

Journées COFREND 2026 :



Apport des nouveaux modèles Éléments Finis pour la simulation des ultrasons

Fabrice FOUCHER ¹, Jérôme DUDOUS ¹,
Nicolas LEYMARIE ², Edouard DEMALDENT ², Stéphane LE BERRE ²
et Ed. GINZEL ³

¹ EXTENDE, France

² CEA-List, France

³ University of Waterloo, Canada



Sommaire

- | Stratégies de modélisation UT
- | Validation expérimentale
 - Propagation ultrasonore
 - Réponse défaut
 - Effet d'ombrage
- | Conclusion : cas d'application et perspectives

Sommaire

- | **Stratégies de modélisation UT**
- | Validation expérimentale
 - Propagation ultrasonore
 - Réponse défaut
 - Effet d'ombrage
- | Conclusion : cas d'application et perspectives

Stratégies de modélisation UT

| Etude s'appuyant sur les modèles disponibles dans la plateforme CIVA :

- Plateforme **dédiée** à la modélisation et l'analyse de techniques CND
- Développé par le **CEA LIST** et distribué par **EXTENDE**
- **Simulation** multi-techniques :



UT : Ultrason (Simulation & Analyse)



RT-CT : Radiographie (Gamma and RX) & Tomographie



ET : Courant de Foucault



GWT : Onde Guidé



SHM-GWT : Structural Health Monitoring par Onde Guidé



TT : Thermographie



CIVA
N·D·E 2025

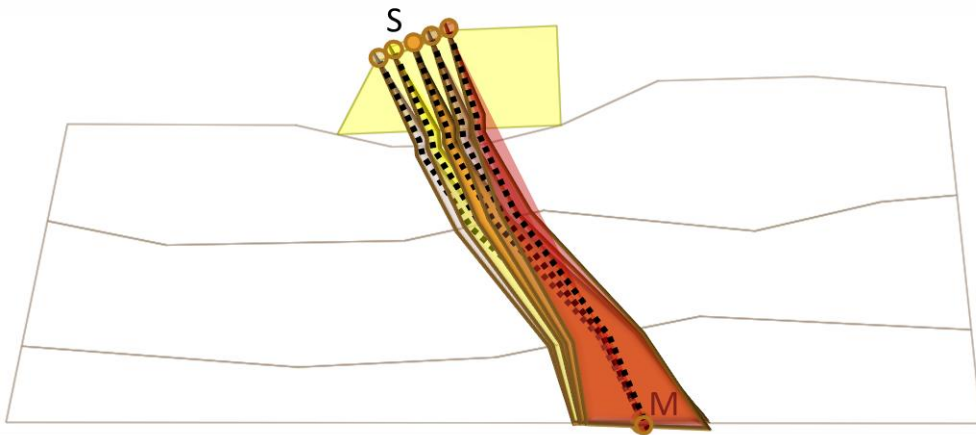
| Pour chaque technique, différentes approches de modélisation sont disponibles, c'est notamment le cas pour les UT dans la version CIVA 2025.

Stratégies de modélisation UT

I Trois principales stratégies de modélisation : Modèles Semi-Analytiques (SA)

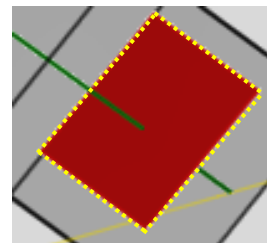
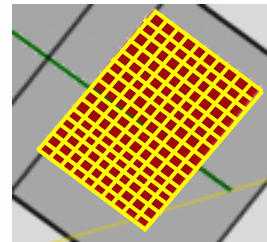
- Propagation du champ UT modélisée via des modèles SA (*'Méthode des pinceaux'*)
- Interaction entre le champ et les défauts / géométrie calculée avec des modèles dédiés :
 - Kirchhoff>D, Kirchhoff, SOV, Born...

Calcul de la propagation du champ UT



→ Discrétisation en point de source sur la surface du cristal et en points d'observation sur la surface et le bord du défaut

Calcul des interactions avec le défaut



- Approche **modale** permettant une analyse et compréhension détaillées de chaque mode
- Simulations '**très rapides**' comparées à une approche totalement numérique
- De nombreux cas industriels couverts efficacement



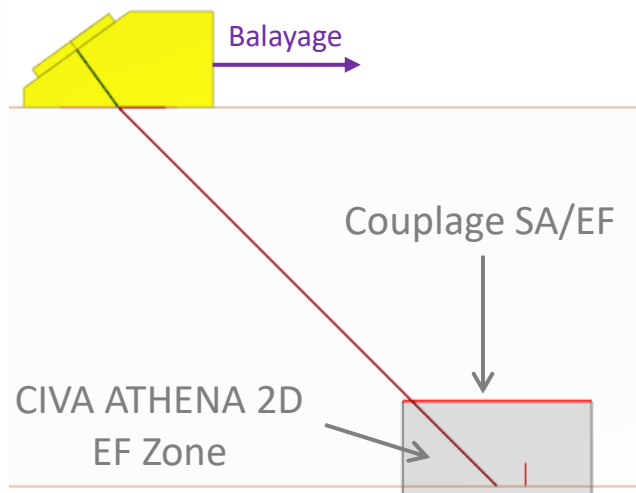
- Modélisation principalement des ondes volumiques → pas d'ondes de surface ni de diffusion multiple...
- Domaines de validité (hauteur défaut vs λ ...)

Stratégies de modélisation UT

I Trois principales stratégies de modélisation : Modèles Hybrides

- Propagation du champ UT modélisée via des modèles SA (*'Méthode des pinceaux'*)
- Interaction champ et défauts / géométrie calculée localement par Eléments Finis (EF)

CIVA ATHENA 2D*

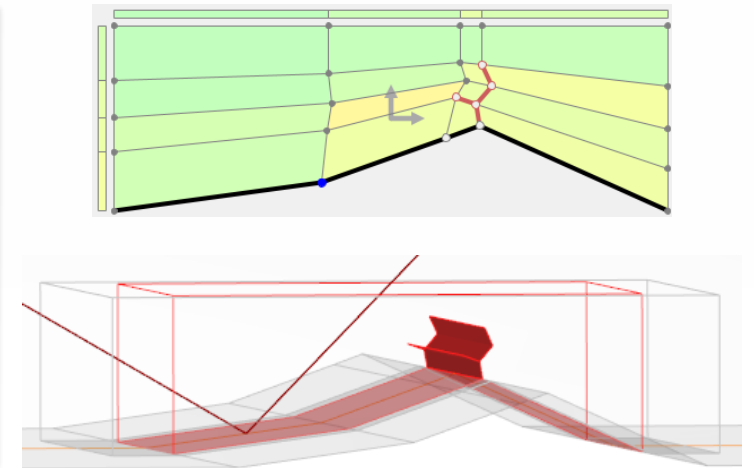


- Temps de calcul 'intermédiaire'
- Plus précis pour les petits défauts (vs λ), les phénomènes physiques complexes et les interactions entre défauts



- Moins adapté pour la modélisation de 'grandes' scènes et des propagations dans des milieux complexes
- Itérations pour définir les zones EF
- Calculs 2D uniquement avec ATHENA

Zone d'interaction EF / FE Grid



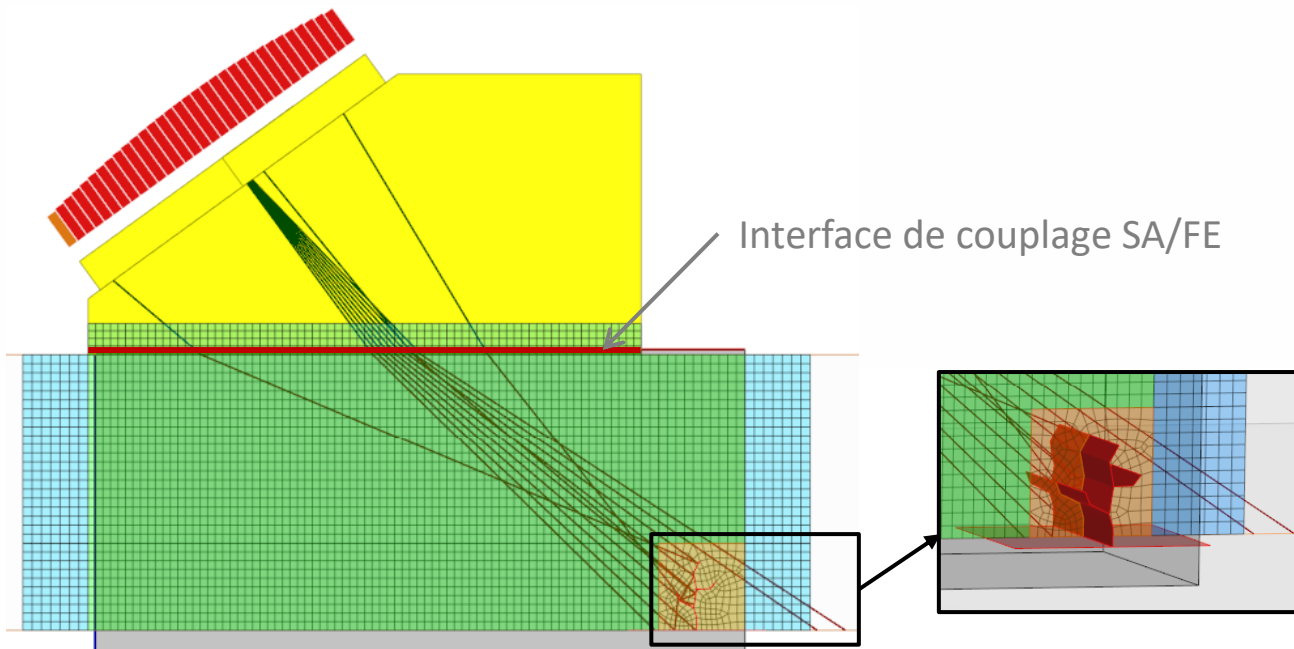
→ Calcul EF de la propagation du faisceau et des interactions à partir de la zone de couplage SA/EF

