

Simulation du contrôle par ondes guidées dans CIVA

Bastien Chapuis et Nicolas Dominguez

31 mai 2012



PLAN

Introduction

- CIVA
- Les modes guidés

Les 3 modules de la version Ondes Guidées de CIVA

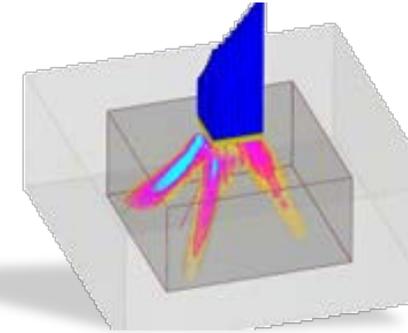
- Calcul de mode
- Calcul de champ
- Réponse à une inspection

Intégration en cours

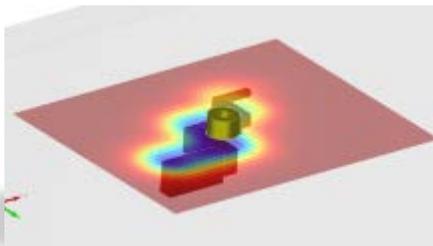
- Guide CAO2D
- Défauts quelconques
- EMAT
- Guide anisotrope

WHY USING SIMULATION IN NDT?

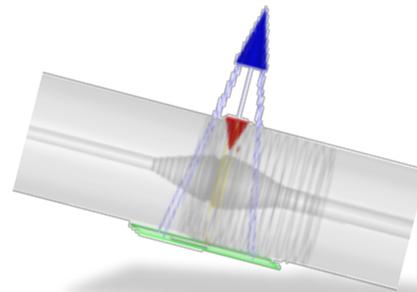
- Design of new probes, methods, procedures
- NDT performance anticipation
- Qualification of methods
- Uncertainty analysis (POD)
- Interpretation of results: analysis, diagnosis
- « Virtual testing » in product design phases (reduce physical mock-ups)
- Training
- Vector of innovation...



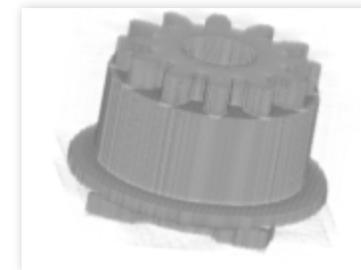
UT : Transmitted beam computation



ET : 2D map of a complex defect



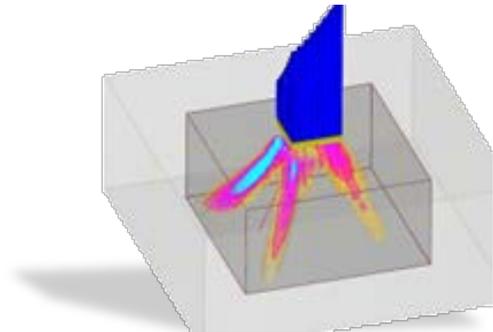
RT : weld inspection



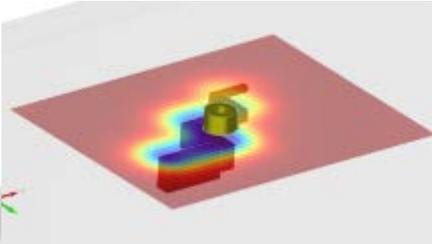
CT : tomographic reconstruction of complex parts

WHAT IS CIVA?

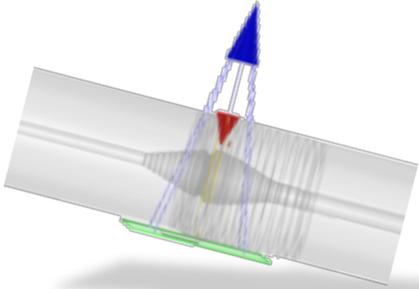
- The world reference for NDT simulation & expertise
 - » More than 250 licences worldwide
 - Industries, SMEs, research centers, academics
- A multi-technique software platform
 - » UT, ET, RT, CT, GWT
- A valorization platform
 - » Collaborations with many leading labs (industry and academics)



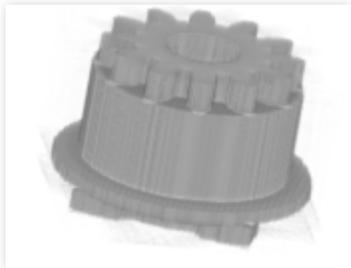
UT : Transmitted beam computation



ET : 2D map of a complex defect



RT : weld inspection



CT : tomographic reconstruction of complex parts



Developed by 4 labs at CEA-LIST ~ 35 developers permanently

SIMULATION APPROACH

- **Semi-analytical models**
 - Physical hypothesis and approximations for fast computations
 - Easy to use
 - ⇒ Possible intensive use in industrial environments
- **Numerical models**
 - Coupling with purely numerical approaches (FDTD, FEM...)
 - Hybridation : benefit from speed of semi-analytical and ability of numerical methods
 - ⇒ Allow to consider very complex configurations at reduced cost

IMPLEMENTATION OF A CIVA SOFTWARE PLATFORM

- GUI designed for NDT, for each technique
- Connection to CAD tools (+ simplified 2D CAD inside CIVA)
- In the same environment: Simulation, imaging and processing tools



PLAN

■ Introduction

- CIVA
- Les modes guidés

■ Les 3 modules de la version Ondes Guidées de CIVA

- Calcul de mode
- Calcul de champ
- Réponse à une inspection

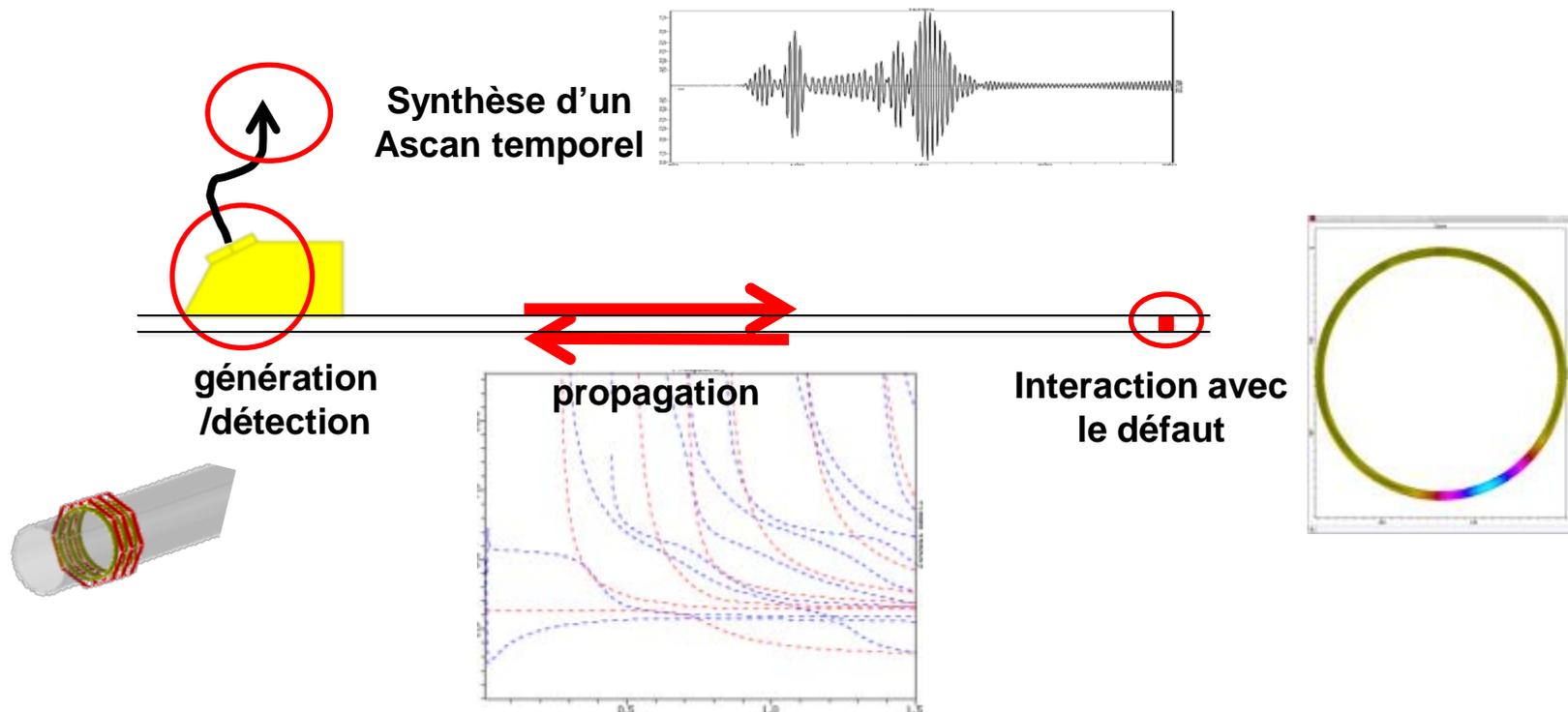
■ Intégration en cours

- Guide CAO2D
- Défauts quelconques
- EMAT
- Guide anisotrope

La mise au point d'un contrôle par ondes guidées se fait généralement en trois étapes principales :

- Détermination des modes de la structure à contrôler
- Sélection/optimisation du capteur utilisé
- Acquisition

CIVA propose des outils pour ces trois étapes :



Dans un guide d'onde (une plaque, un tube, un rail,...) différents modes peuvent se propager, dans des cas idéaux sur plusieurs centaines de mètres.

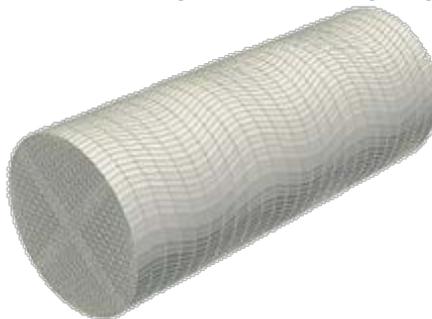
Exemple des tubes:

Le mode le plus utilisé dans un tube (ou un cylindre) est appelé T(0,1) :

c'est un mode de torsion axisymétrique, qui présente des propriétés favorables pour le contrôle, en particulier il est non dispersif.

Cependant bien d'autres modes peuvent se propager dans un tube, on les regroupe en différentes familles.

