

JOURNÉE TECHNIQUE
Les CND des matériaux composites
5 JUILLET 2012
INSTITUT DE SOUDURE
ZI Paris Nord 2 - VILLEPINTE (93)
Organisée par le service Membres Industriels

Contribution de la simulation numérique à l'inspection UT des pièces composites

F. Foucher ⁽¹⁾, **S. Lonné** ⁽¹⁾, **S. Mahaut** ⁽²⁾, **N. Leymarie** ⁽²⁾, **N. Dominguez** ^(2, 3)

(1) EXTENDE (Massy), (2) CEA-LIST (Saclay), (3) EADS IW (Toulouse)

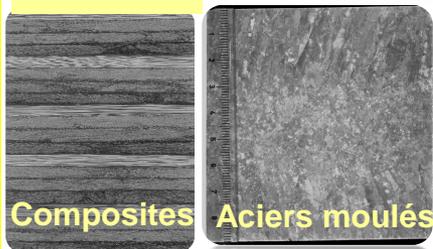
Plan

- | Contexte: Bénéfices de la simulation des END
- | Simulation END: Le logiciel CIVA
- | Simulation ultrasonore des structures composites
 - Outils existants dans CIVA 10
 - Extension des capacités dans les futures versions
- | Conclusion

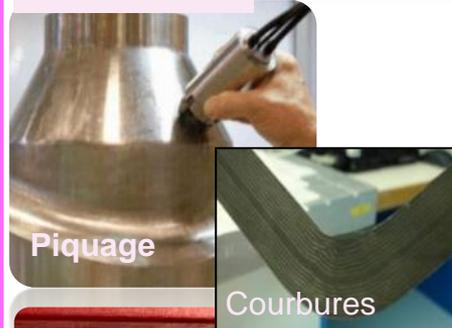
Bénéfices de la simulation des CND

- | **Aide à la conception de méthodes et de sondes:** Gain de temps et réduction des coûts (moins de prototypes, moins de maquettes, sécurise les choix, etc.)
 - | **Expertise:** Aide au diagnostic dans les situations complexes (Comparaison acquisitions et simulations)
 - | **Support aux dossiers de qualification**
 - | **Support technique lors de remise d'offres:** "Convaincre en montrant"
 - | **Formation:** Meilleure compréhension des phénomènes physiques
- | **Dans un large panel de situations:**

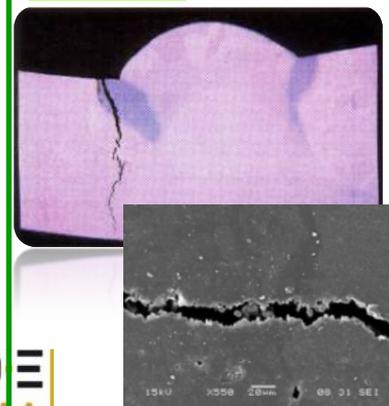
Matériaux



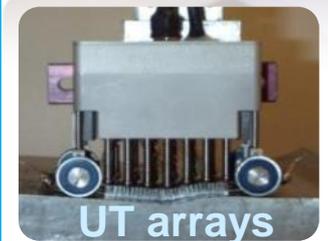
Géométries



Défauts



Sondes



Simulation END: Le logiciel CIVA

- | Outil dédié à la modélisation des END
- | S'appuie sur des modèles semi-analytiques (c.à.d simplifiés mais rapides et précis dans leur domaine d'application)
- | Multitechniques:
 - UT: Ultrasons (Conventionnel Pulse-Echo, PA, TOFD, Tandem)
 - GWT: Ondes Guidées
 - RT, CT: Radiographie et Tomographie (Rayons X Rays ou Gamma)
 - ET: Courant de Foucault
 - Outils d'analyse (traitement de signal, reconstruction de données,...)
- | Développé par le CEA LIST
 - Département de recherche END : 100 personnes
 - Développement et validation de CIVA: 25 personnes



energie atomique • energies alternatives

EXTENDE

| **Distribution CIVA**



| **Support technique**

| **Formation**



| **Consulting**



| **Recherche & Développement (3 ANR, 1FP7)**

EXTENDE

EXTENDE
CIVA

Méthode

Simulation

Innovation

Besoins industriels

Contraintes économiques
et environnementales



100 personnes

Modèles

Logiciel

Méthodes

Sondes

Réseau



M 2 M

EXTENDE
CIVA



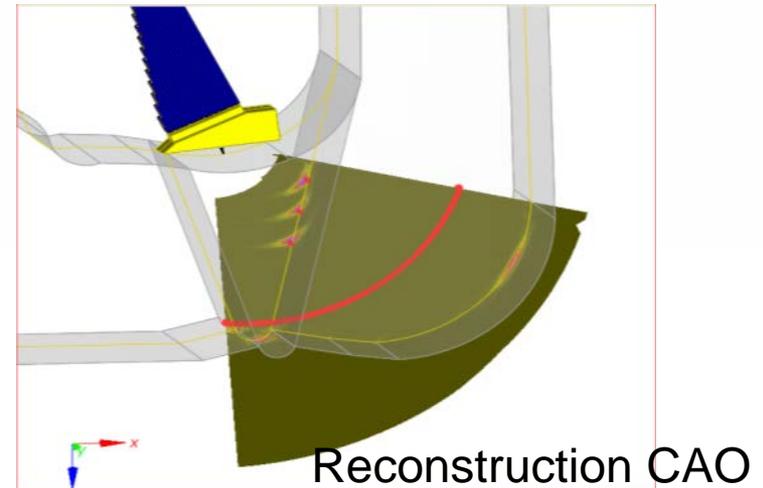
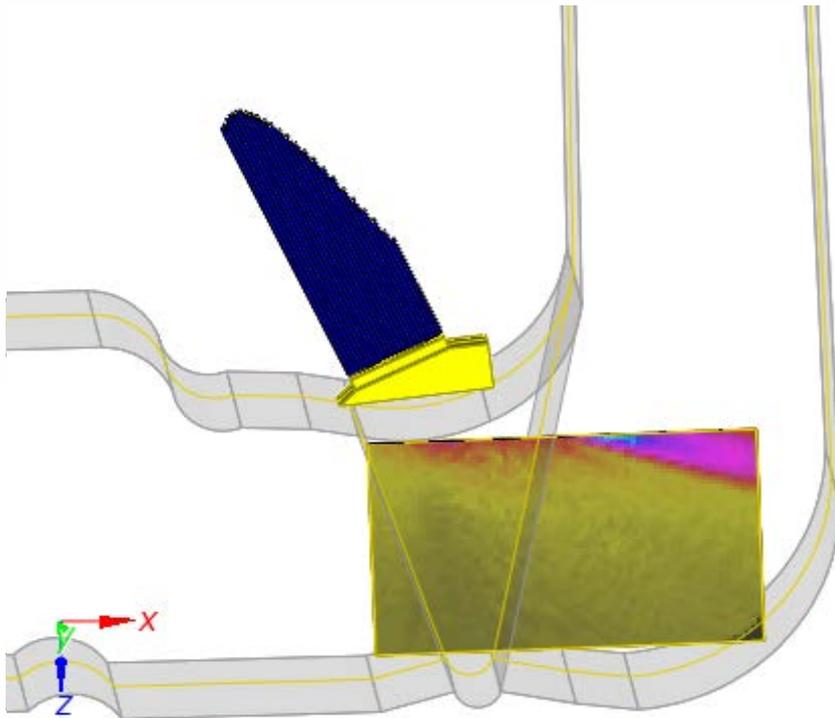
CIVA UT