→ Calcul SA de la propagation du faisceau incident sur le défaut / géométrie (dans la zone FEGrid) puis calcul EF local des interactions

Stratégies de modélisation UT

I Trois principales stratégies de modélisation : 'Full component FEM' (**FFEM**)

- Propagation du champ UT modélisé en SA jusqu'à la surface de la pièce uniquement
- Dans la pièce, tout est calculé via une approche EF



- Approche FEM appliquée à l'ensemble de la pièce, permettant de simuler tous les types d'ondes physiques et leurs interactions avec le matériau, la géométrie et les défauts
- Visualisation de la propagation ultrasonore et de la perturbation liées aux défauts

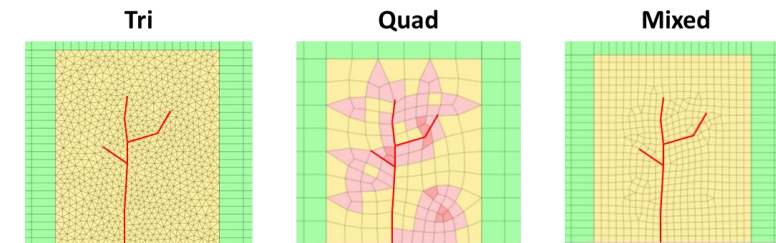
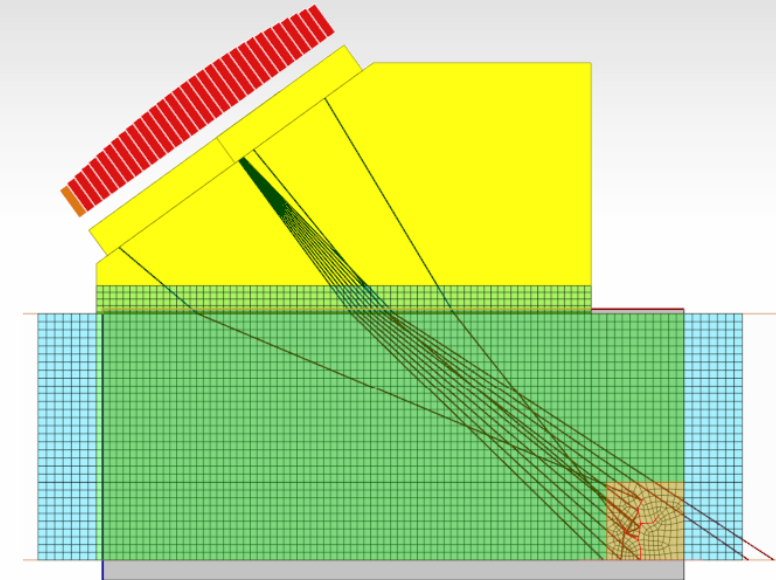


- Temps de calcul
- Optimisation des modèles plus longue et poussée pour limiter les temps de calcul

Stratégies de modélisation UT

FFEM implémentation dans CIVA :

- Stratégie automatique de décomposition en domaine :
 - Couche absorbante ou zone d'émission
 - Maillage structuré (quad)
 - Maillage non structuré (tri, quad, mixte)
- Taille des éléments automatiquement adaptée dans chaque domaine vs $\lambda_{\min}$ pour garantir la précision
- Outils d'assistance au paramétrage et optimisation des modèles :
 - Porte temporelle de simulation
 - Taille de la région d'intérêt
 - Qualité du maillage :
 - Éléments de **bonne** qualité
 - Éléments **modérément**, **fortement** et **sévèrement** dégradés



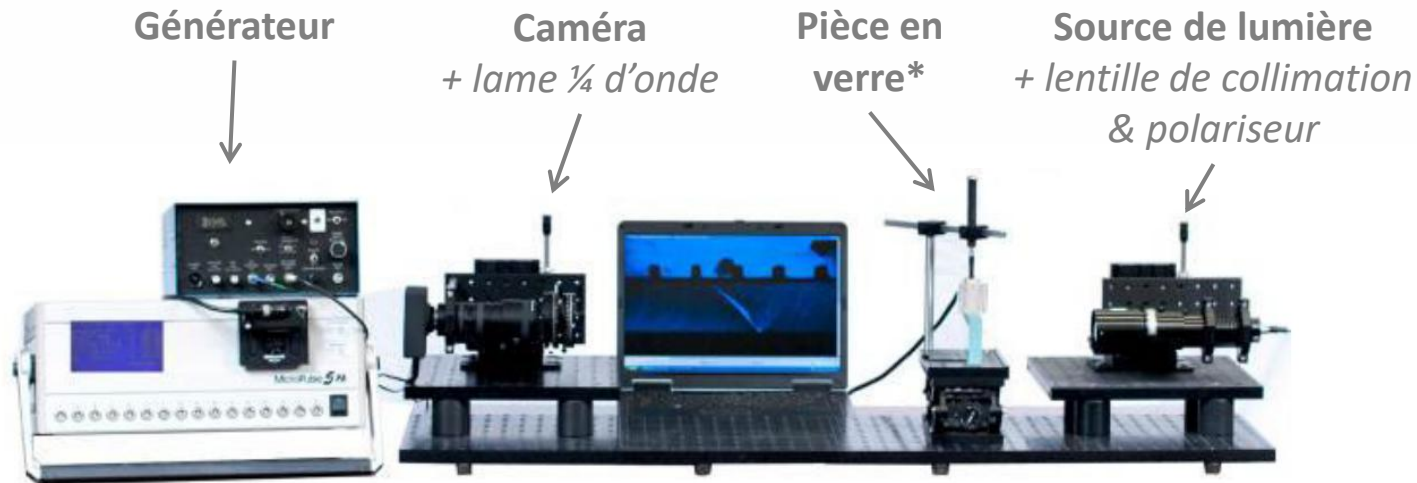
Sommaire

- | Stratégies de modélisation UT
- | **Validation expérimentale**
 - Propagation ultrasonore
 - Réponse défaut
 - Effet d'ombrage
- | Conclusion : cas d'application et perspectives

Validation expérimentale

Propagation ultrasonore : Description du set-up expérimental

- Propagation ultrasonore visualisée expérimentalement par photoélasticimétrie
→ Les ondes US induisent des contraintes locales modifiant la polarisation de la lumière, permettant une visualisation directe de la propagation via un montage optique dédié
- Quelques points clés :
 - Intensité de l'image ↗ quand la fréquence ↗ et/ou tension d'excitation ↗
 - Contraste des OL plus faible que celui des OT (gradient des contraintes OL < OT)



■ 3 pièces testées :

Trou Génératrice



Soudure en 'T'

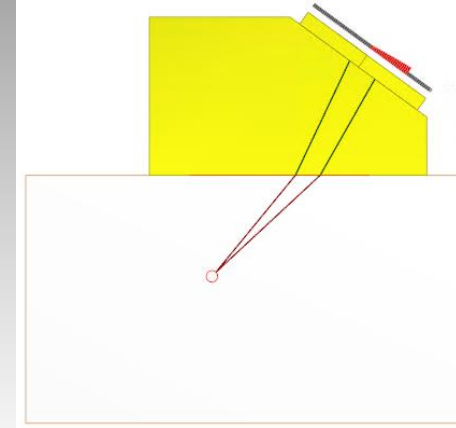


TOFD sur entaille sous-jacente



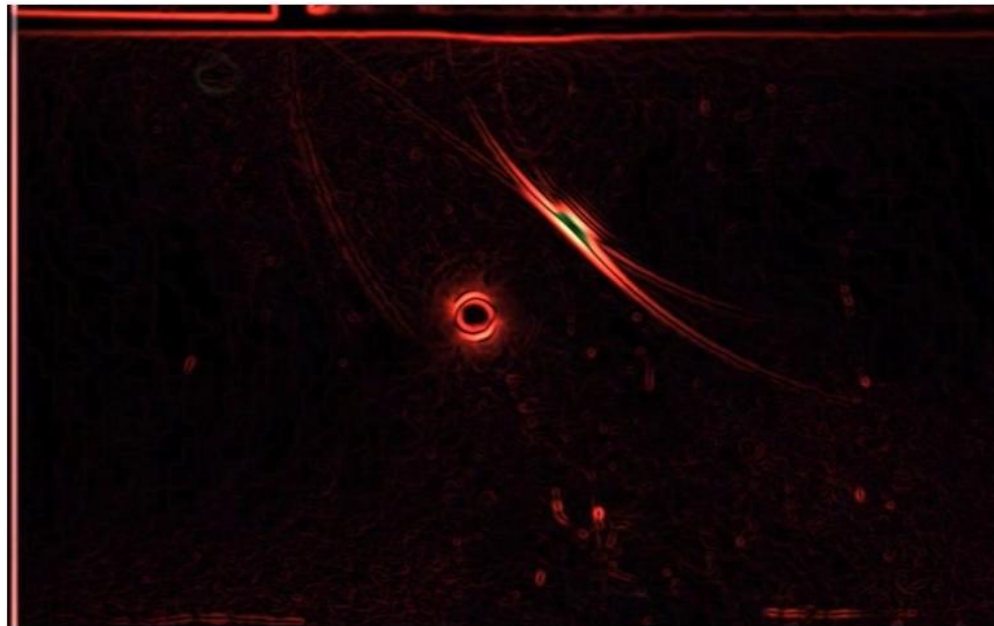
*Propriétés acoustiques du verre
Densité: 2,2 ; $v_{OL} = 5850$ m/s ; $v_{OT} = 3450$ m/s