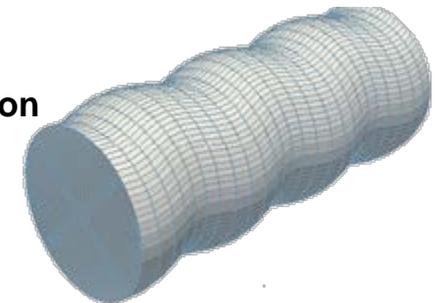
torsion



longitudinaux

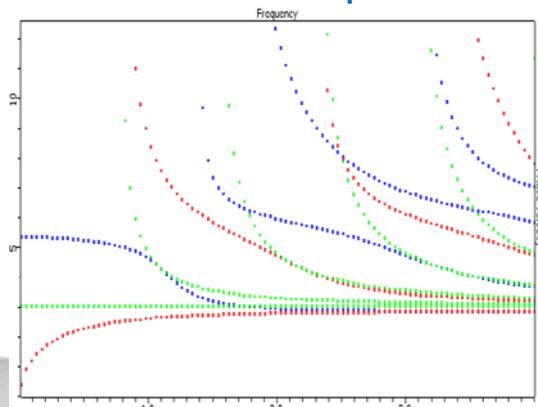


flexion

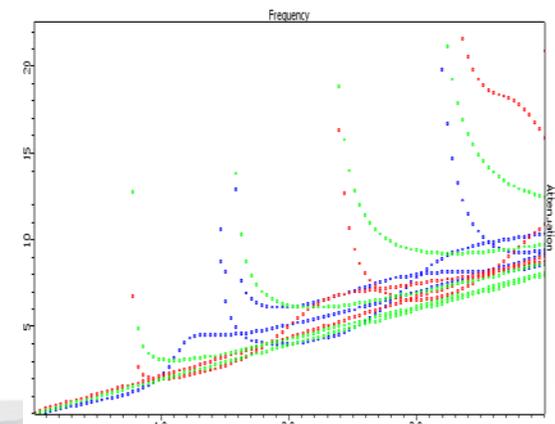


Les propriétés de ces modes sont représentées sous la forme de courbes de dispersion :

Vitesse en fonction de la fréquence



Atténuation en fonction de la fréquence





PLAN

Introduction

- CIVA
- Les modes guidés

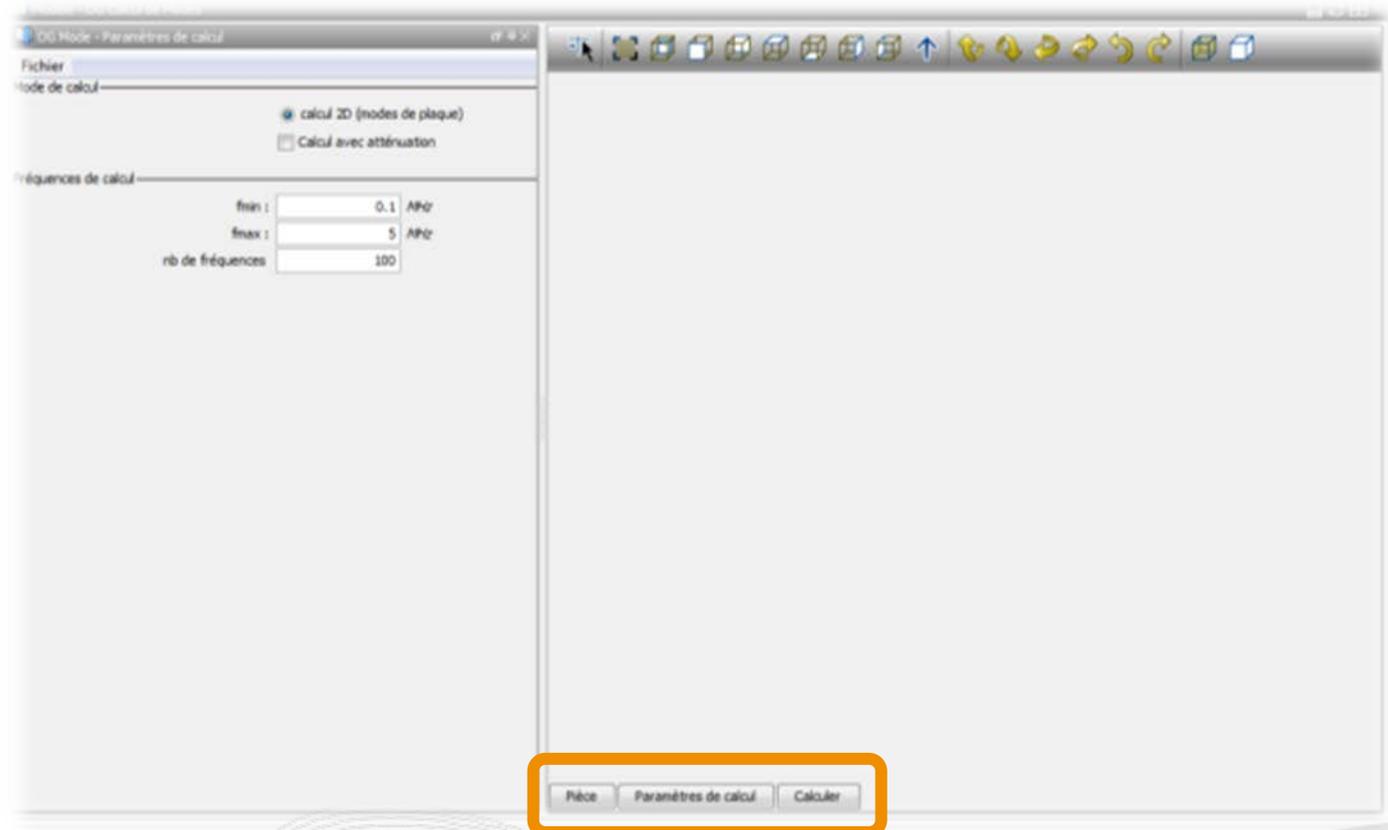
Les 3 modules de la version Ondes Guidées de CIVA

- Calcul de modes – courbes de dispersion
- Calcul de champ
- Réponse à une inspection

Intégration en cours

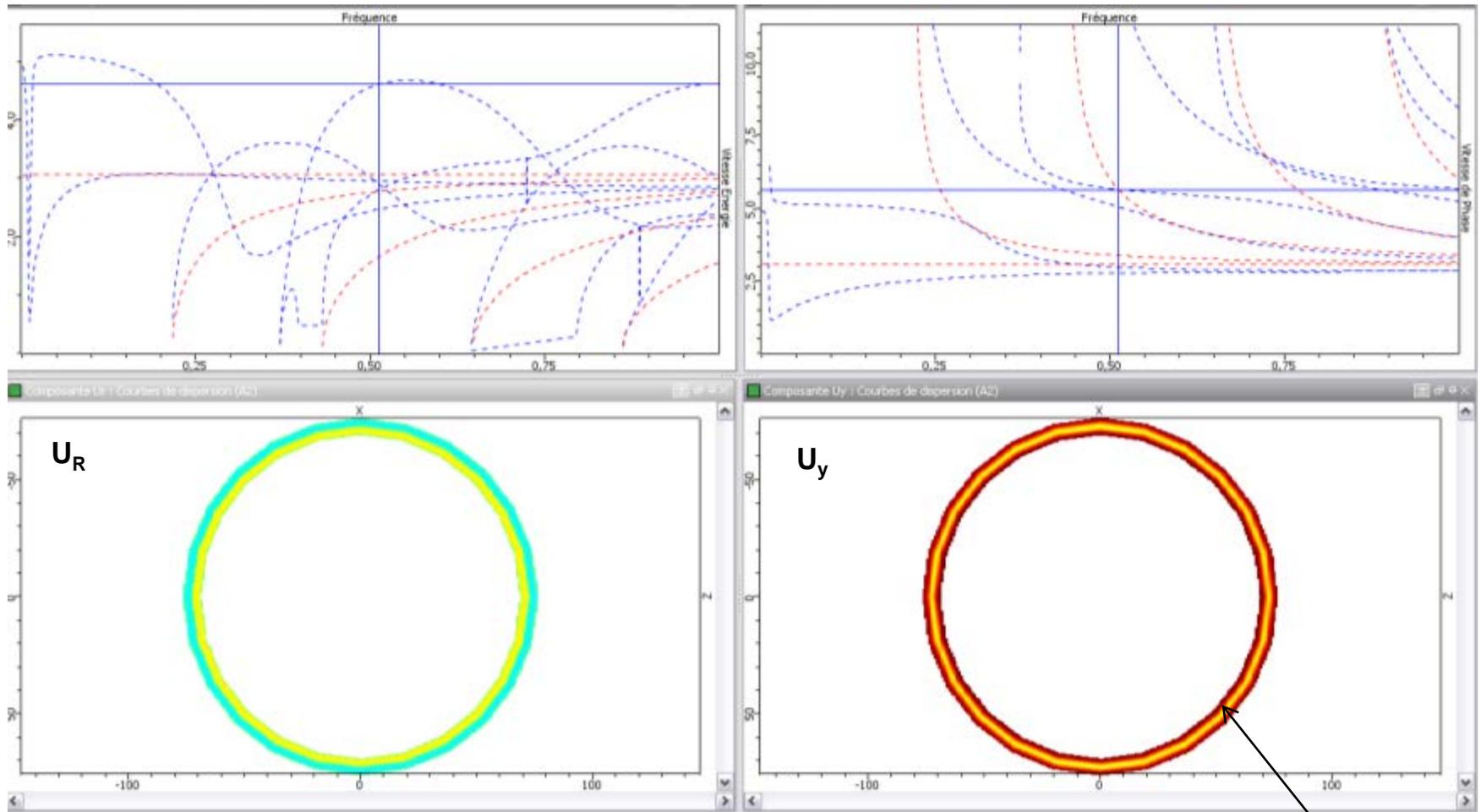
- Guide CAO2D
- Défauts quelconques
- EMAT
- Guide anisotrope

- Etudier les modes susceptibles de se propager dans la pièce (le guide d'ondes), « indépendamment » de la source d'excitation
 - Définition de la pièce (le guide d'onde)
 - Définition d'une plage de fréquence
 - Calcul des modes



mode L(0,4) dans un tube 6" OD

Courbes de dispersion



Profil de déplacement du mode sélectionné

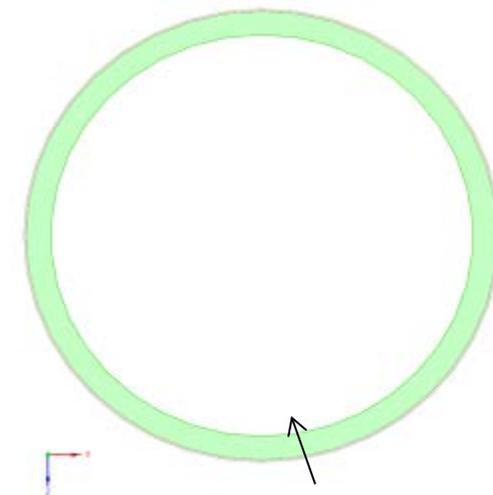
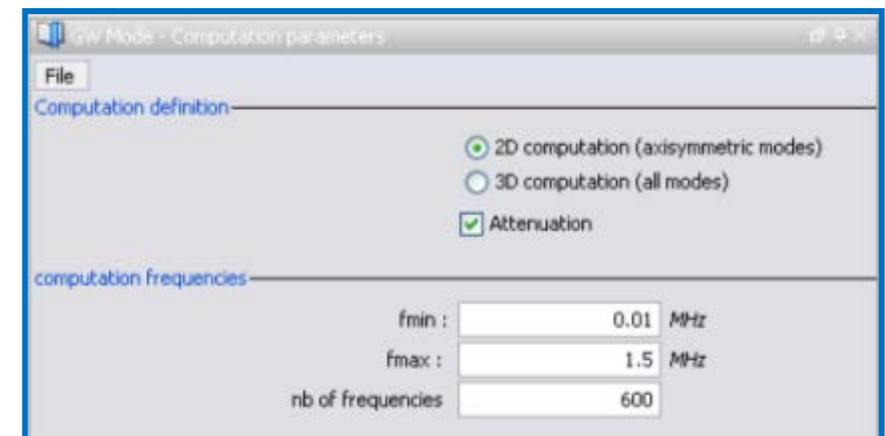
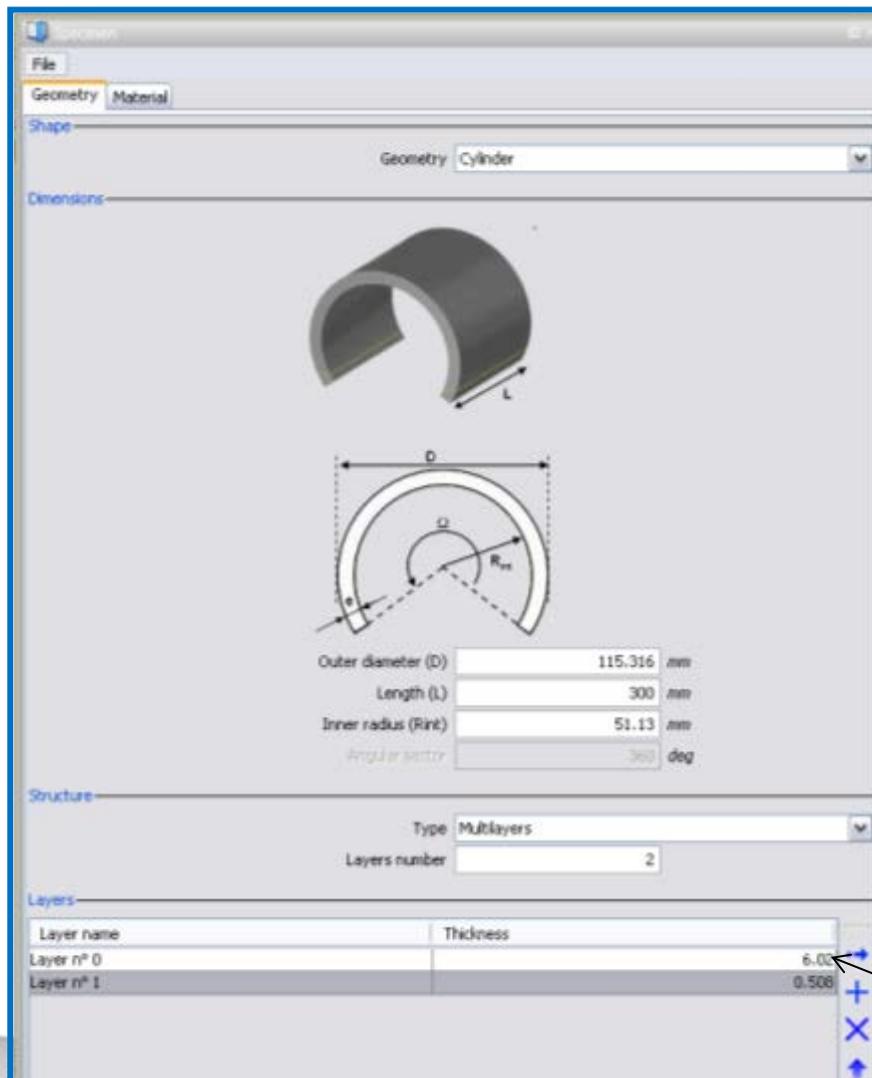
- A 510 kHz le profil de déplacement du mode L(0,4) est essentiellement axial tangential
- Mode qui ne perd pas d'énergie dans un liquide environnant.
- Utilisé pour le contrôle de tubes immergés ou remplis de liquides