| Calcul de champ:

- Design de capteur
- Couverture de zone

| Interaction faisceau/défauts: (Ascan, Bscan, Cscan, S-Scan, etc.)

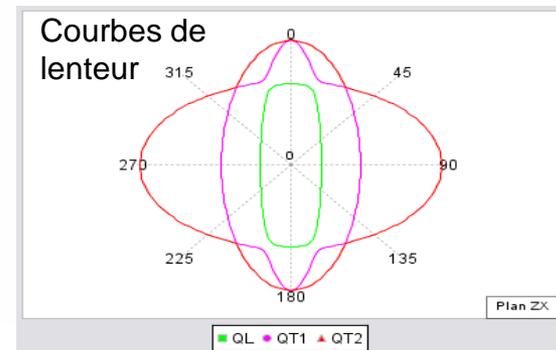
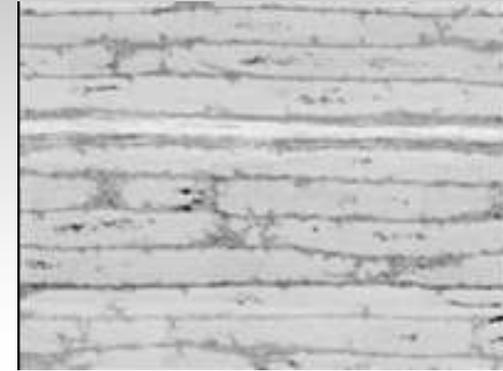
- Prédit les performances d'un contrôle



Simulation UT des composites

Matériaux composites :

- Hétérogènes et multi-échelles:
 - Fibres de carbone: $\Phi \sim 7 \mu\text{m}$
 - Plis: de 125 à 250 μm
- Anisotrope:
Vitesse typiques pour ondes Quasi-Longitudinales:
 - $\sim 3000 \text{ m/s}$ perpendiculairement au plan des fibres
 - $\sim 9000 \text{ m/s}$ suivant la direction des fibres



Approches de modélisation:

Différentes stratégies peuvent être employées:

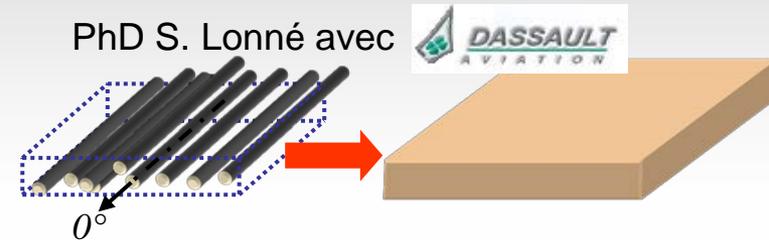
- Semi-analytique avec matériaux homogénéisés
- Approches purement numériques (e.g. Elements Finis, Différences Finies)
- Combinaison des 2 approches

Outils existants dans CIVA10

Dans CIVA 10 (*version courante*): Approche par homogénéisation et calculs semi-analytiques:

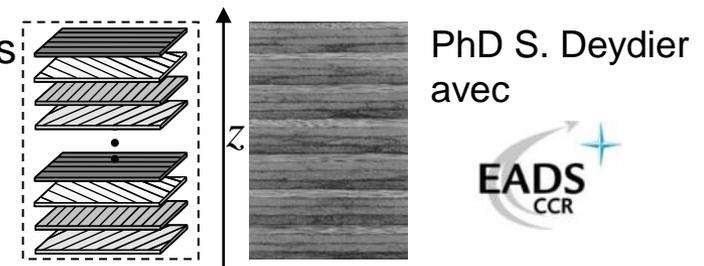
- Etape 1: Homogénéisation d'un pli

- Entrées: matrice (résine)+ description de la fibre
- Sorties : Matériau anisotrope homogène « équivalent », prise en compte de la diffusion par les fibres et des pertes viscoélastiques (atténuation)



- Etape 2: Homogénéisation de l'ensemble multi-couches

- Entrées : Plis unitaires homogénéisés+ description des couches
- Sorties: matériaux anisotropes équivalents



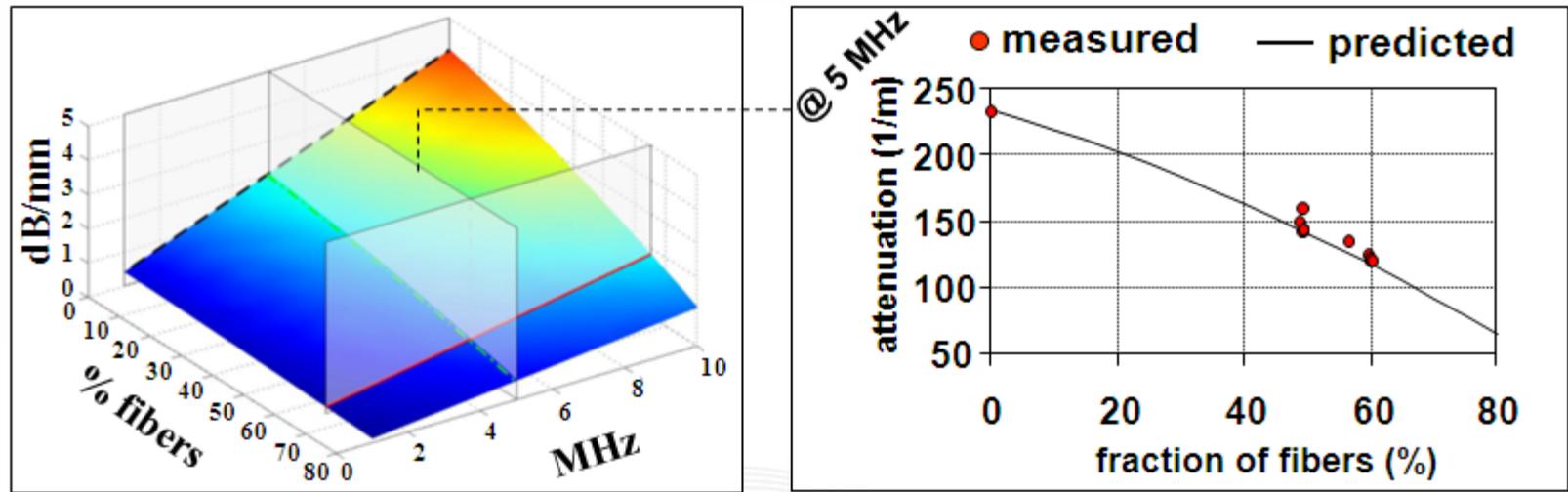
Avantages / Inconvénients:

- Définition simple des composites en partant des matériaux constituants
- Connection aux codes de calculs de champ et de réponse défaut existants dans CIVA
- Valide pour composites réguliers et périodiques (pas d'ondulations de plis, etc.)
- Restreint aux composites « quasi » plans, pas aux profils « courbes »
- Pas de bruit de structure (car bruit due à l'hétérogénéité)
- Adapté aux ondes de volume mais pas aux ondes guidées (le guide d'onde ne peut être considéré comme homogène)

Outils existants dans CIVA10

Composite « simple pli », résultat et validation:
(PhD S. Lonné (2003), Dassault)

- Atténuation des ondes L (comportement similaire pour ondes SV et SH):
Dépend linéairement de la fréquence Décroit avec % de fibres



Outils existants dans CIVA10

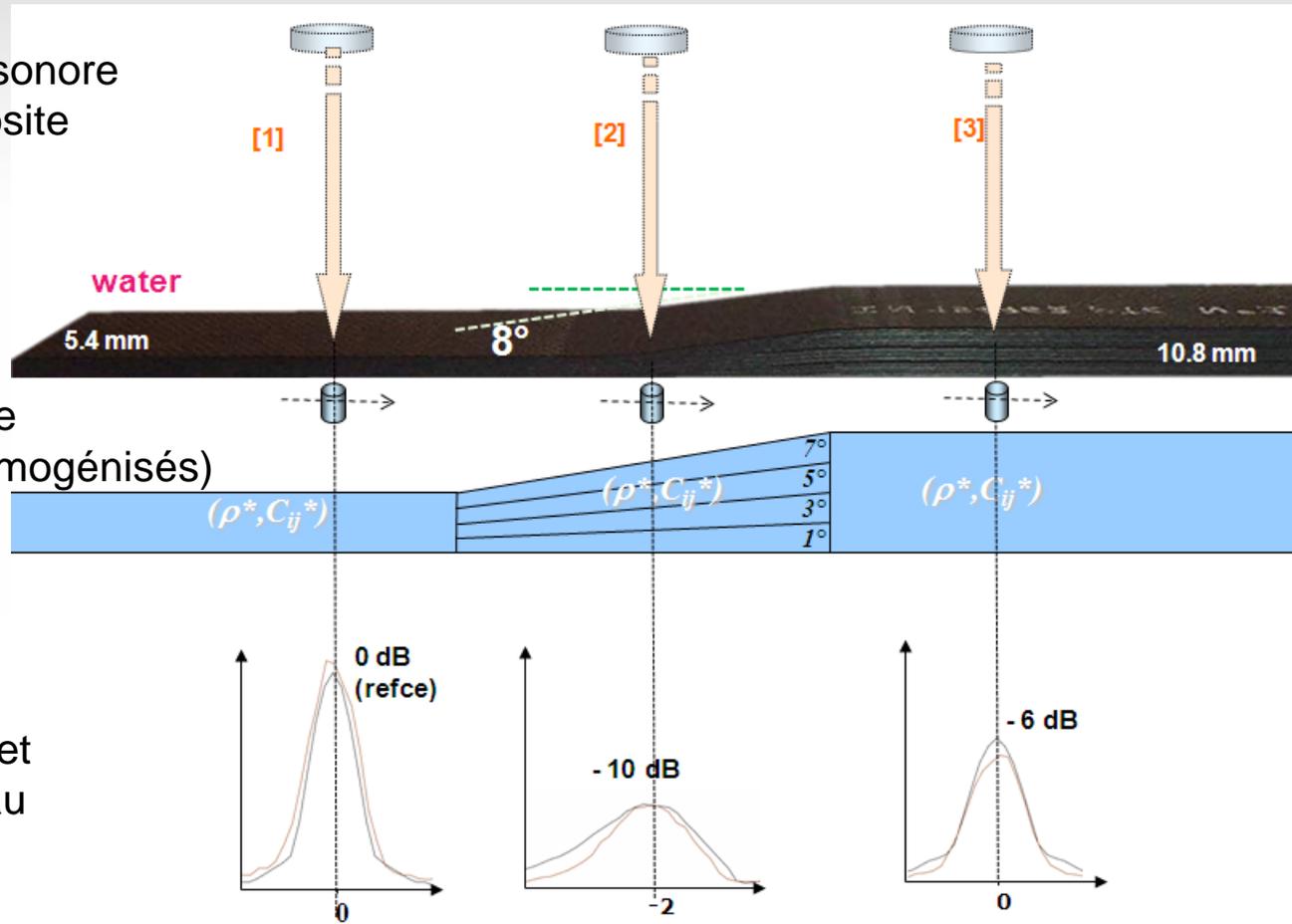
Composite multi-couche, résultat et validation:

(S. Deydier (2006), EADS)

- Mesure du champ ultrasonore transmis dans le composite

- Simulation du composite (plusieurs domaines homogénéisés)

- Bonne corrélation Simulation/Mesure en termes de déviation et d'atténuation de faisceau

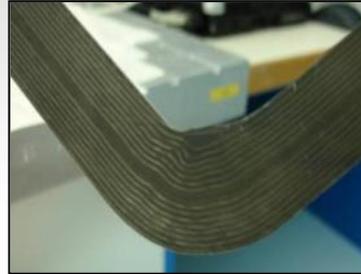


Inspection des composites: Problématiques industrielles

Structures et géométries complexes :