Validation expérimentale

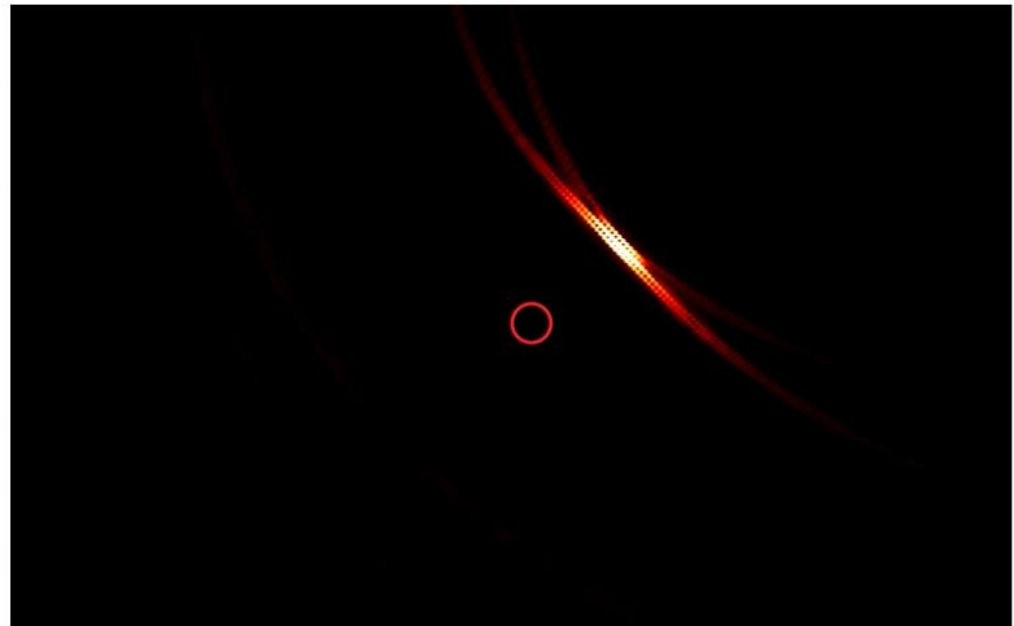


Propagation ultrasonore : Trou Génératrice

Photoélasticimétrie



Simulation (FFEM)



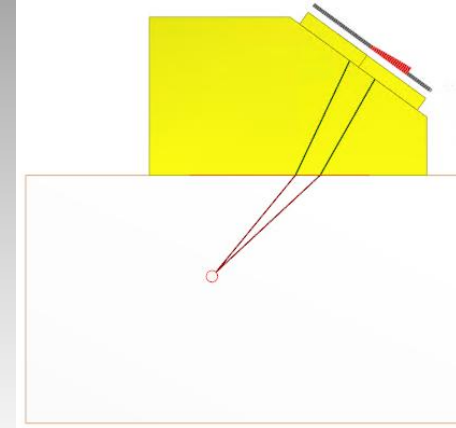
Détails de la configuration :

Sonde '5L64'

Sous-ouv. 20 élts., OT45° foc. à 50 mm de prof.

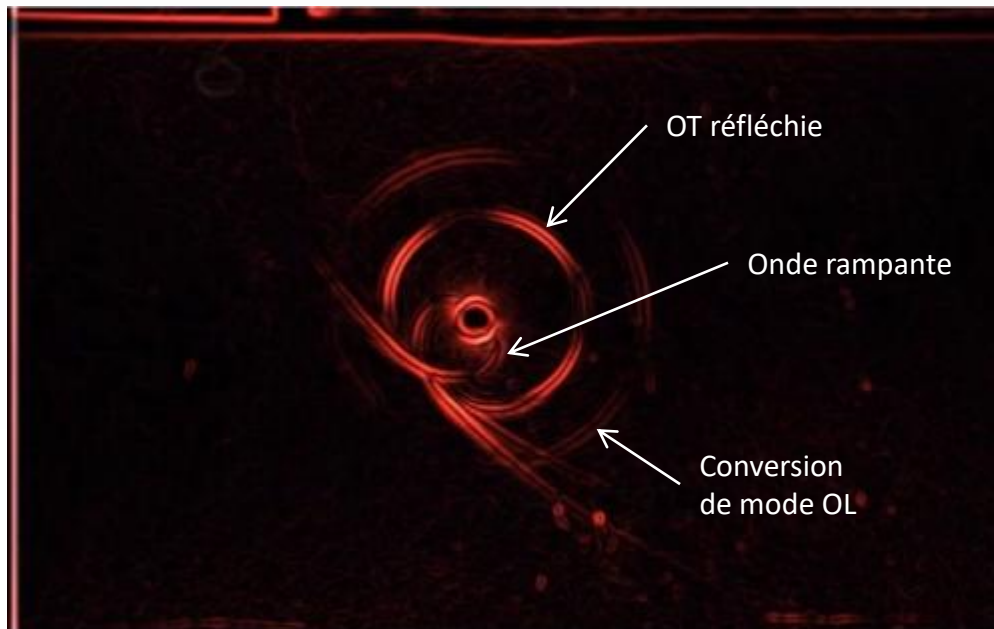
TG Ø3mm, profondeur 25 mm

Validation expérimentale

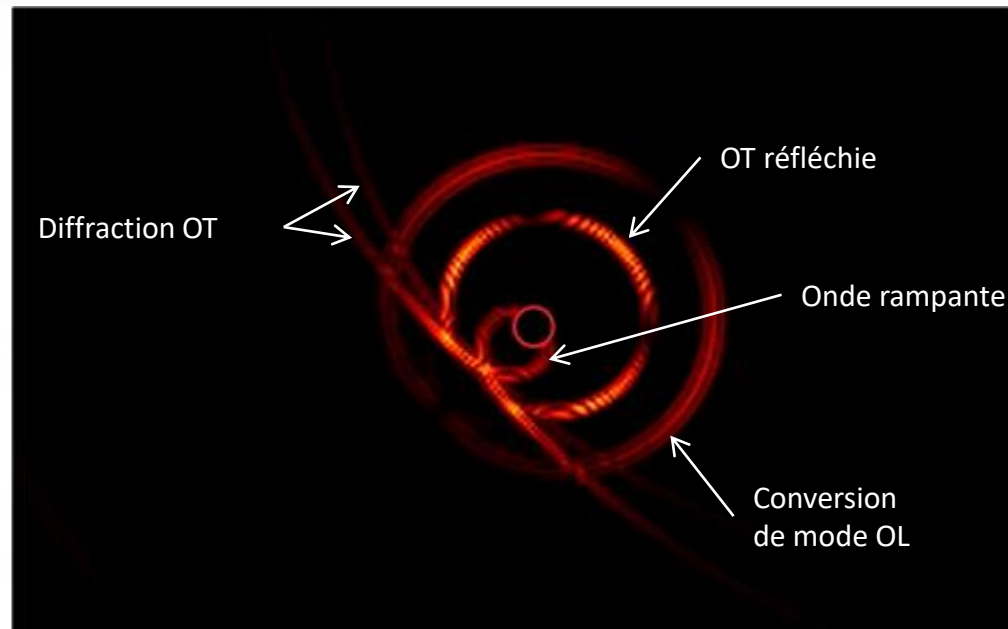


Propagation ultrasonore : Trou Génératrice

Photoélasticimétrie



Simulation (FFEM)



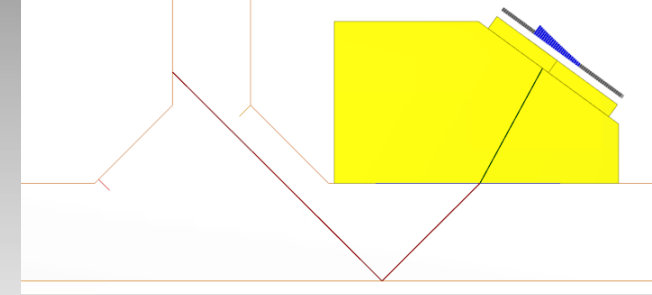
Détails de la configuration :

Sonde '5L64'

Sous-ouv. 20 élts., OT45° foc. à 50 mm de prof.