Peu d'énergie au milieu

Hay, T. & Rose, J., Fouling detection in the food industry using ultrasonic guided waves, *Food Control*, 2003, 14, 481-488

Géométrie et gamme de fréquences

Les tubes peuvent être protégés par un revêtement externe qui perturbe la propagation des modes



1/2 mm revêtement viscoélastique (couche de protection)



Paramètres matériaux

Paramètres à saisir: vitesse des ondes longitudinales et transverses (ondes de volume), ainsi que leur atténuation.

Specimen

File

Geometry Material

- Layer n° 0 :: Isotropic
- Layer n° 1 :: Isotropic

Name steel

Type Simple

Density 7.86 $g.cm^{-3}$

Symmetry Isotropic

Longitudinal wave velocity 5850 $m.s^{-1}$

Transverse wave velocity 3230 $m.s^{-1}$

Longitudinal wave attenuation

Attenuation law None

Transversal wave attenuation

Attenuation law None

Close

Tube d'acier

Specimen

File

Geometry Material

- Layer n° 0 :: Isotropic
- Layer n° 1 :: Isotropic

Name E&C 2057 / Cat9 Epoxy

Type Simple

Density 1.6 $g.cm^{-3}$

Symmetry Isotropic

Longitudinal wave velocity 2960 $m.s^{-1}$

Transverse wave velocity 1450 $m.s^{-1}$

Longitudinal wave attenuation

Attenuation law Exponential attenuation law

Table Curve

Wave attenuation 0.256 $db.mm^{-1}$

Power of the attenuation rate 1

Wave frequency 1 MHz

Transversal wave attenuation

Attenuation law Exponential attenuation law

Table Curve

Wave attenuation 0.377 $db.mm^{-1}$

Power of the attenuation rate 1

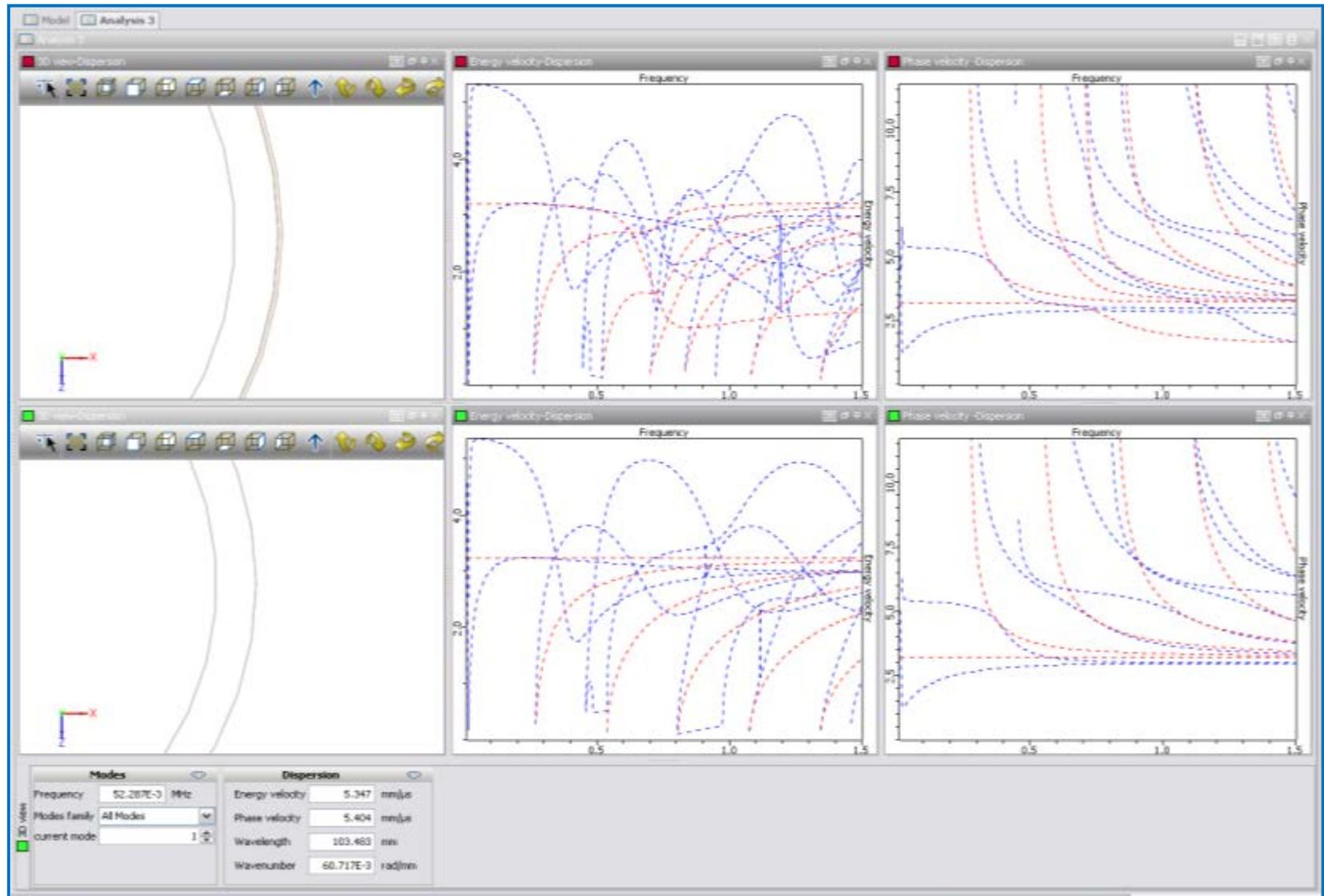
Wave frequency 1 MHz

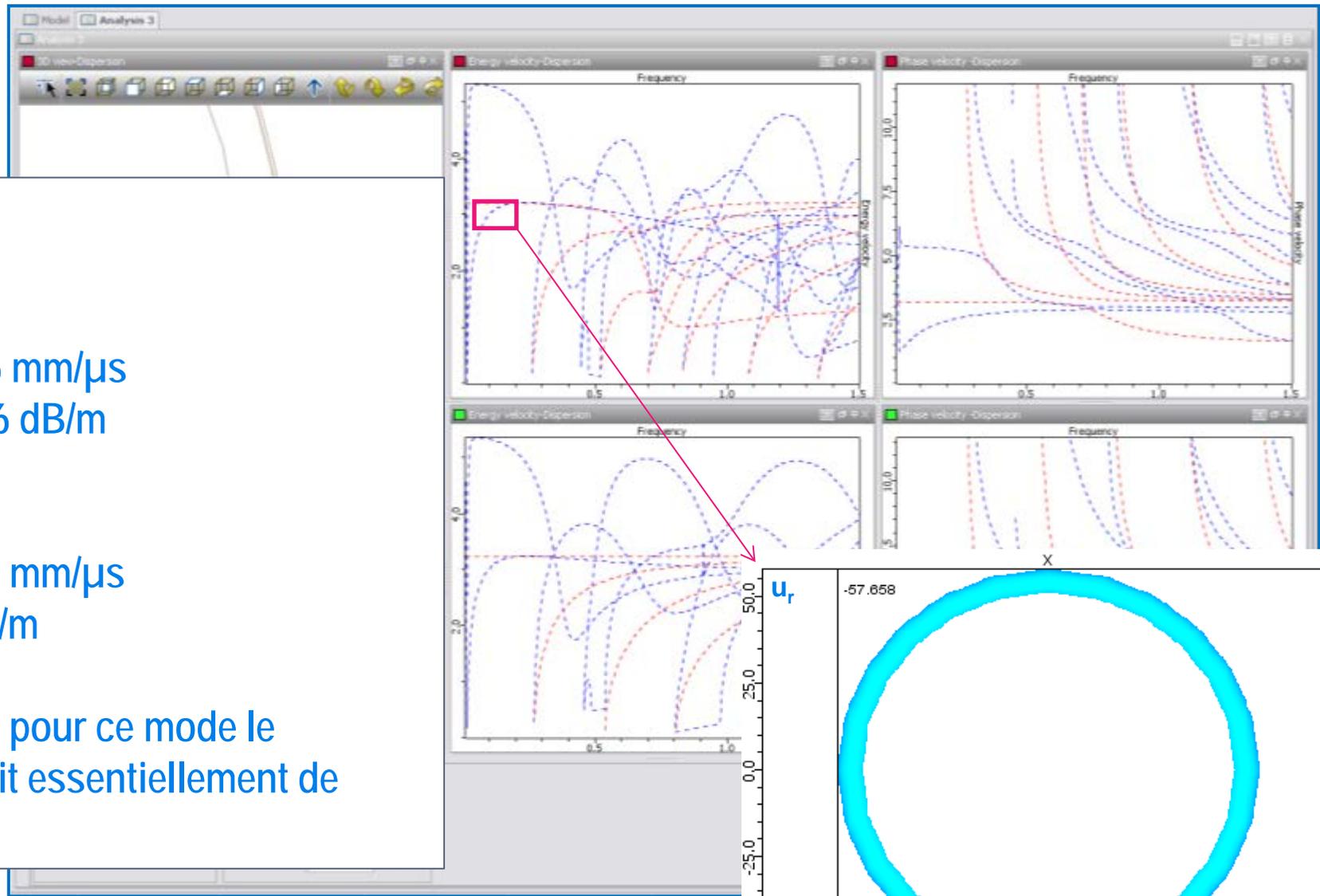
Set defaults values

Revêtement viscoélastique

Avec revêtement

Sans revêtement





A 100 kHz

Avec revêtement :