Variations d'épaisseurs

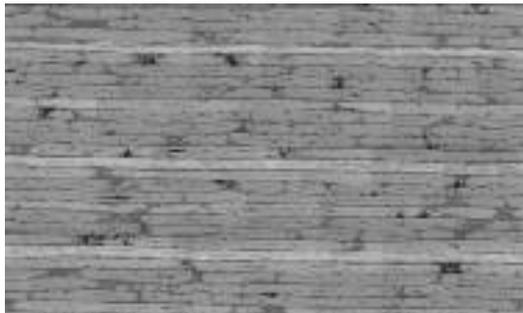


Portions (fortement) courbes

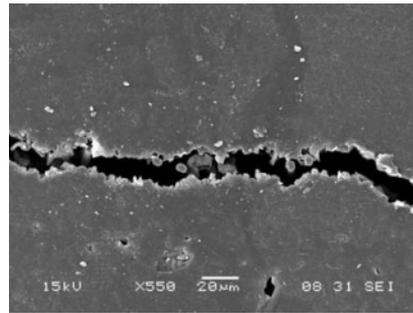


Panneau avec raidisseurs

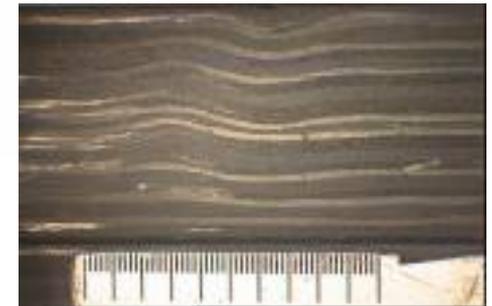
Défauts spécifiques des structures composites



Porosités (en noir)



Délaminages



Ondulations de pli

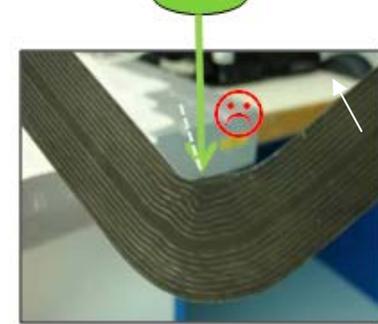
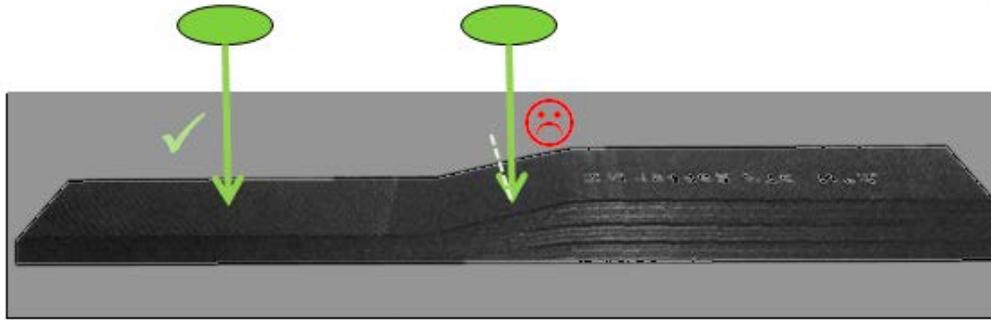
Autres phénomènes complexes (bruit de structure, etc.)

Inspection des composites: Problématiques industrielles

La modélisation doit s'attaquer à ces
problématiques

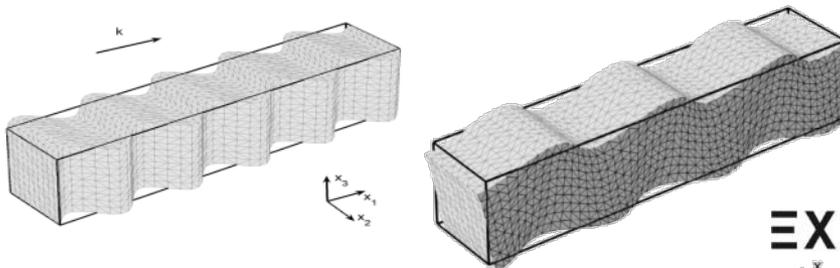
Inspections ondes de volume:

- Techniques classiques: Balayage 2D avec ondes L perpendiculaire à la structure
- Inconvénients: Difficiles de conserver incidence 0° sur géométries complexes et courbes



Inspections ondes guidées:

- Inspection sur de longues distances des structures
- Inconvénients: Signaux complexes à interpréter due à diffusion multiple et nature dispersive des modes générés et diffusés (par la structure ou par des défauts)



EXTENDE
à X₀ | N·D·E
CIVA



Extension des capacités dans les futures versions de CIVA

| Prise en compte de géométrie et défauts complexes, d'ondulations de plis, etc. :

- Les méthodes semi-analytiques passant par une homogénéisation ne peuvent rendre compte de la complexité de la structure
- Approche hybride: Couplage entre modèle semi-analytique (CIVA « conventionnel ») et modèles numériques: « ACEL-NDT » Code aux différences finis de EADS IW (N.Dominguez) 

| Simulation du bruit de structure:

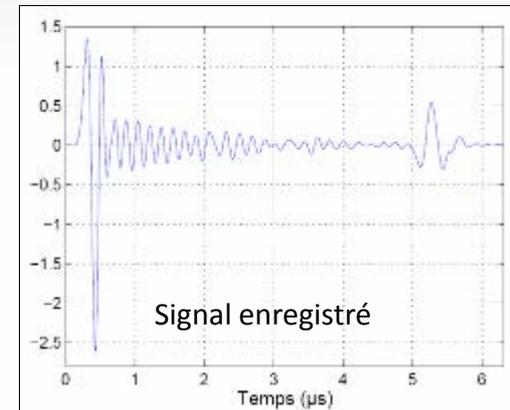
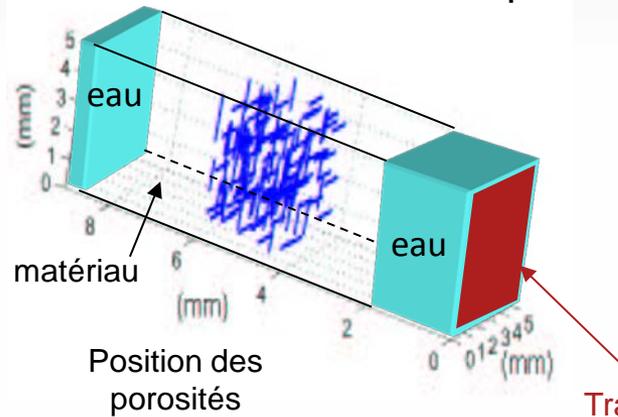
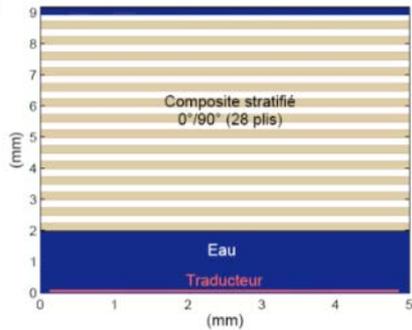
- Développement d'un modèle semi-analytique spécifique

| Extension du module Ondes Guidées aux structures composites
(dans CIVA 10, uniquement des métaux dans le module Ondes Guidées)