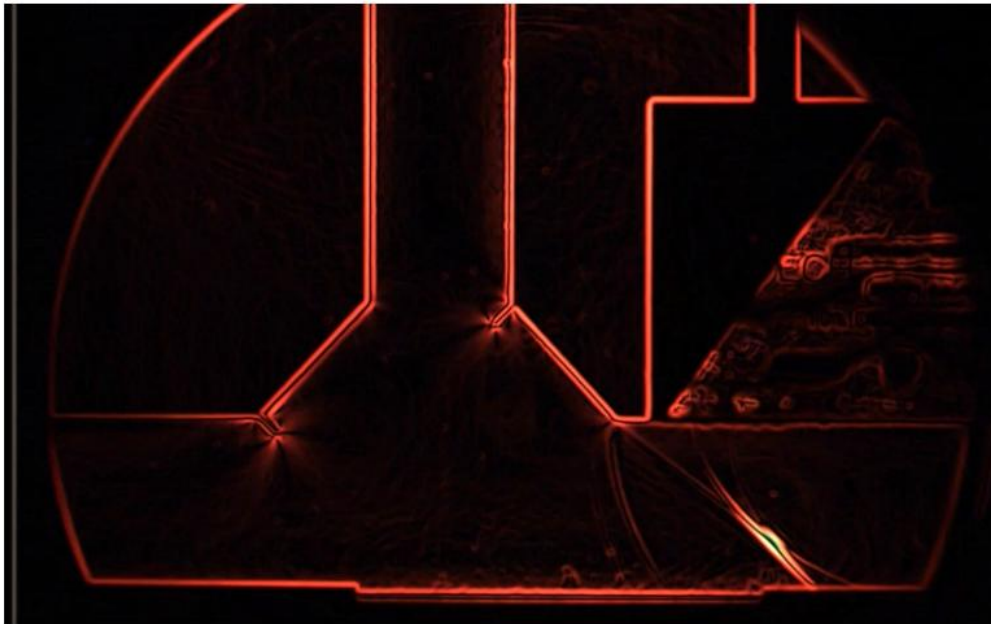
TG Ø3mm, profondeur 25 mm

Validation expérimentale

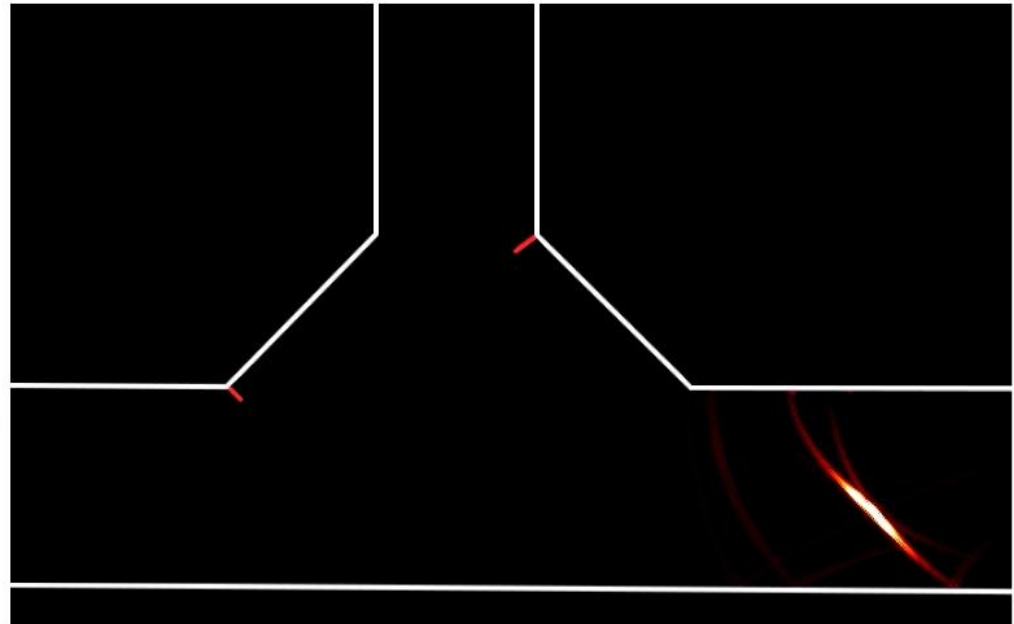


| Propagation ultrasonore : Soudure en 'T'

Photoélasticimétrie



Simulation (FFEM)



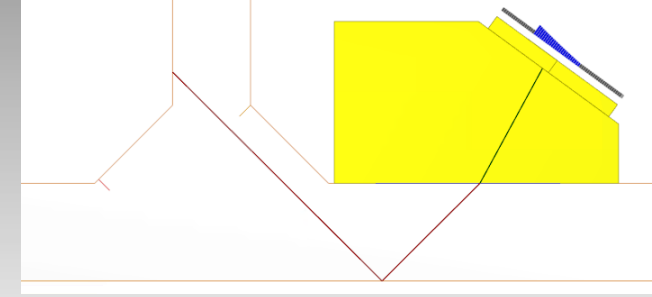
Détails de la configuration :

Sonde '5L64'

Sous-ouv. 24 élts., OT45° foc. à 50 mm de prof.

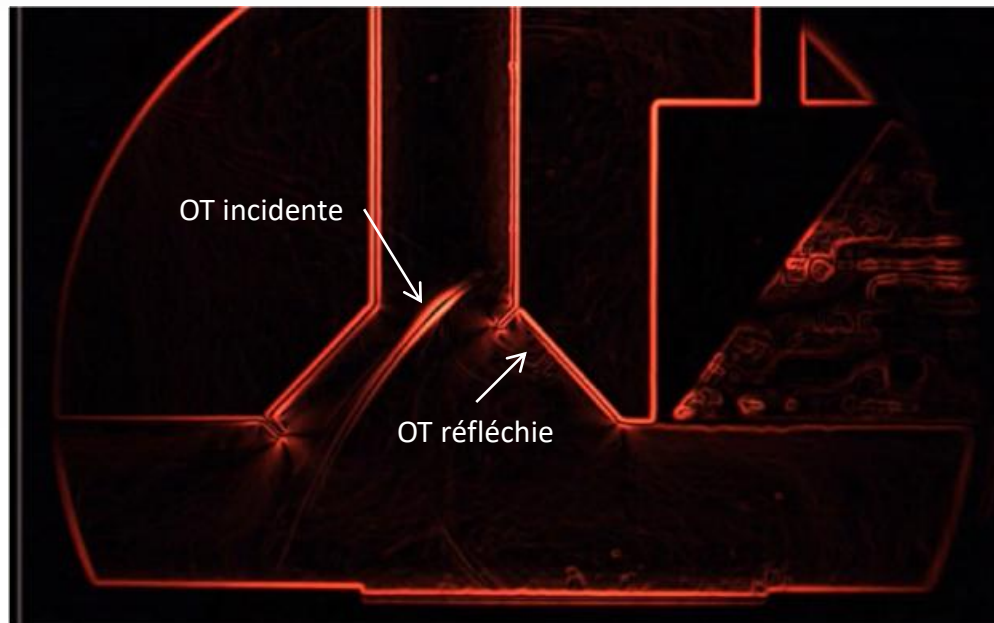
2 x défauts plans, hauteur = 4 mm

Validation expérimentale

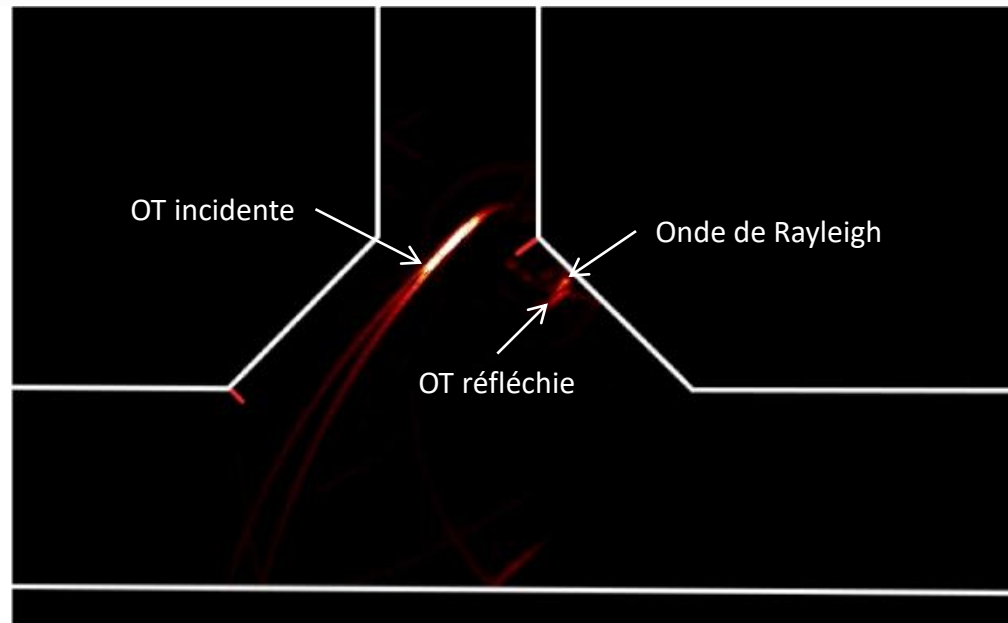


| Propagation ultrasonore : Soudure en 'T'

Photoélasticimétrie



Simulation (FFEM)



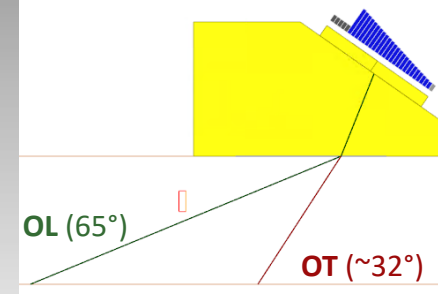
Détails de la configuration :

Sonde '5L64'

Sous-ouv. 24 élts., OT45° foc. à 50 mm de prof.