$$V_e = 2.996 \text{ mm}/\mu\text{s}$$

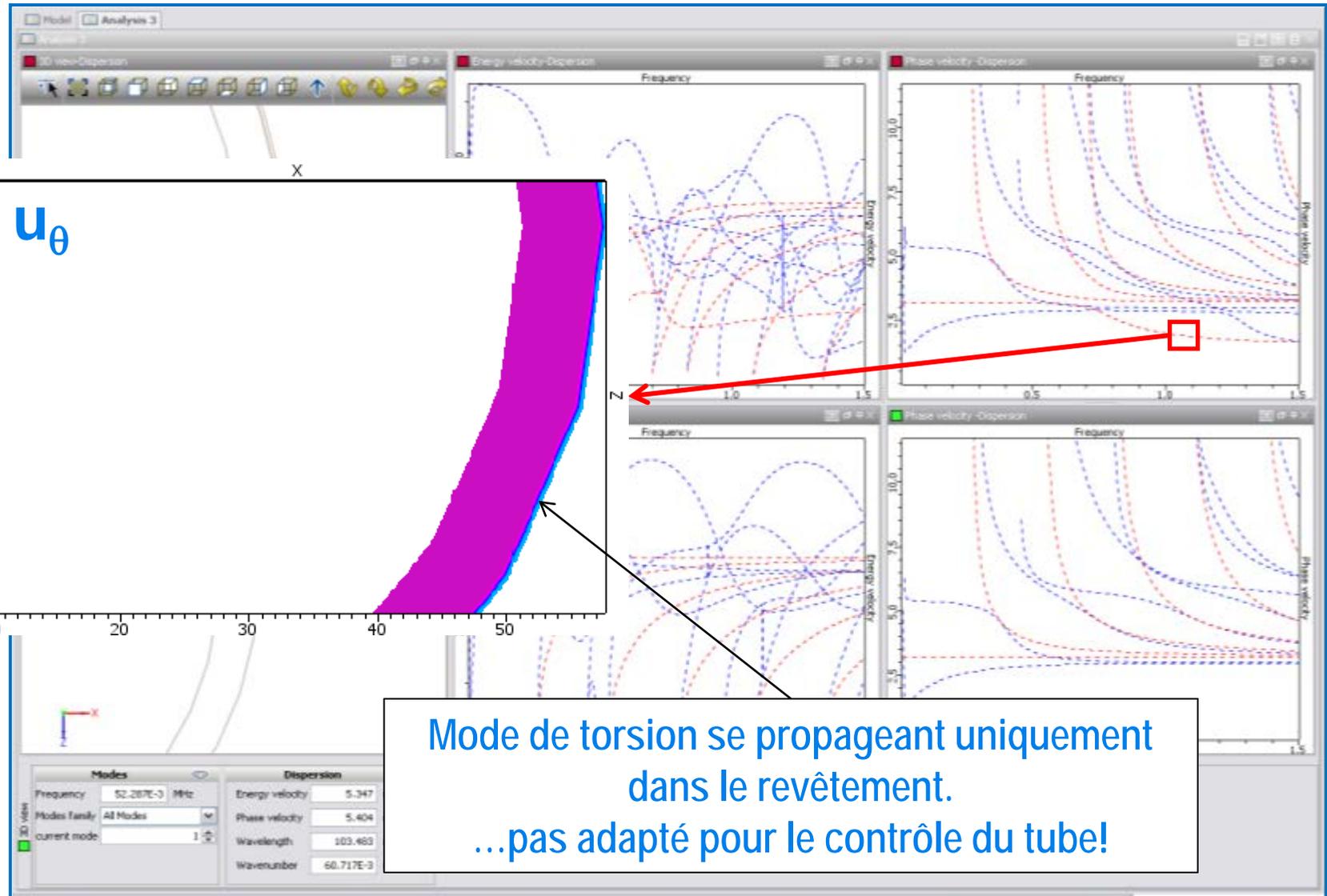
$$\text{Att} = 0.206 \text{ dB/m}$$

Sans revêtement :

$$V_e = 3.011 \text{ mm}/\mu\text{s}$$

$$\text{Att} = 0 \text{ dB/m}$$

A basse fréquence, pour ce mode le revêtement introduit essentiellement de l'atténuation



Avec revêtement

u_θ

Sans revêtement

Mode de torsion se propageant uniquement dans le revêtement.
...pas adapté pour le contrôle du tube!



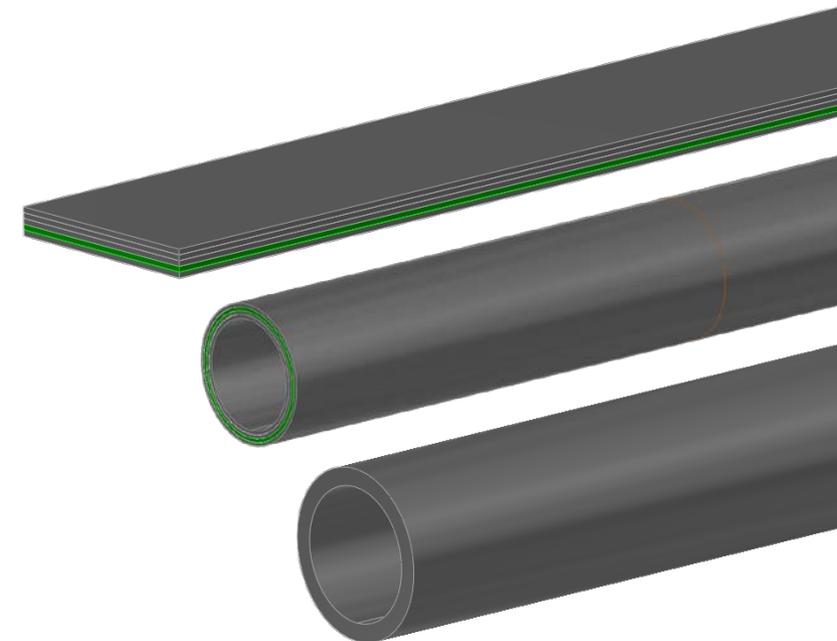
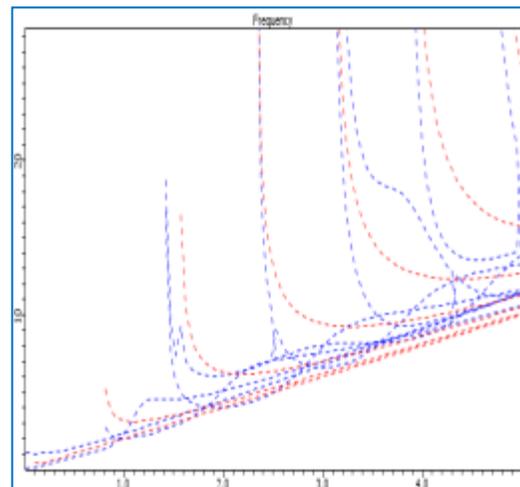
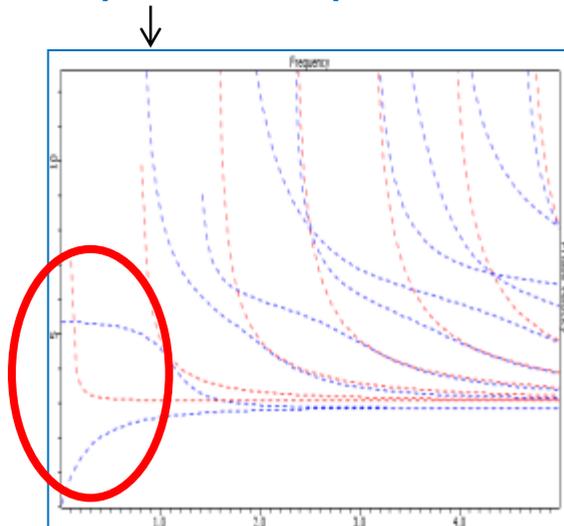
La version actuelle du module ondes guidées de CIVA permet de calculer les modes dans :

- Des plaques (calcul 2D : modes de Lamb / modes SH)
- Des tubes (calculs 2D : modes axisymétriques et 3D : modes de flexion)
- Possibilité de structure multicouche mais pas dans un guide immergé ou enfoui

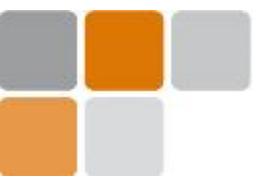
En général un contrôle se fait dans une gamme de fréquences basse pour lesquelles peu de modes se propagent dans la structure, les signaux à hautes fréquences étant très difficiles à interpréter.

Les courbes d'atténuation renseignent sur la distance maximale de contrôle que l'on peut espérer.

1^{ère} fréquence de coupure



L'atténuation globalement croît avec la fréquence mais varie pour chaque mode



PLAN

Introduction

- CIVA
- Les modes guidés

Les 3 modules de la version Ondes Guidées de CIVA

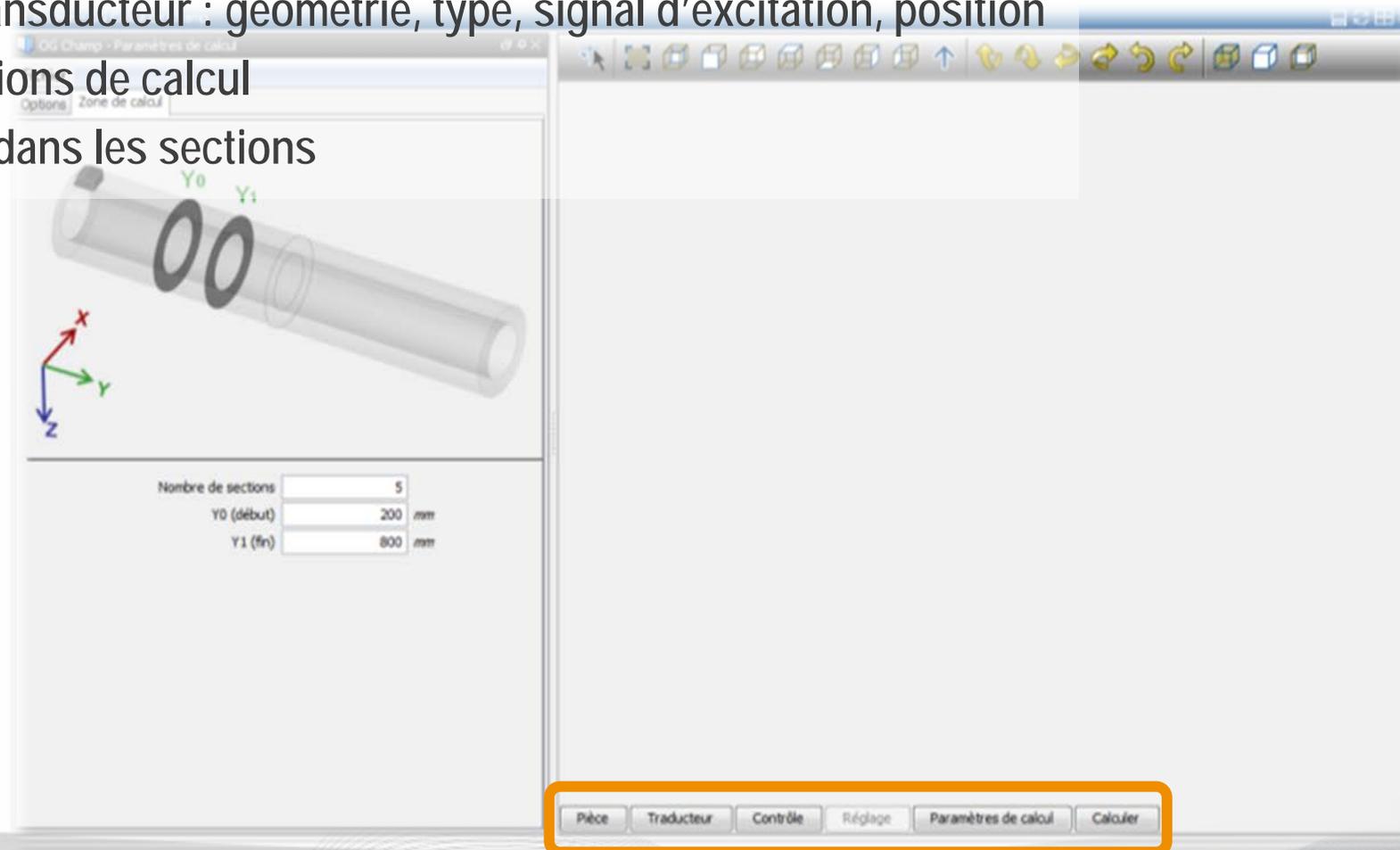
- Calcul de mode
- Calcul de champ
- Réponse à une inspection

