Caractérisation et comparaison des classes d'EA



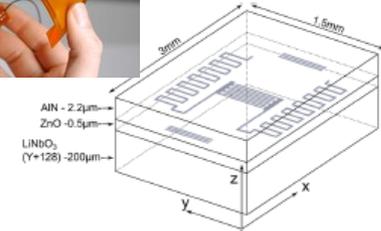
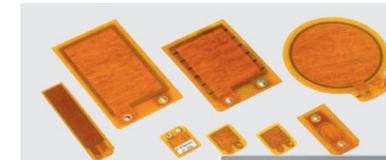
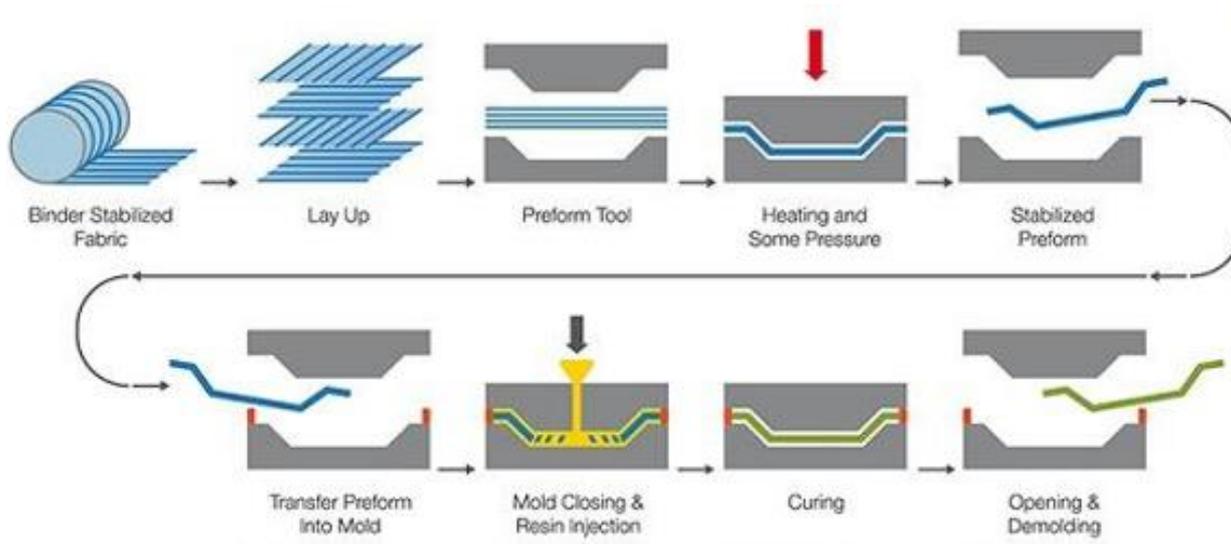
## Attribution des classes d'EA aux mécanismes d'endommagement



- Proposition d'attribution
- Evolution de l'endommagement
- Alimenter des modèles numériques
- Classification supervisée
- Contrôle de santé

Monti et al. (2016). *Mechanical behaviour and damage mechanisms analysis of a flax-fibre reinforced composite by acoustic emission.. Composite Part A. Vol 90. 100-110.*

Thèse de Salim Zennouh (début en février 2019)  
 Composites multifonctionnels et réactifs : Mise en œuvre, caractérisations et applications



Intégration d'outils connectés (capteurs, actionneurs, ... ) dans le matériau composite.  
 besoins : SHM, information cycle production, fonction active contrôlée, ...)





**Fin**