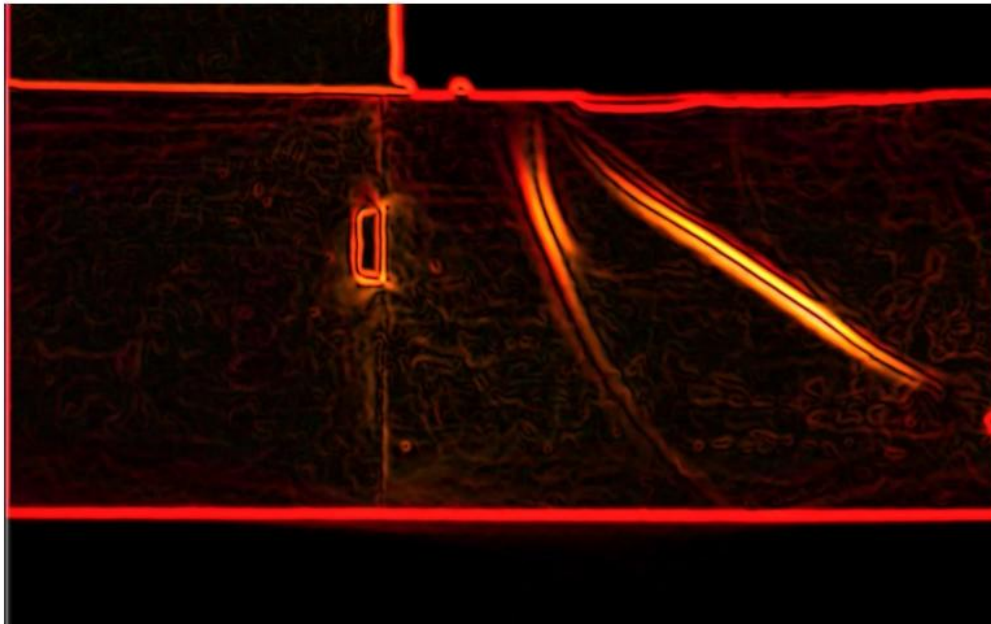
2 x défauts plans, hauteur = 4 mm

Validation expérimentale



Propagation ultrasonore : TOFD sur entaille sous-jacente

Photoélasticimétrie



Simulation (FFEM)



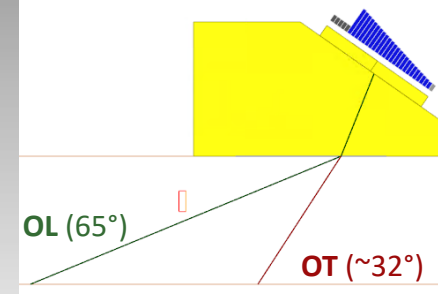
Détails de la configuration :

Sonde 'DAAH 7.5L30'

Sous-ouv. 24 élts., OL65° foc. à 10 mm de prof.

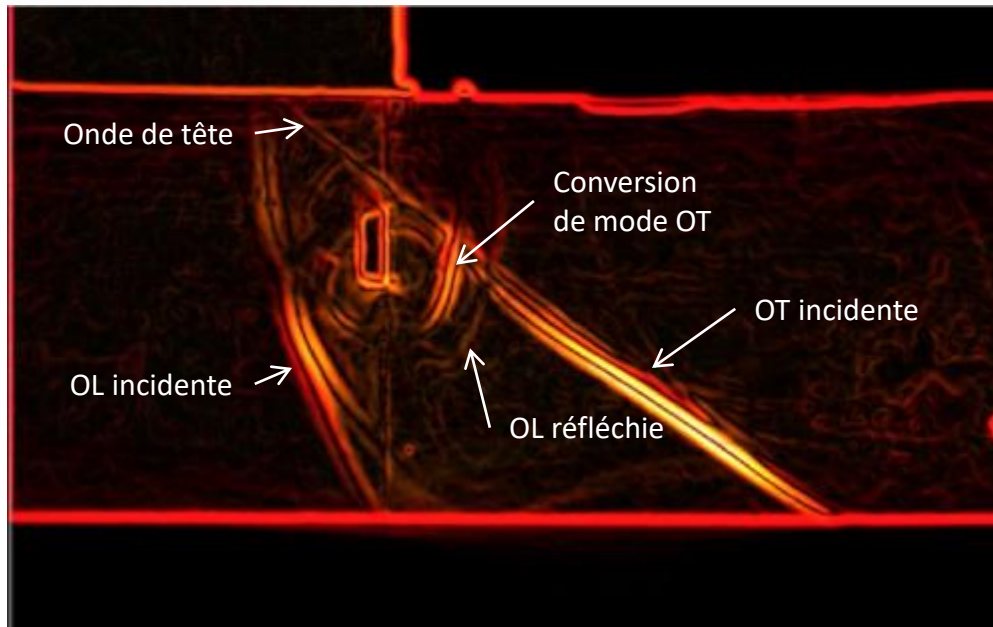
Entaille 3x1 mm², ligament 5 mm vs surface

Validation expérimentale

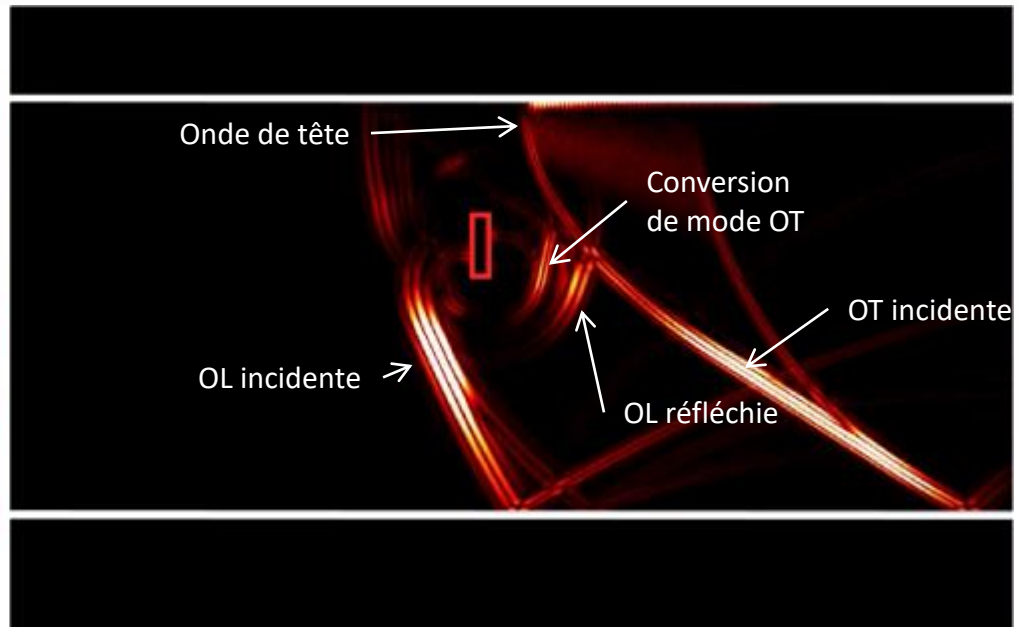


Propagation ultrasonore : TOFD sur entaille sous-jacente

Photoélasticimétrie



Simulation (FFEM)



Détails de la configuration :

Sonde 'DAAH 7.5L30'

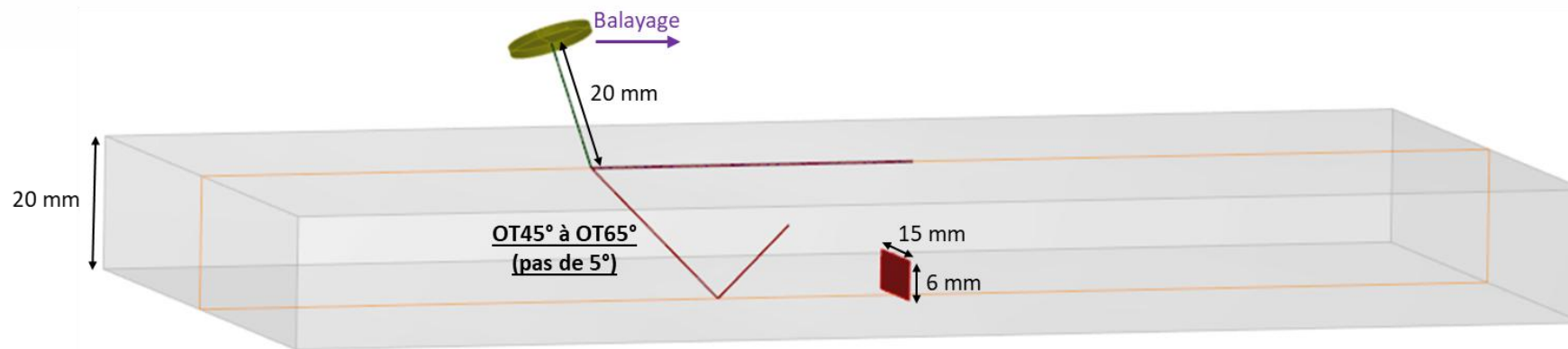
Sous-ouv. 24 élts., OL65° foc. à 10 mm de prof.