Intégration en cours

- Guide CAO2D
- Défauts quelconques
- EMAT
- Guide anisotrope

➤ Calculer le champ émis par un transducteur donné dans un ensemble de sections du guide

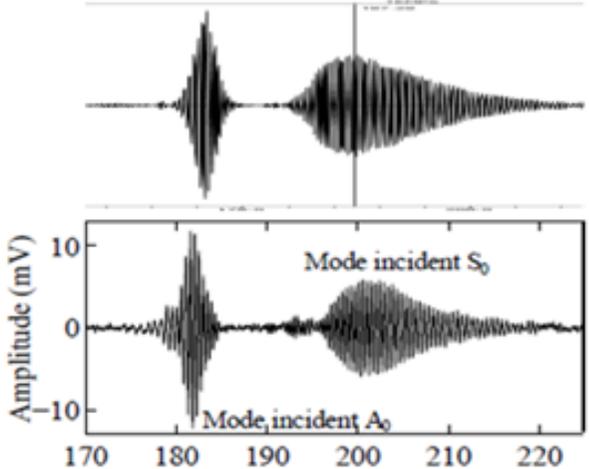
- Définition de la pièce (le guide d'onde)
- Définition d'un transducteur : géométrie, type, signal d'excitation, position
- Définition de sections de calcul
- Calcul du champ dans les sections



Dans une plaque d'aluminium de 2 mm d'épaisseur

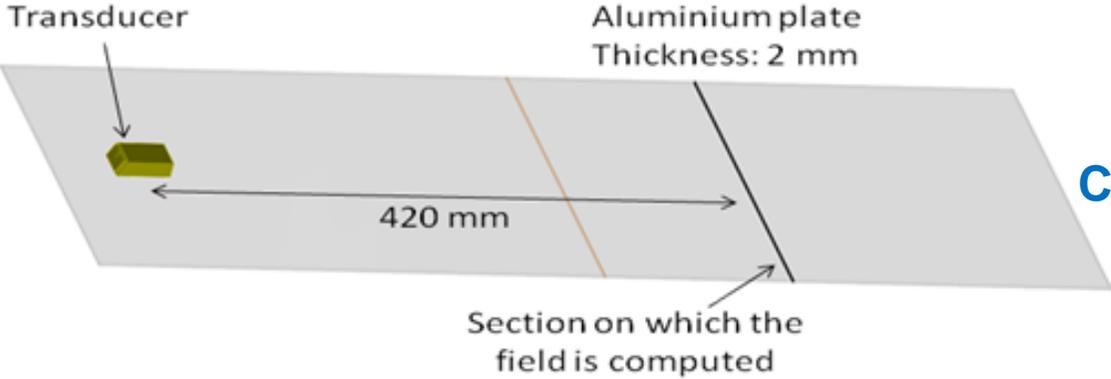
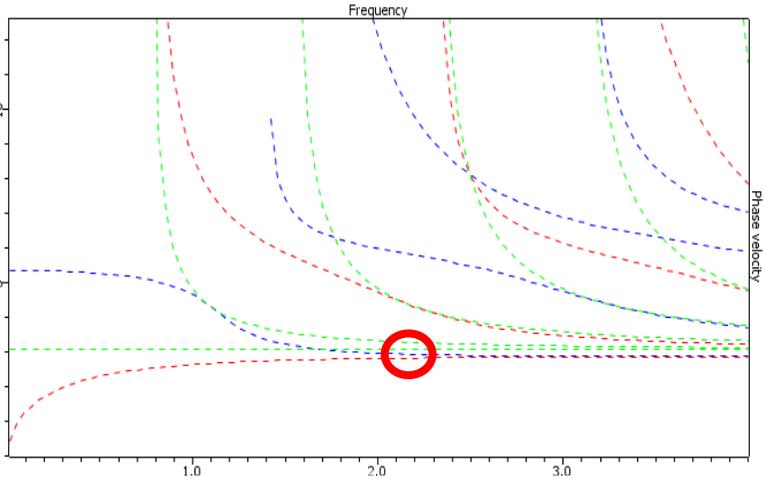
Le transducteur est excité par un burst de 5 cycles de sinusoides à 2.1 MHz

2 modes sont engendrés : A_0 et S_0



Calcul CIVA

Mesure expérimentale par N. Terrien

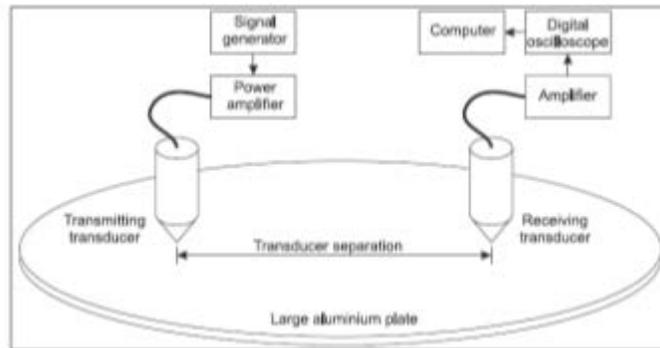


Configuration

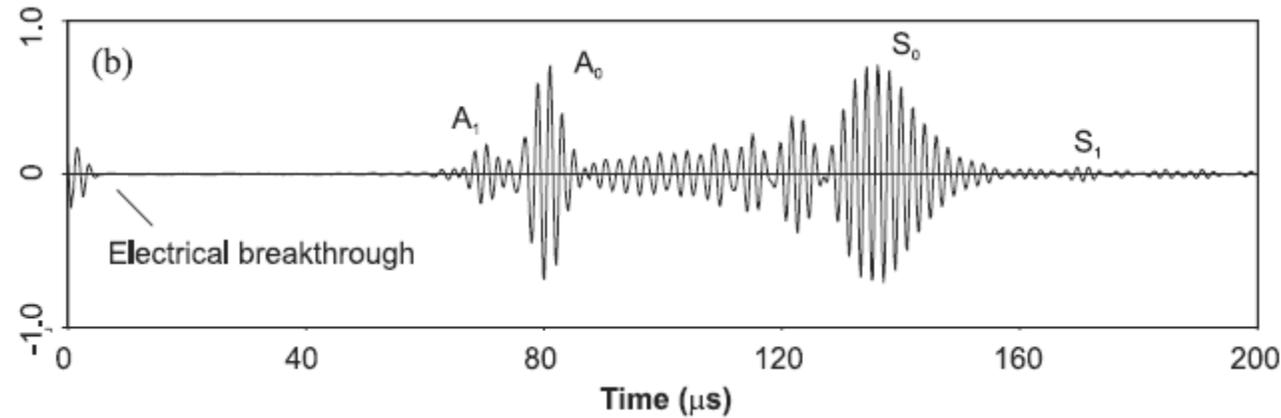
→ CIVA prédit correctement le signal temporel émis par le transducteur sabot, et notamment le rapport entre l'amplitude du mode A_0 émis et l'amplitude du mode S_0 émis

N. Terrien, D. Osmont, D. Royer, F. Lepoutre et A. Déom, 'A combined finite element and modal decomposition method to study the interaction of Lamb modes with micro-defects', *Ultrasonics*, 2007

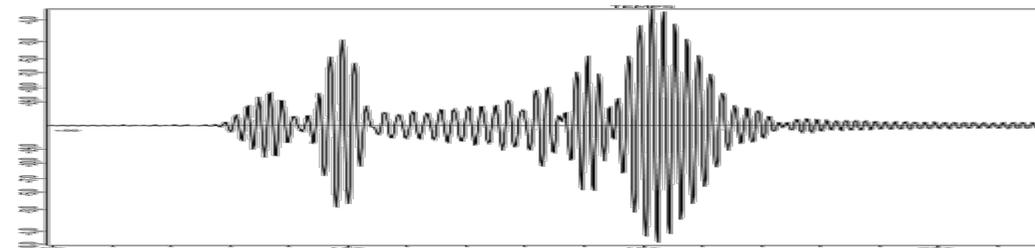
Excitation par un burst de 5 cycles à 0,5 MHz, signal émis par un transducteur quasi-ponctuel



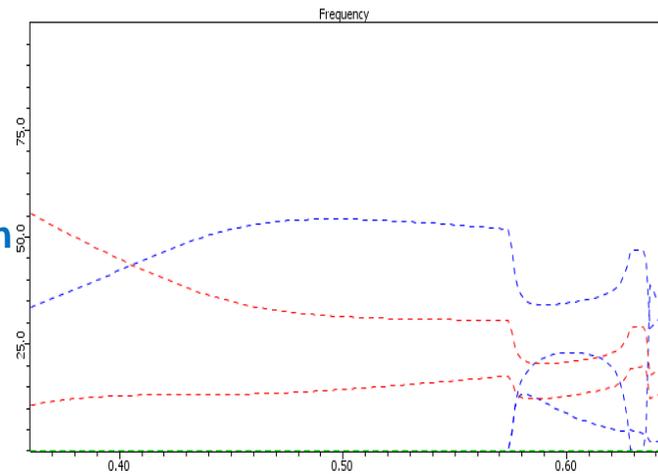
Plaque aluminium d'épaisseur 5 mm



Mesure expérimentale par P. Wilcox



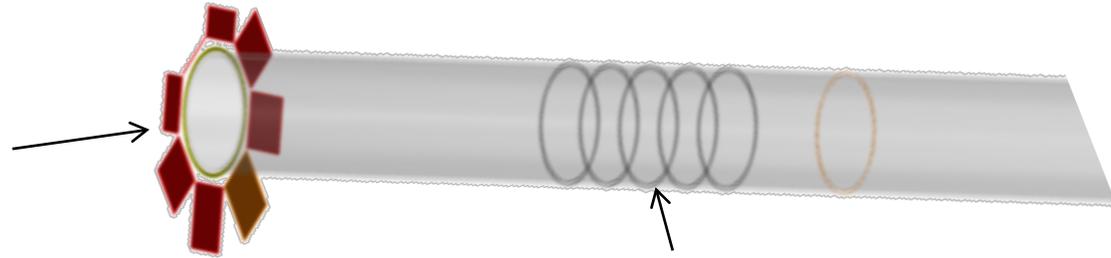
Calcul CIVA



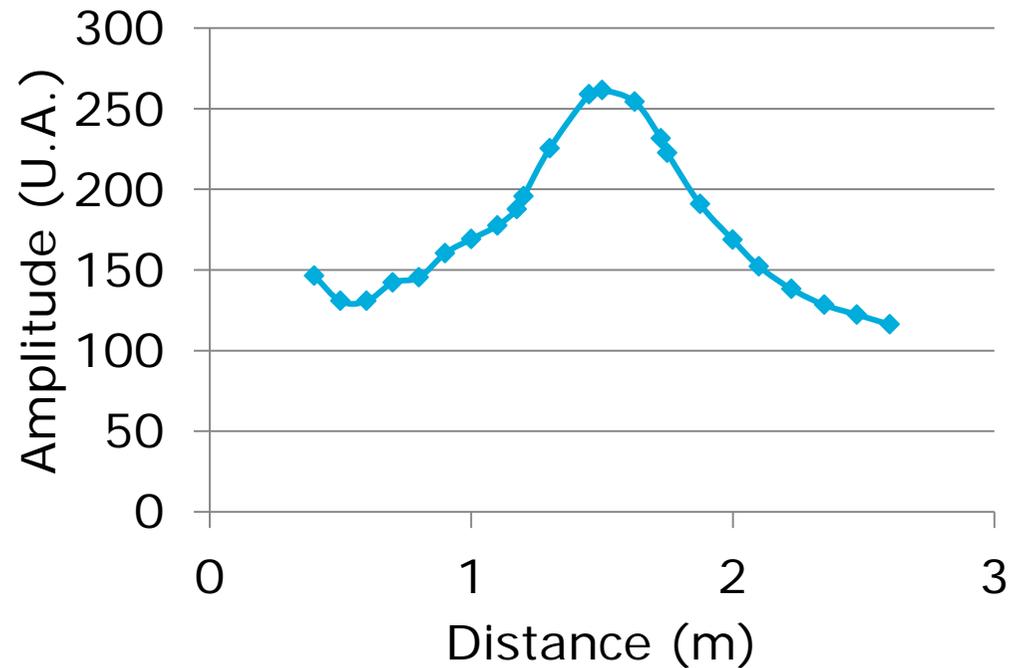
Pourcentage d'énergie émise sur chaque mode en fonction de la fréquence