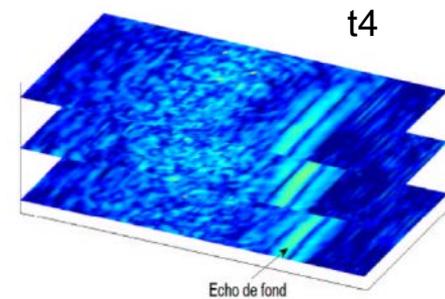
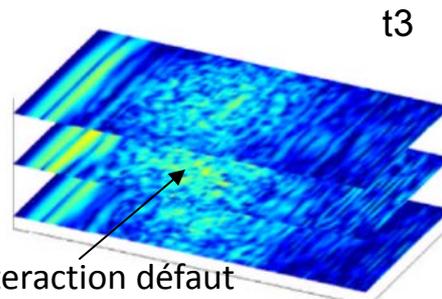
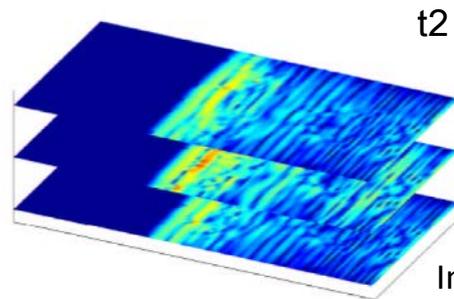
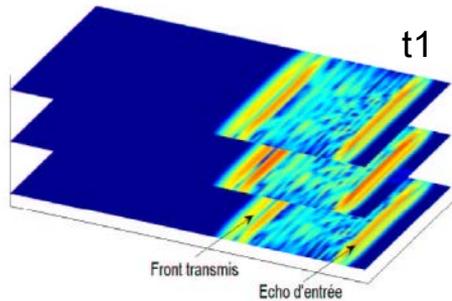
Couplage avec ACEL-NDT

ACEL-NDT

- Modèle numérique: Simulation en régime transitoire par différences finies (FDTD)
- Developpé par EADS Innovation Works (N.Dominguez) **EADS**
- Application de ACEL-NDT à la détection des porosités:



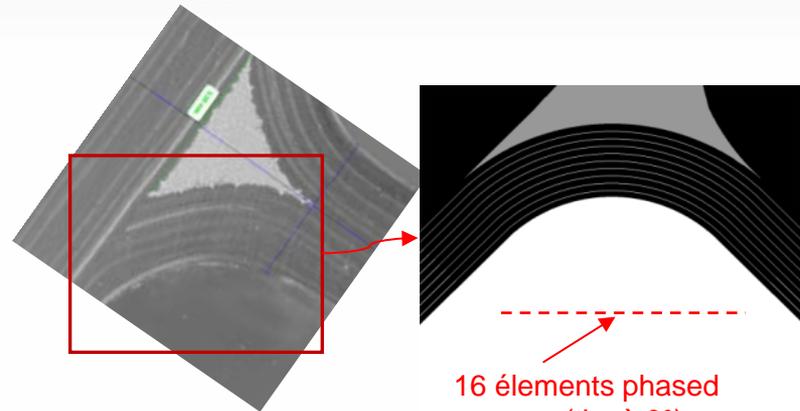
Images de la propagation d'ondes



Couplage avec ACEL-NDT

ACEL-NDT

- Modèle numérique: Simulation en régime transitoire par différences finies (FDTD)
- Developpé par EADS Innovation Works (N.Dominguez) 
- Application de ACEL-NDT aux composites courbes:



16 éléments phased array (tirs à 0°)

Définition de la géométrie
Description à l'échelle du pli

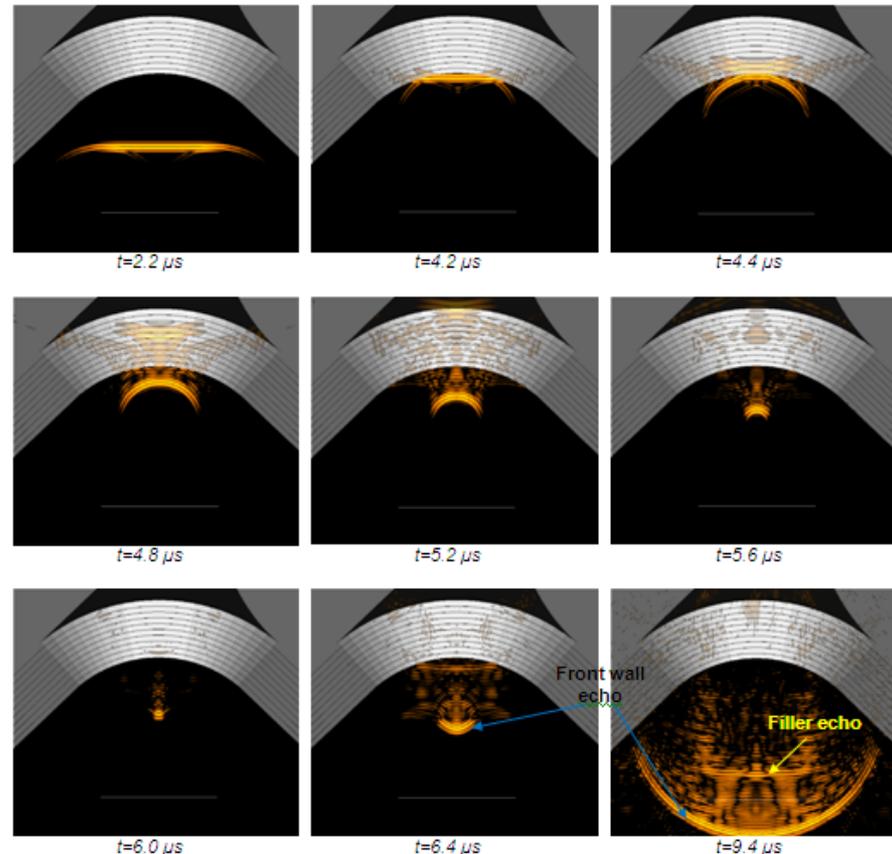


Figure 15 – Snapshots of ultrasonic propagation for the shot at 0° in log scale with 30 dB dynamic range