Entaille 3x1 mm², ligament 5 mm vs surface

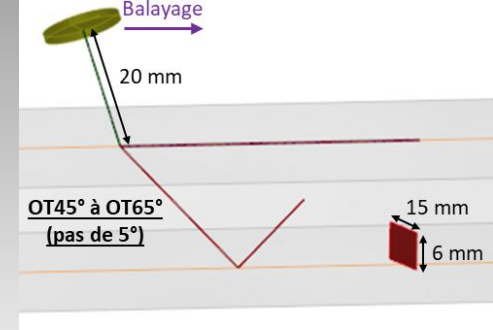
Validation expérimentale

Réponse défaut : Impact de l'angle de réfraction

- Pièce plane en acier carbone (densité : 7,8 ; $v_{OL} = 5900$ m/s ; $v_{OT} = 3230$ m/s)
- Inspection en immersion :
 - Sonde conventionnelle : $\varnothing 12,7$ mm ; $f = 4,5$ MHz
 - Hauteur d'eau : 20 mm
 - Angle de réfraction : **OT45° à OT65° (pas de 5°)**
- Défaut débouchant au fond, dimension 6x15 mm²
- Calibration (pour chaque angle) : TG $\varnothing 2$ mm, profondeur 15 mm

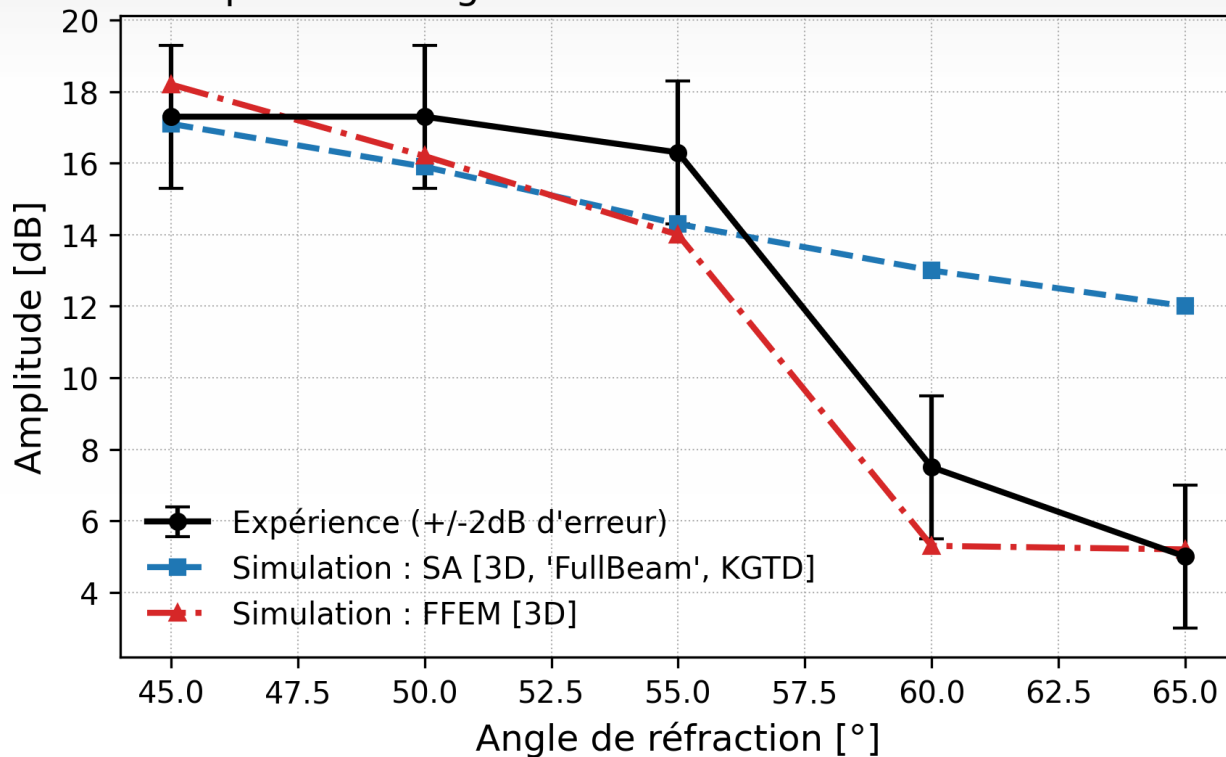


Validation expérimentale

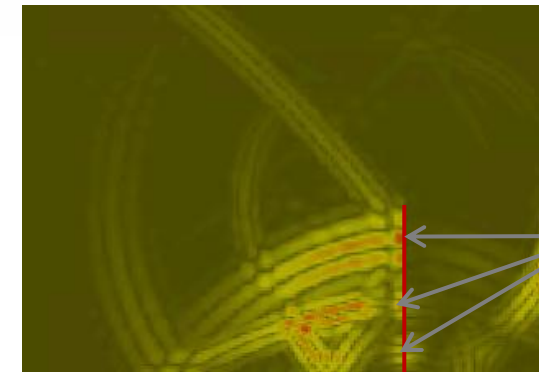


Réponse défaut : Impact de l'angle de réfraction

Impact de l'angle de réfraction – Défaut 6×15 mm²



- Bon accord entre SA et FFEM pour les trois premiers angles.
- Ecart importants en SA au-delà de 60°, tandis que FFEM reste cohérent.
→ Vers 60°, proche de l'angle critique sur le défaut vertical, apparition de phénomènes complexes (ondes rampantes...) interférant avec l'écho de coin OT ; phénomènes pris en compte en FFEM mais absents en SA, expliquant en partie les écarts.



Non simulé
en SA

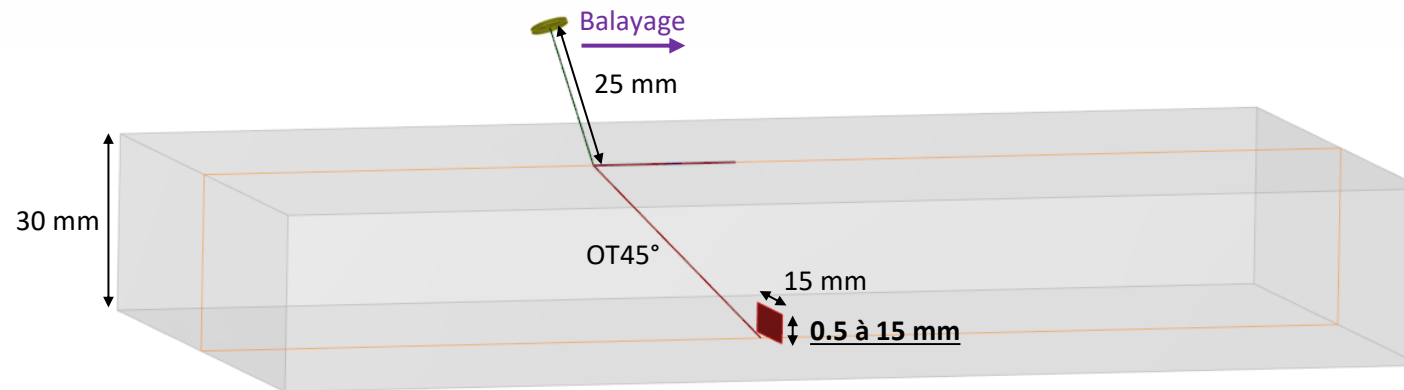
Angle de réfraction	OT45	OT50	OT55	OT60	OT65
SA [3D, 'FullBeam', KGTD]	-0.2	-1.4	-2.0	+5.5	+7.0
FFEM [3D]	+0.9	-1.1	-2.3	-2.2	+0.2

Erreur en dB (simulation - expérience)