→ Les courbes d'émission en énergie permettent d'optimiser la génération d'un mode donné

Barrette multiélément et lois de retard (et d'amplitude) associées

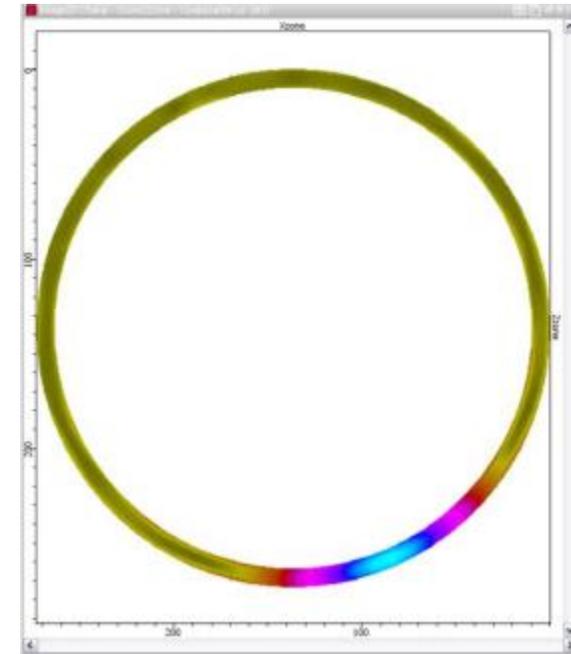
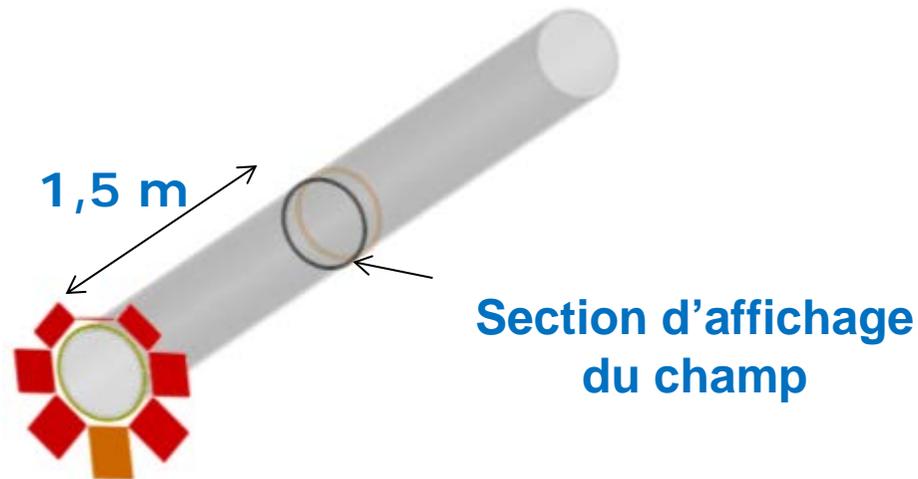


Sections où sont calculés les champs



Définition manuelle des lois

→ Avec ces lois les ondes sont focalisées à 1,5 m de distance



Déplacement axial U_y

Le champ est focalisé radialement :
Peut être utilisé pour discriminer une indication axisymétrique (par exemple une soudure)
d'une indication qui ne l'est pas (un trou, une entaille,...) + « dimensionnement »
→ Capacité de focusing des systèmes Teletest et Wavemaker



PLAN

Introduction

- CIVA
- Les modes guidés

Les 3 modules de la version Ondes Guidées de CIVA

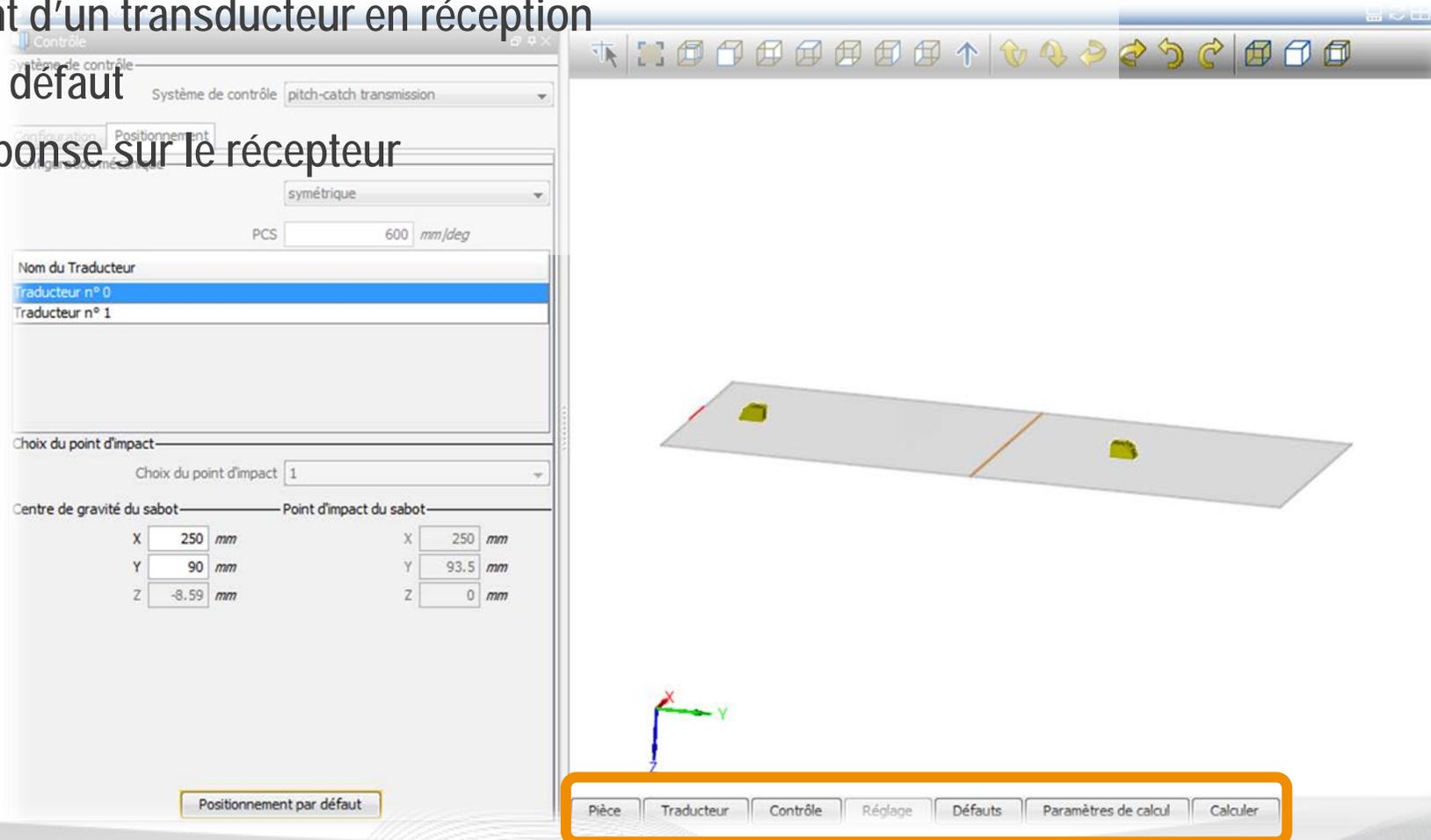
- Calcul de mode
- Calcul de champ
- Réponse à une inspection

Intégration en cours

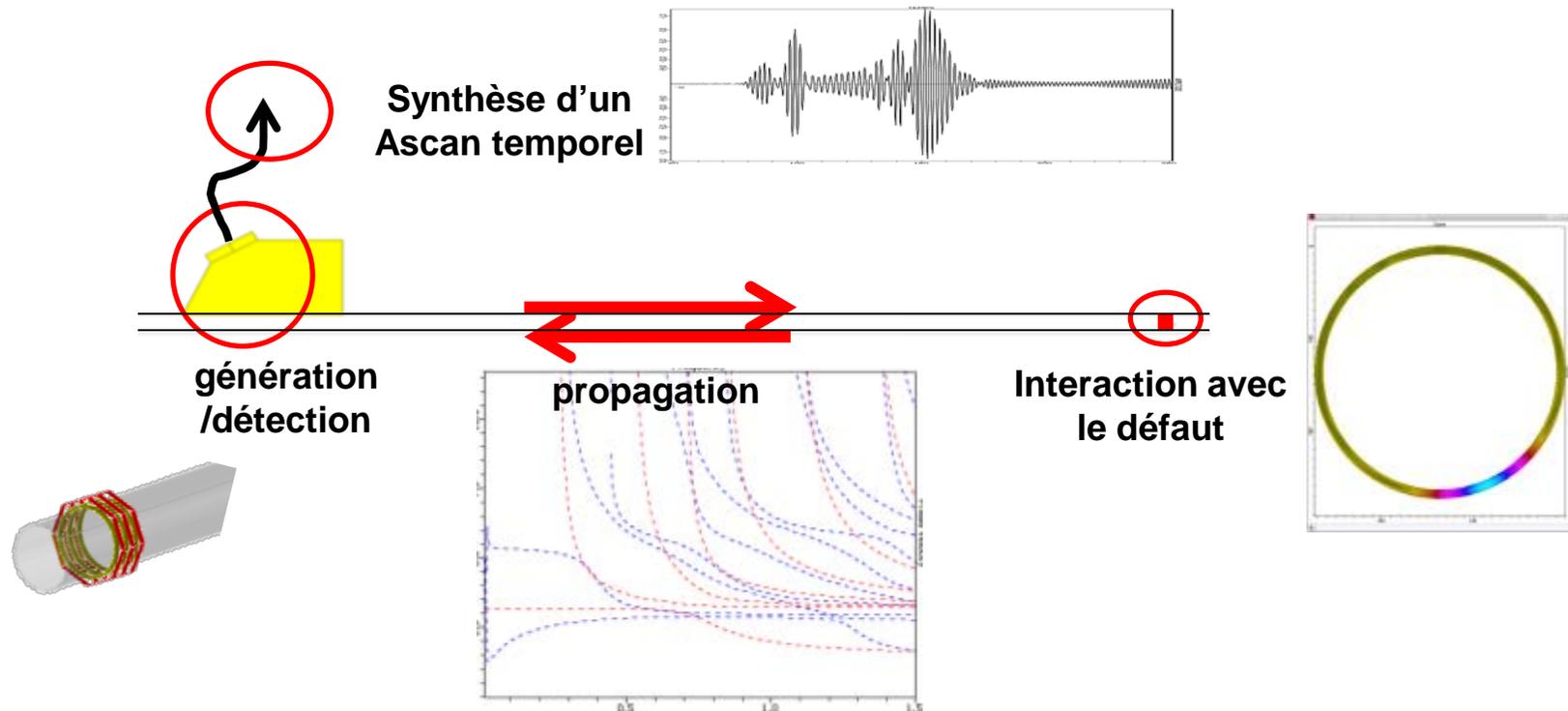
- Guide CAO2D
- Défauts quelconques
- EMAT
- Guide anisotrope