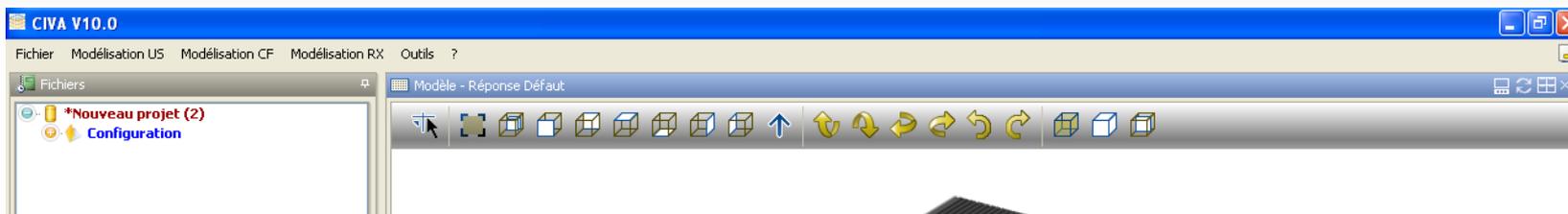
Méthodes numériques:

- Prendent en compte tous les phénomènes
- Mais peut être couteux en temps de calcul

Couplage avec ACEL-NDT

CIVA/ACEL-NDT: Approche hybride et intégration dans la plate-forme CIVA

- Idée: Bénéficier des possibilités de l'approche numérique, de la rapidité de l'approche semi-analytique et de l'interface « métier END » de CIVA (facilité d'utilisation)
- Développement et intégration d'un code hybride: **CIVA/ACEL-NDT**



1. Transmission: Semi-analytique

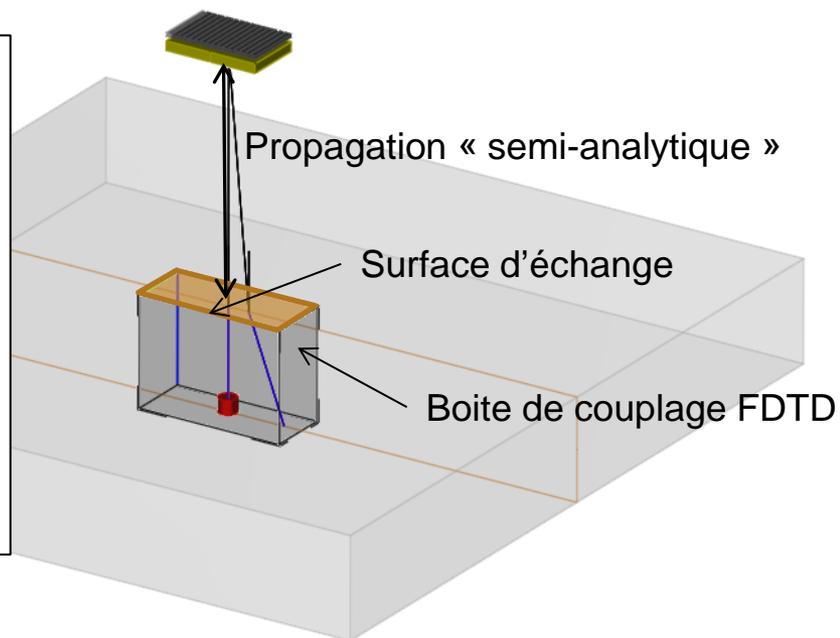
→ Donne le champ à l'entrée de la boîte FDTD (surface d'échange)

2. Propagation par méthode FDTD dans la boîte

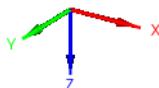
→ Donne le champ réfléchi à la surface d'échange de la boîte FDTD
+ Visu du champ dans la boîte

3. Réception: Méthode semi-analytique (réciprocité sur le trajet aller)

→ Signal reçu par le transducteur



Images :