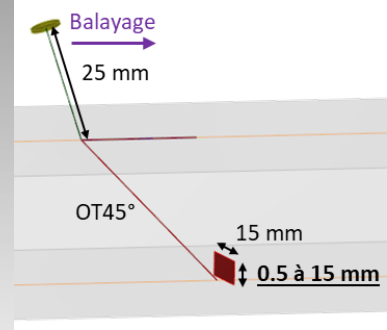
Validation expérimentale

Réponse défaut : Impact de la hauteur du défaut

- Pièce plane en acier carbone (densité : 7,8 ; $v_{OL} = 5900$ m/s ; $v_{OT} = 3230$ m/s)
- Inspection en immersion :
 - Sonde conventionnelle : $\varnothing 6,35$ mm ; $f = 2,25$ MHz
 - Hauteur d'eau : 25 mm
 - Angle de réfraction : $OT45^\circ$
- Défaut débouchant au fond : longueur 15 mm, **hauteur 0,5 à 15 mm**
- Calibration : plus grand défaut (15×15 mm²)

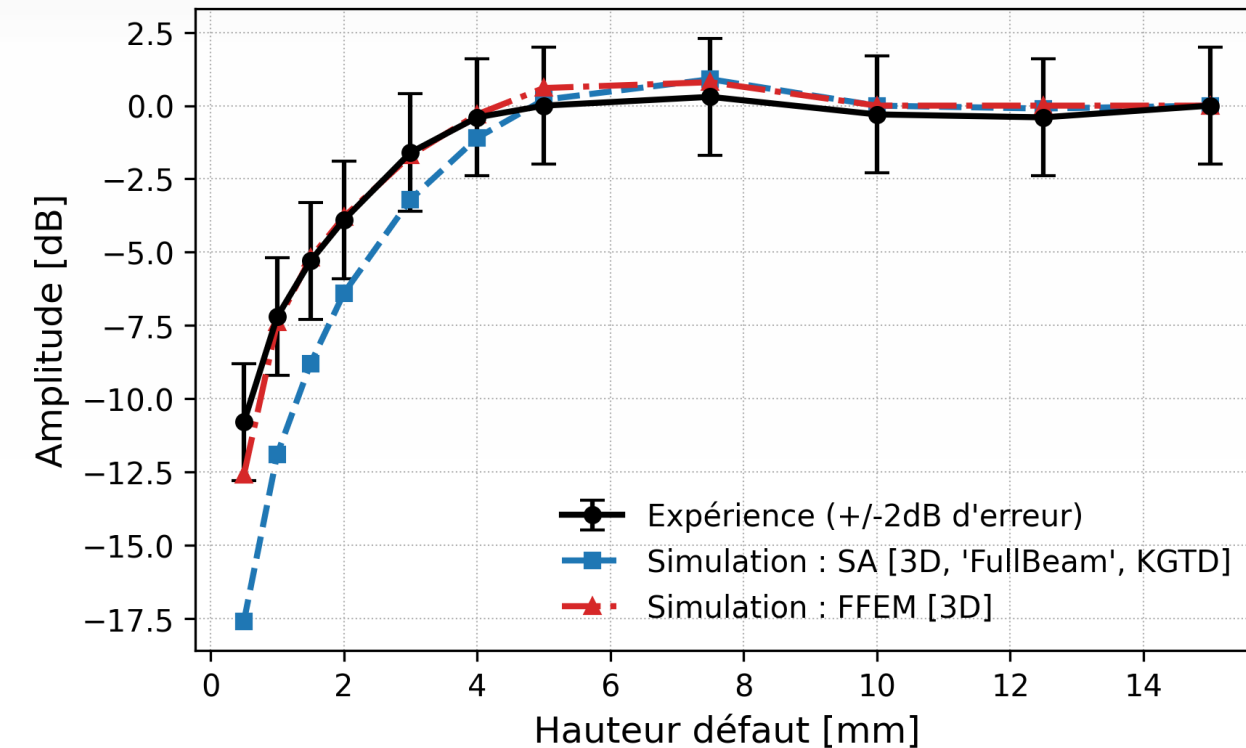


Validation expérimentale



Réponse défaut : Impact de la hauteur du défaut

Impact de la hauteur du défaut



- Les modèles SA (KGTD) ne sont pas valides pour des petits défauts (vs λ), ce qui explique les écarts observés pour des défauts de hauteur < 2 mm.
- Meilleure prédiction des petits défauts avec FFEM.

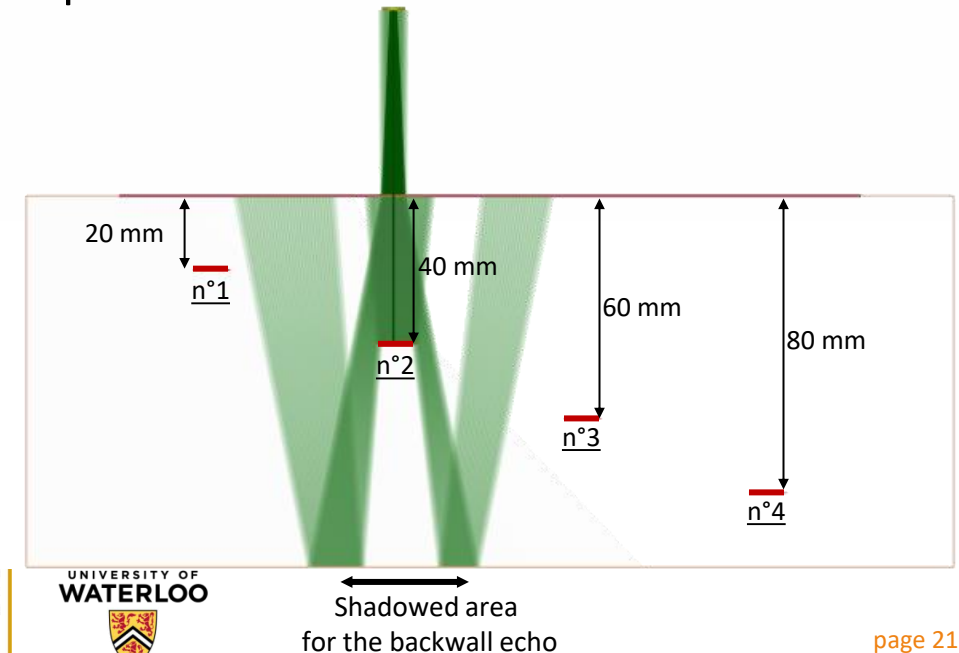
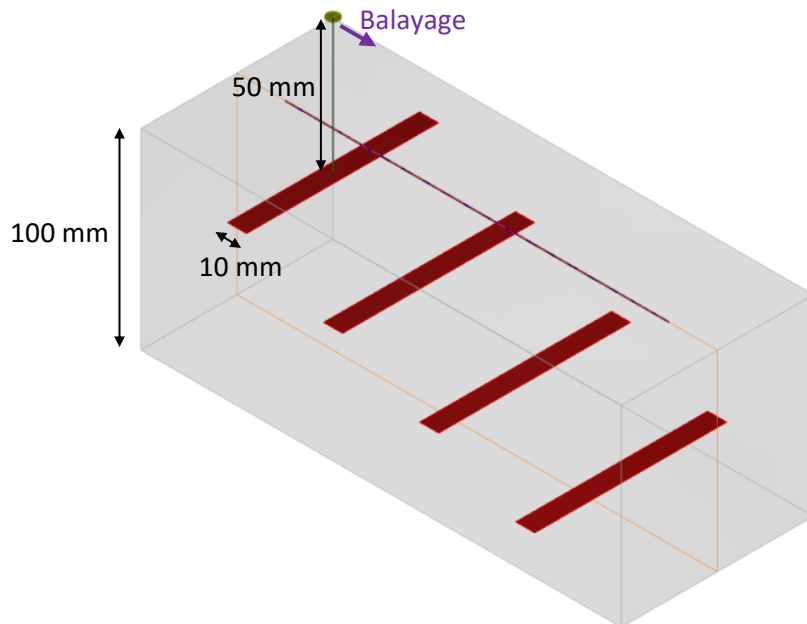
Hauteur défaut [mm]	0.5	1	1.5	2	3	4	5	7.5	10	12.5	15
SA [3D, 'FullBeam', KGTD]	-6,8	-4,7	-3,5	-2,5	-1,6	-0,7	0,2	0,6	0,3	0,3	0,0
FFEM [3D]	-1,8	-0,2	0,1	0,1	-0,1	0,1	0,6	0,5	0,3	0,4	0,0

Erreur en dB (simulation - expérience)