➤ ... pour simuler la réponse d'une inspection

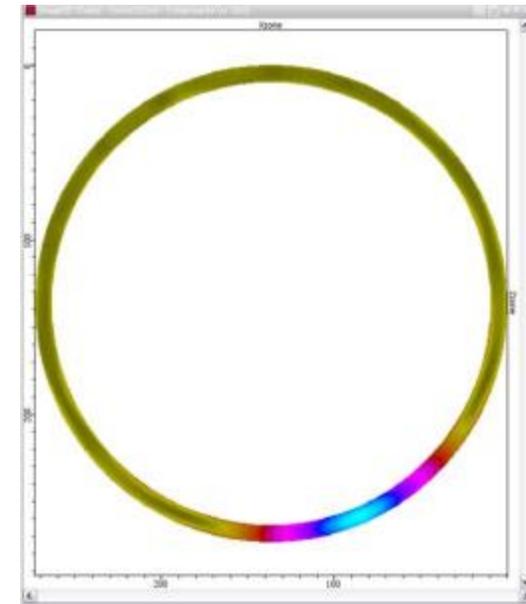
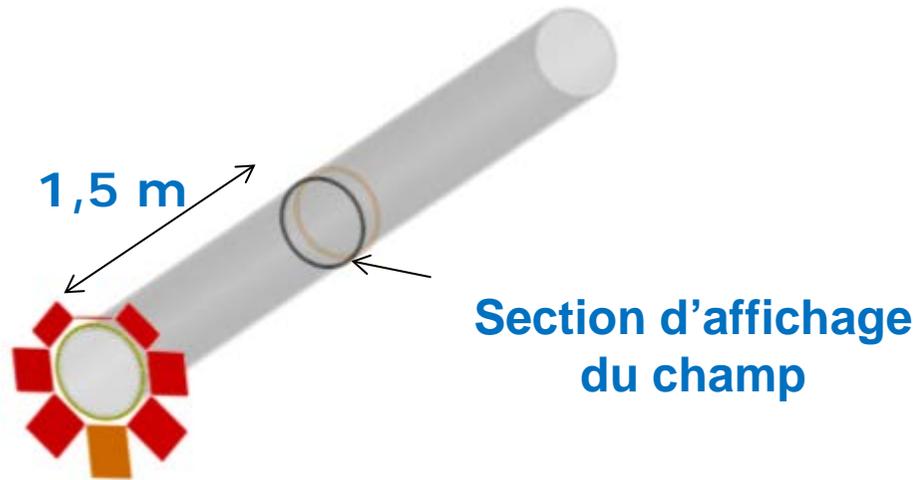
- Définition de la pièce (le guide d'onde)
- Définition d'un transducteur : géométrie, type, signal d'excitation, position
- Positionnement d'un transducteur en réception
- Définition d'un défaut
- Calcul de la réponse sur le récepteur



Pour l'instant le module Ondes Guidées (CIVA 10) ne peut traiter que le cas d'une fissure normale à la surface du guide.

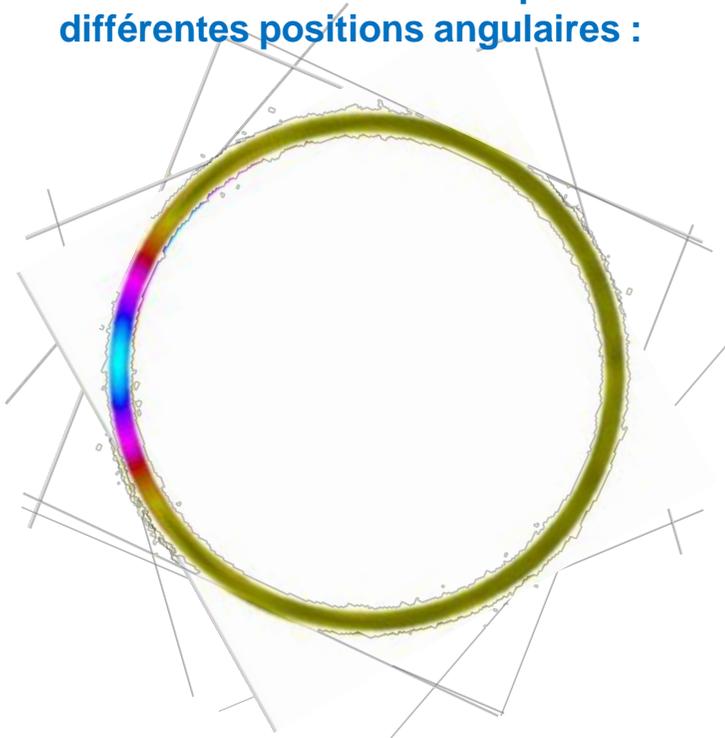


On reprend la configuration précédente : focalisation à 1,5 m



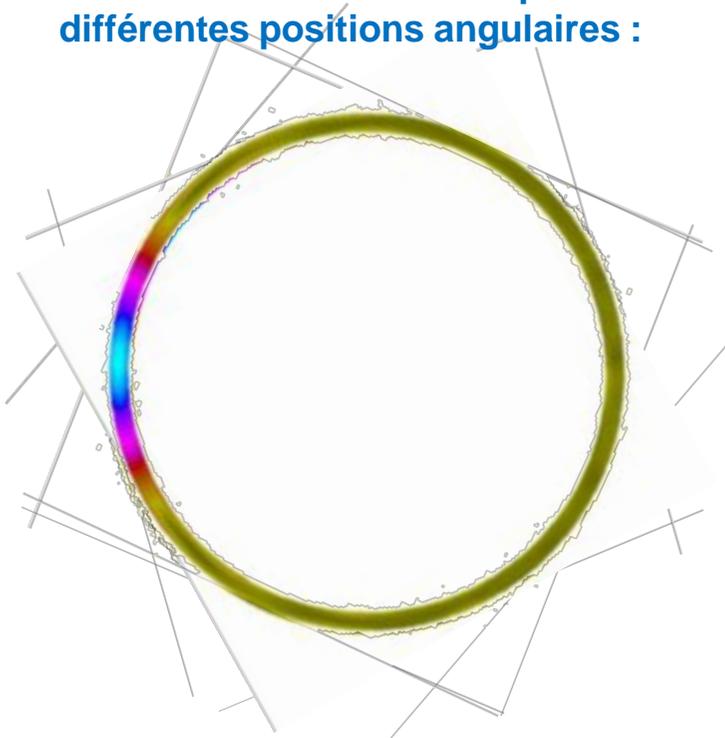
On reprend la configuration précédente : focalisation à 1,5 m

En jouant sur les lois de retard on peut focaliser à différentes positions angulaires :



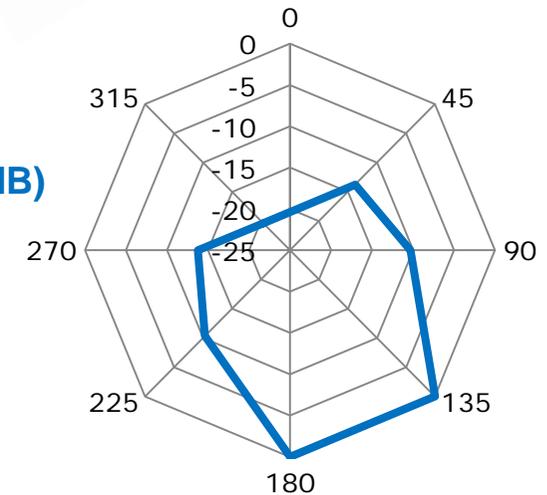
On reprend la configuration précédente où on focalisait à 1,5 m :

En jouant sur les lois de retard on peut focaliser à différentes positions angulaires :



Un défaut non axisymétrique (ici une entaille) répond différemment suivant les lois appliquées :

Amplitude de la réponse mesurée (dB)



→ Le focusing est utilisé par les systèmes de contrôle industriels Teletest et Wavemaker pour caractériser les indications

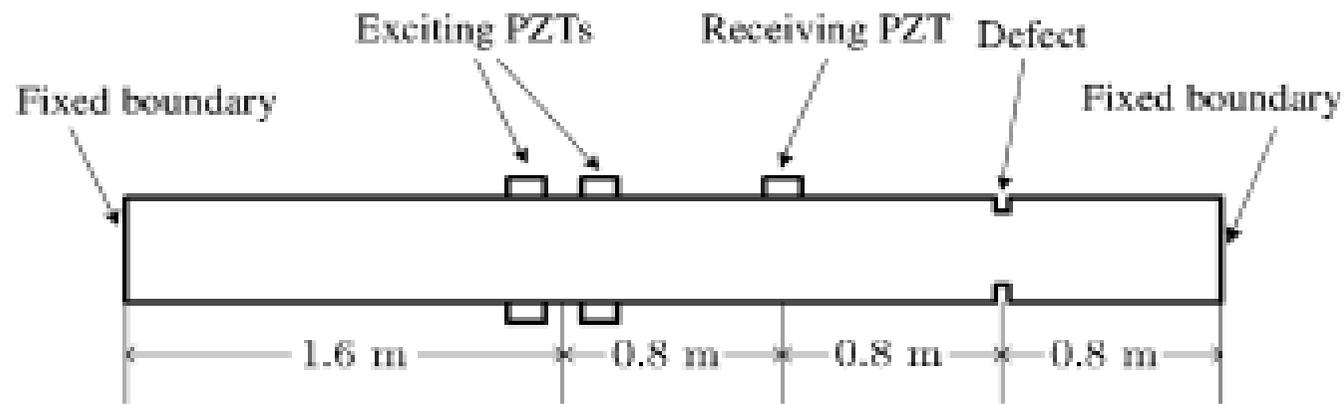
Emission:

- 2 barrettes encerclantes (longueur 20 mm, espacées de 50 mm)
- Excitation axiale (burst de 6 cycles à 100 kHz)

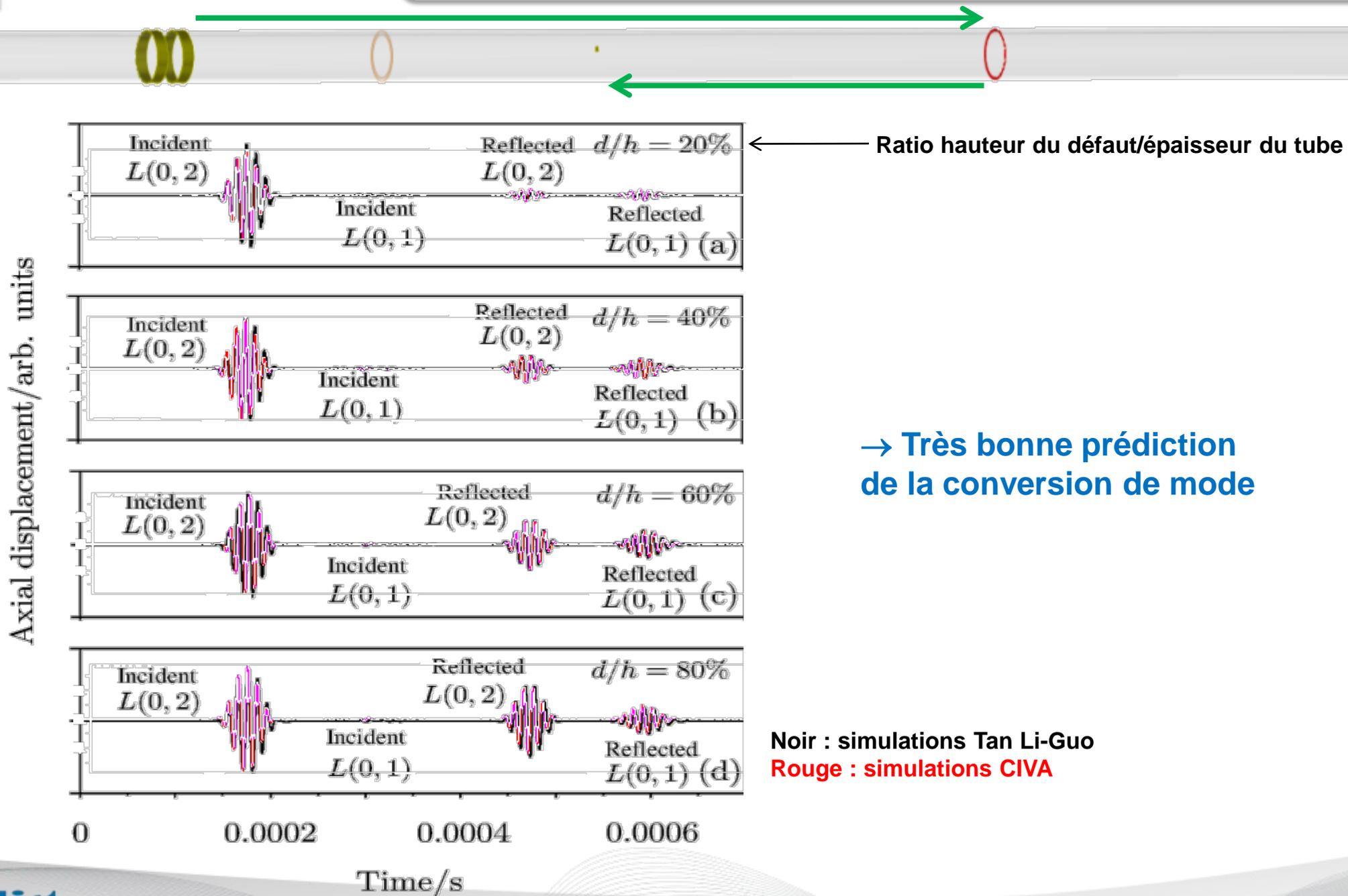
Réception:

- petit PZT

Entaille axisymétrique d'épaisseur variable



Tang Li-Guo, Mechanism of the excitation of single pure mode $L(0,2)$ and its interaction with the defect in a hollow cylinder, *Chinese Physics*, 2007





PLAN

Introduction

- CIVA
- Les modes guidés

Les 3 modules de la version Ondes Guidées de CIVA

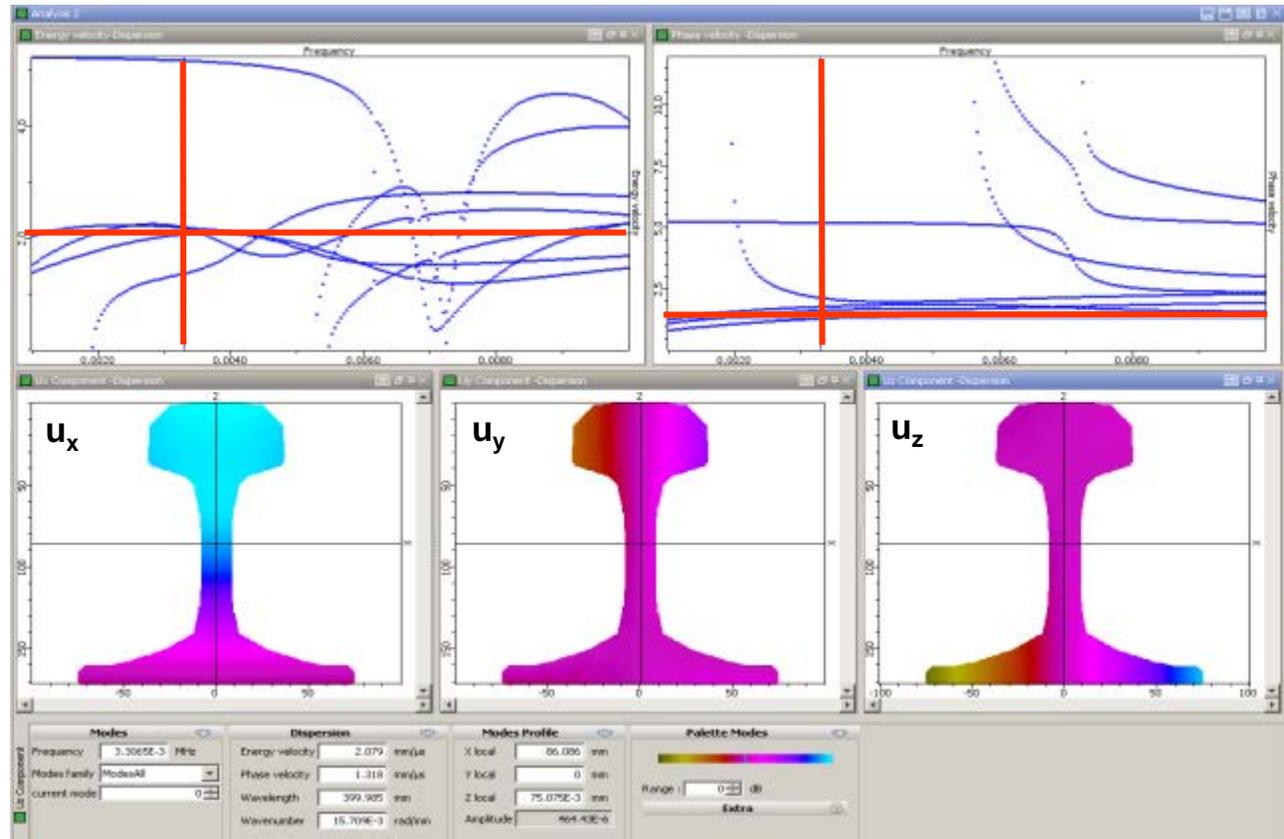
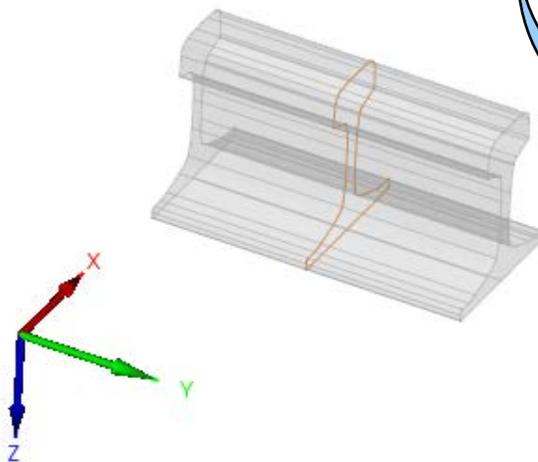
- Calcul de mode
- Calcul de champ
- Réponse à une inspection

Intégration en cours

- Guide CAO2D
- Défauts quelconques
- EMAT
- Guide anisotrope

Exemple de calcul de modes dans un rail

Largeur : 152 mm
 Hauteur : 172 mm
 Matériau : acier

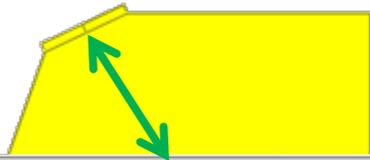


Mode de cisaillement de la tête du rail

Ce type de mode peut se propager jusqu'à 1 km de distance dans de bonnes conditions

Couplage avec une méthode éléments finis pour traiter le cas d'une interaction avec un défaut quelconque

2D



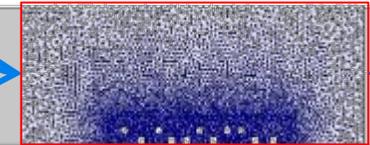
Génération, propagation et détection semi-analytiques



Diffraction

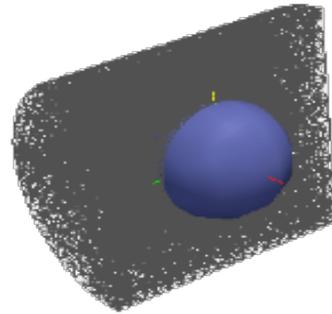
Frontières transparentes

Boite éléments finis

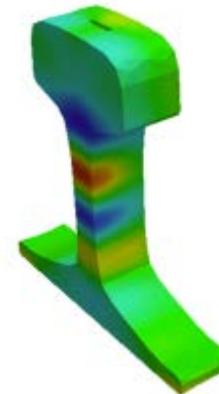


Piqûre de corrosion

3D



Inclusion dans une barre cylindrique



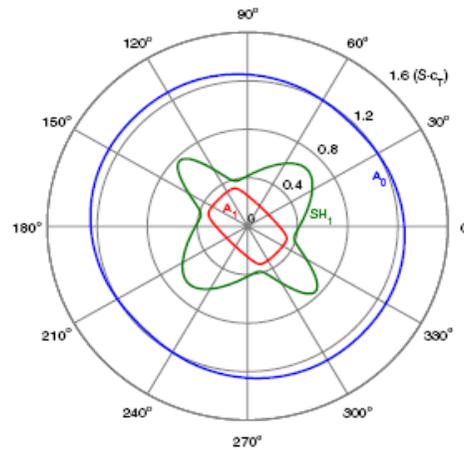
Fissure dans la tête d'un rail

Basée sur un couplage méthode analytique / éléments finis, cette formulation développée par V. Baronian dans le cadre de sa thèse ENSTA / CEA est très performante.

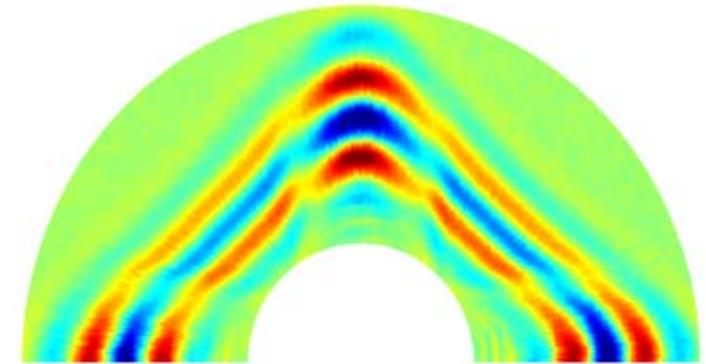
L'aspect éléments finis est transparent pour l'utilisateur.

Baronian et al., *J. Comp. Appl. Math.*, 2010

- Matériaux composites

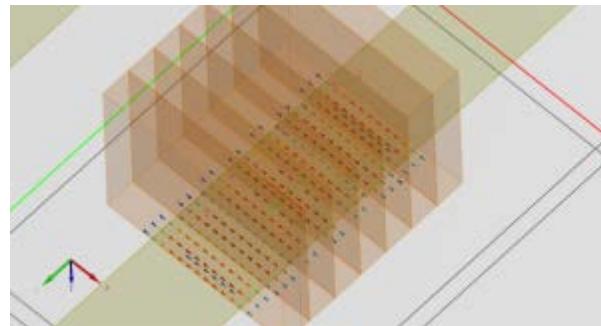


Courbes des lenteurs dans une plaque composite



Visualisation expérimentale de l'influence de l'anisotropie sur la propagation des ondes guidées
Thèse Chapuis, 2010

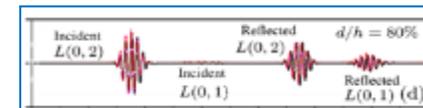
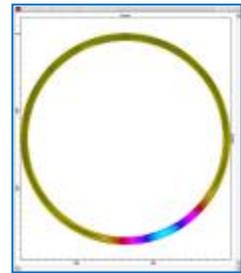
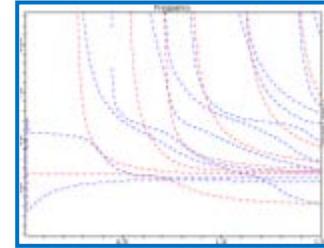
- Génération par EMAT (couplage avec le module ET)

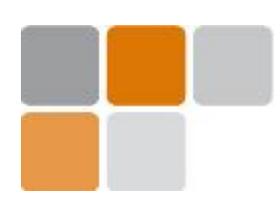


Génération du mode SH_0 avec un EMAT

TROIS MODULES

- Calcul de modes
 - Affichage des courbes de dispersion (vitesse de phase / de groupe & atténuation)
 - Affichage des profils de déplacements / contraintes des modes dans la section du guide
 - Informations sur les modes susceptibles de se propager dans le guide
- Calcul de champ
 - Visualisation des champs de déplacement / contraintes émis par le traducteur
 - Affichage des courbes de dispersion dans la bande passante du traducteur
 - Affichage de l'amplitude modale émise par le traducteur
 - Applications : sélection de mode, design de traducteur
- Réponse défaut (limitée à une fissure normale à la surface du guide)
 - Affichage du Ascan
 - Affichage des courbes de dispersion dans la bande passante du traducteur
 - Affichage de l'amplitude modale émise / détectée par le traducteur et diffractée par le défaut
 - Réponse d'une fissure à un ou plusieurs modes incidents





Merci de votre attention !