Pièce

Transducteur

Contrôle

Réglage

Défauts

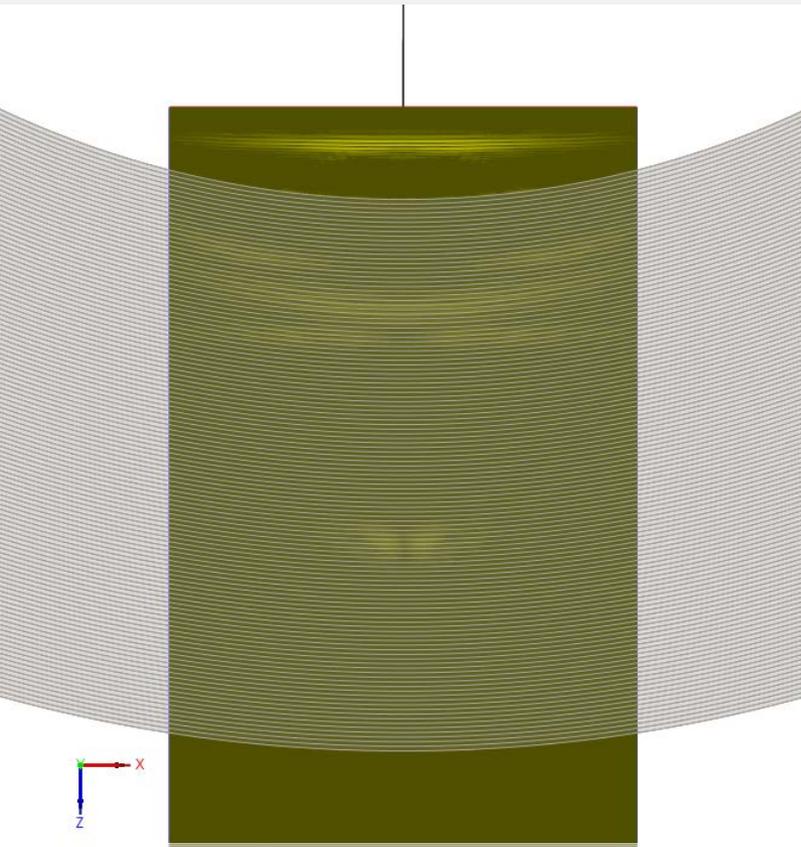
Paramètres de calcul

Calculer

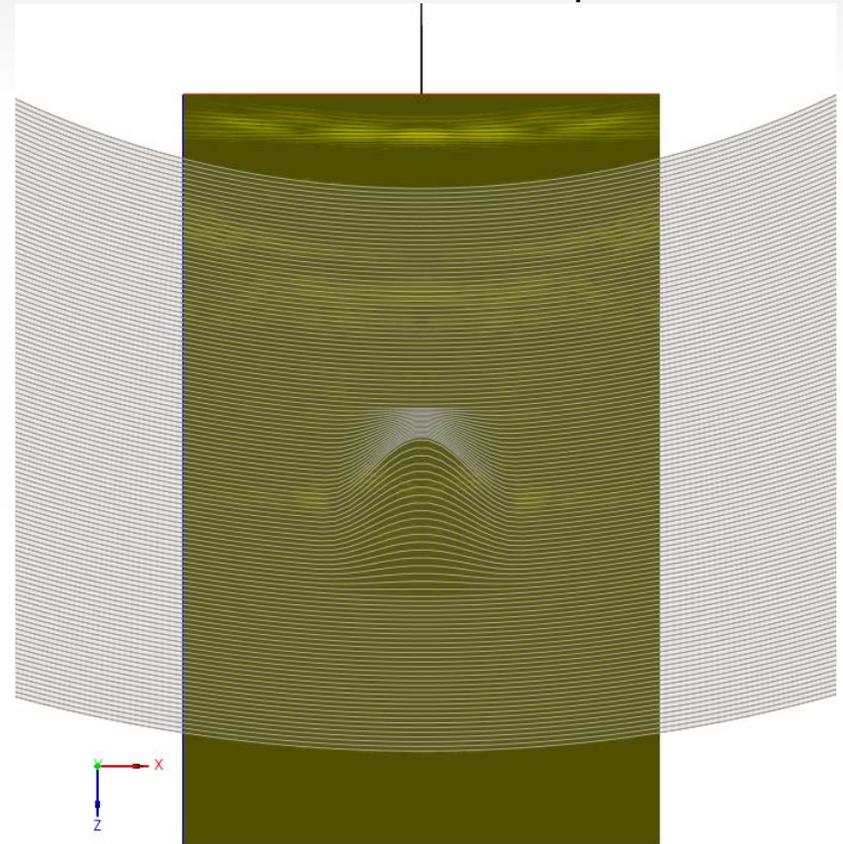
Couplage avec ACEL-NDT

CIVA/ACEL-NDT: Exemple de simulation:

Propagation dans une portion saine



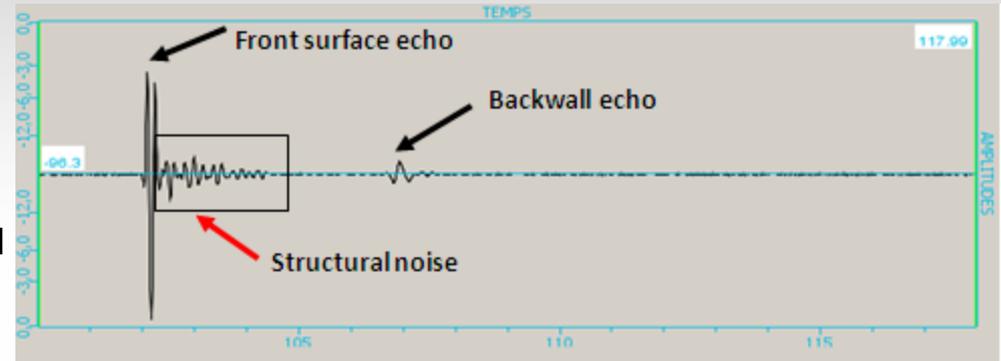
Propagation dans une portion avec ondulation de pli



Modèle de bruit

Expérimentalement, on observe du bruit de structure spécifique aux composites:

- Niveau de bruit dépend de la fréquence
- Peut potentiellement masquer un écho de défaut
- Il interagit également avec l'écho de fond et modifie son spectre



Origine du phénomène: Résonance inter-plis

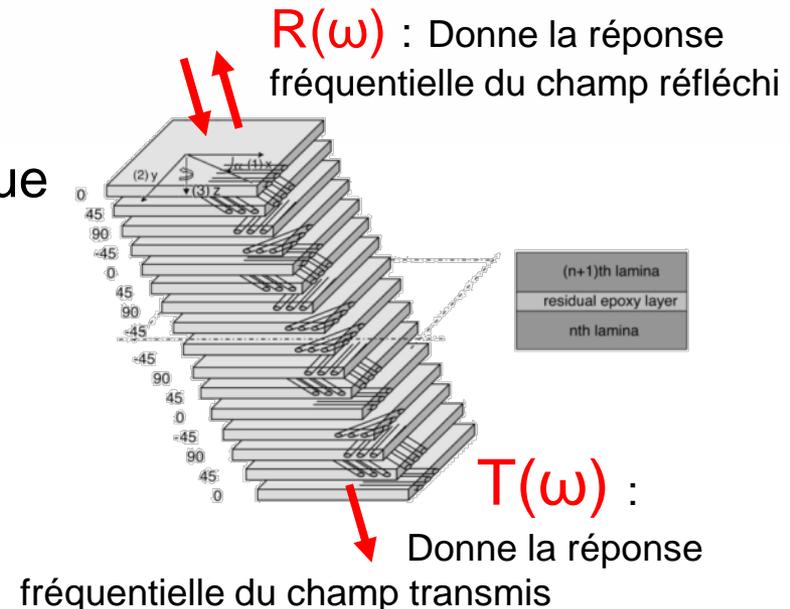
- Actuellement, CIVA ne prend en compte que le faisceau transmis aux interfaces mais pas les réflexions inter-plis

Développement d'un modèle semi-analytique

- Prend en compte les réflexions multiples dans un motif multi-couches périodiques
- Composite plan
- S'applique dans le plan de l'onde incidente

(d'après modèle de Wang & Rokhlin, JASA, 2003)

EXTEND
CIVA



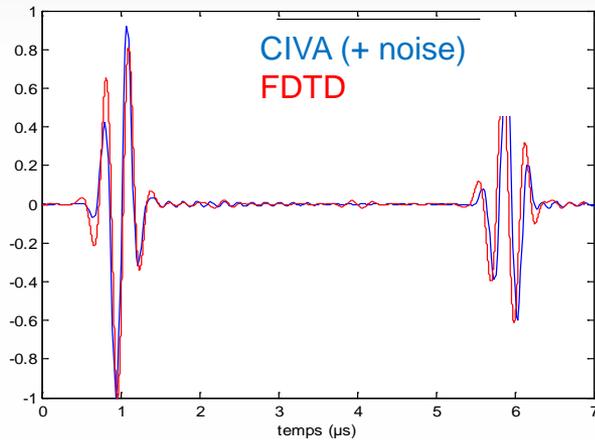
Modèle de bruit

Validation:

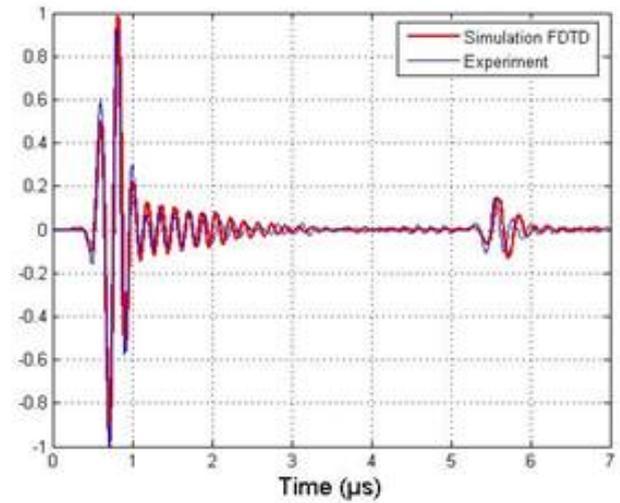
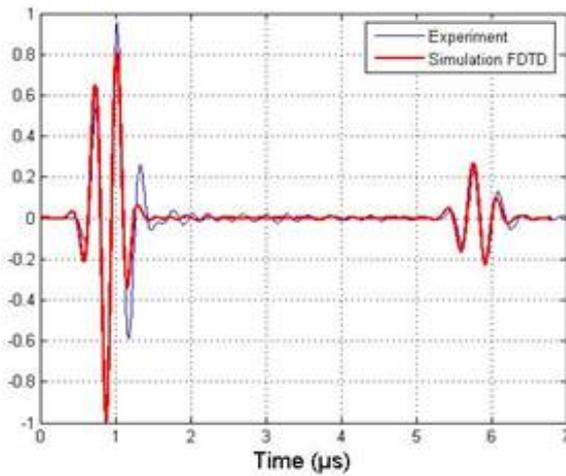
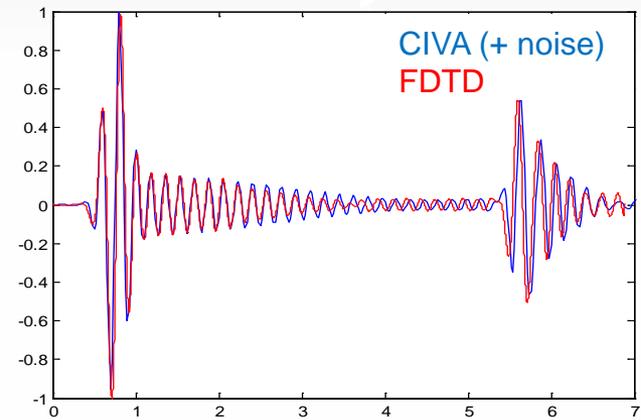
- Modèle CIVA et modèle numérique FDTD (ACEL-NDT)
- FDTD et expérimental



Sonde 3.5 MHz



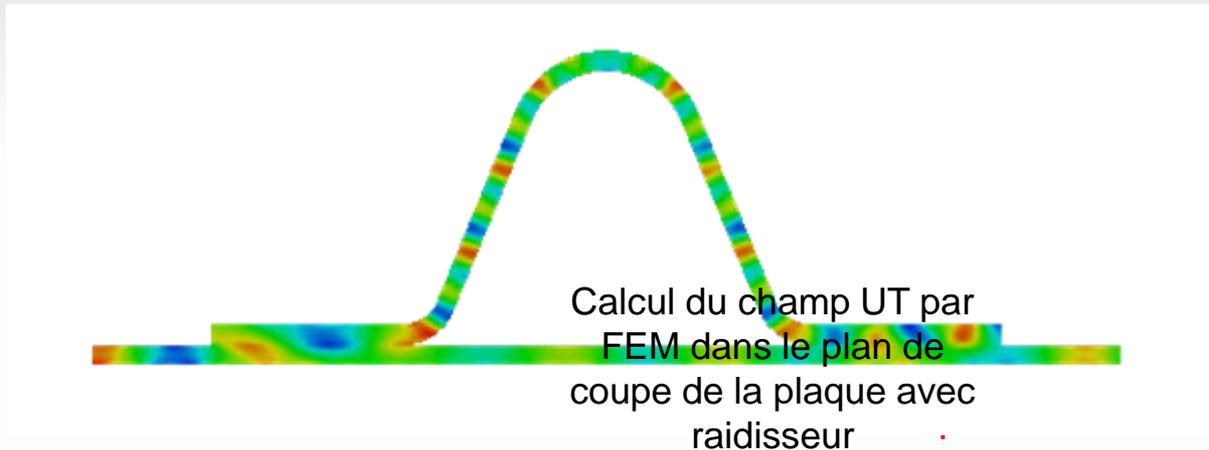
Sonde 5 MHz



Ondes guidées et SHM

Extension de CIVA GW aux structures composites:

- Cas d'application: Evaluation de l'inspection par ondes guidées de grandes structures renforcées



- Avantages: Inspection longue distance sans balayage, possibilité de contrôler la structure avec capteurs embarqués (SHM)
- Inconvénients : Signaux très complexes (modes multiples + Dispersion)
- Besoins de simulation: Prédire les modes qui se propagent et avec quelle énergie
- Extension de la méthode SAFE déjà utilisée dans CIVA 10 (module ondes guidées) à la simulation des composites (SAFE = Semi-analytique selon l'axe de propagation et FEM dans la section du guide d'onde)

Conclusion

| CIVA: La plate-forme de modélisation des END

- Multitechniques: UT, GWT, RT, CT, ET
- Apporte des outils à l'industrie pour une approche plus efficace des END
- Apporte des outils à l'industrie pour mieux comprendre les phénomènes

| CIVA 10 (*version courante*) pour les composites:

- Modèles existants: Homogénéisation des structures multicouches pour permettre des calculs purement semi-analytiques avec les ondes de volumes: Rapide mais présente des limitations
- Le contrôle industriel des composites est confronté à des géométries et phénomènes souvent plus complexes que ceux actuellement pris en compte

| Extension des capacités de CIVA : (*disponible au 2^{ème} semestre 2013*)

- CIVA/ACEL-NDT: Approche hybride pour prendre en compte des géométries plus complexes et des défauts typiques des composites (ondulations de pli, etc.)
- Développement d'un modèle semi-analytique de bruit de composite (résonance inter-plis)
- Extension du module « Ondes Guidées » de CIVA aux composites