Validation expérimentale

Effet d'ombrage : Impact de délaminages sur l'écho de fond

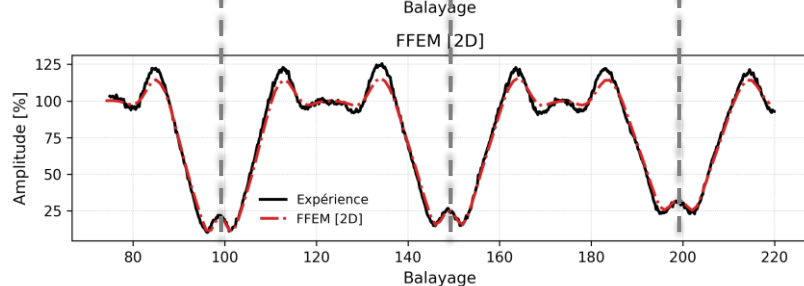
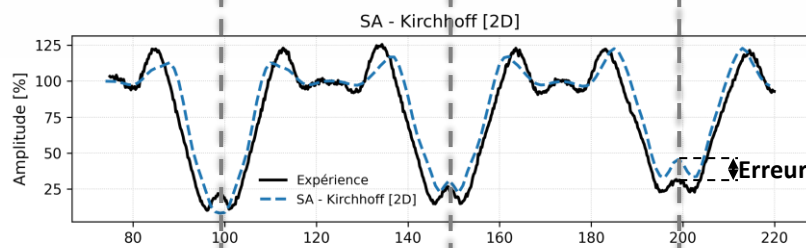
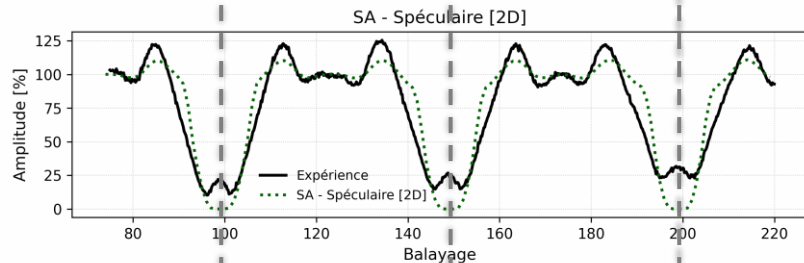
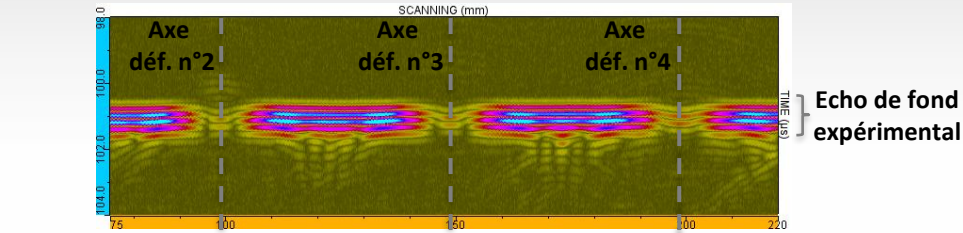
- Pièce plane en acier carbone (densité : 7,8 ; $v_{OL} = 5900$ m/s ; $v_{OT} = 3230$ m/s)
- Inspection en immersion :
 - Sonde conventionnelle : $\varnothing 6,35$ mm ; $f = 2,25$ MHz
 - Hauteur d'eau = 50 mm
- 4 défauts de type 'délaminage' : 10 mm de large à 4 profondeurs de 20mm à 80 mm



Validation expérimentale



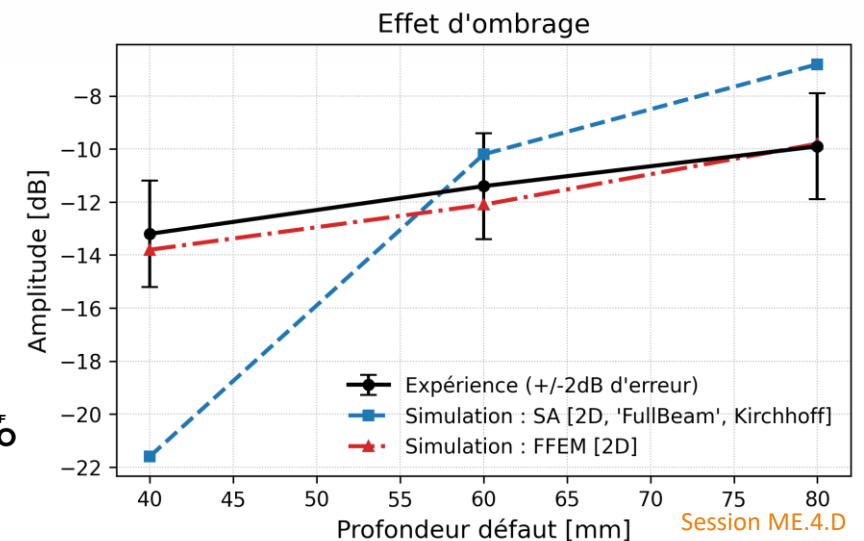
Effet d'ombrage : Impact de délaminages sur l'écho de fond



- 2 modèles semi-analytiques pour la géométrie :
 - Modèle Spéculaire** : Ombrage total, aucune amplitude au droit du défaut → modèle non pertinent dans ce cas.
 - Modèle Kirchhoff** : Des écarts en amplitude sur l'écho de fond ombré variant avec la profondeur du défaut.
- Modèle FFEM** : Bon accord avec l'expérience sur l'amplitude de l'écho de fond ombré au droit de chaque défaut.

Profondeur défaut [mm]	40	60	80
SA [2D, Kirchhoff]	-8,4	+1,2	+3,1
FFEM [2D]	-0,6	-0,7	+0,1

Erreur en dB (simulation - expérience)



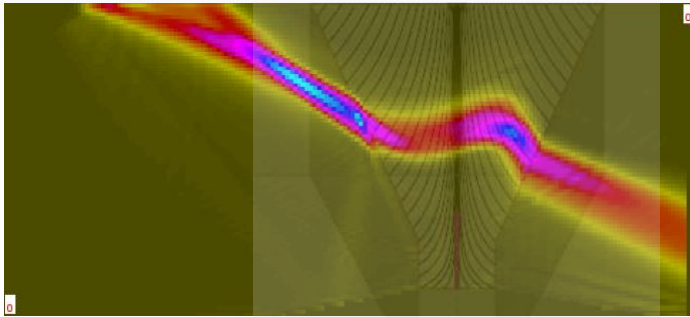
Sommaire

- | Stratégies de modélisation UT
- | Validation expérimentale
 - Propagation ultrasonore
 - Réponse défaut
 - Effet d'ombrage
- | **Conclusion : cas d'application et perspectives**

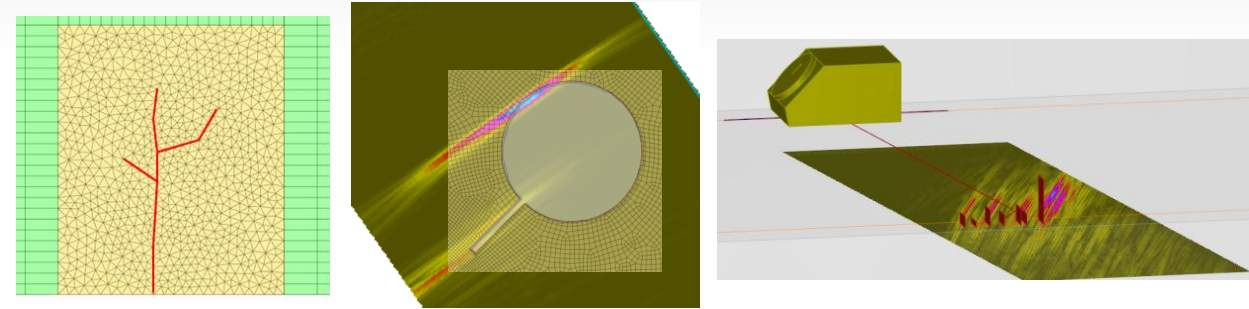
Conclusion : cas d'application et perspectives

| Le modèle Full FEM étend le champ des applications de modélisation :

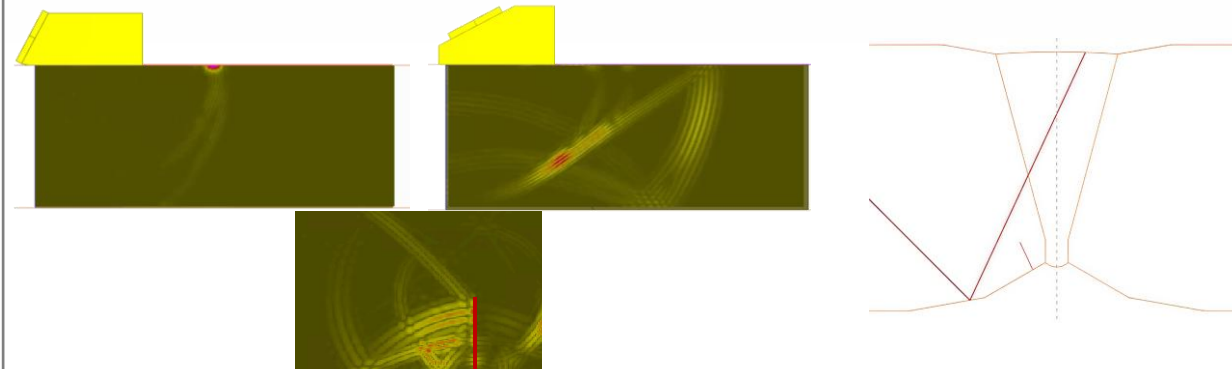
Milieux de propagation complexes (anisotrope, hétérogène...)



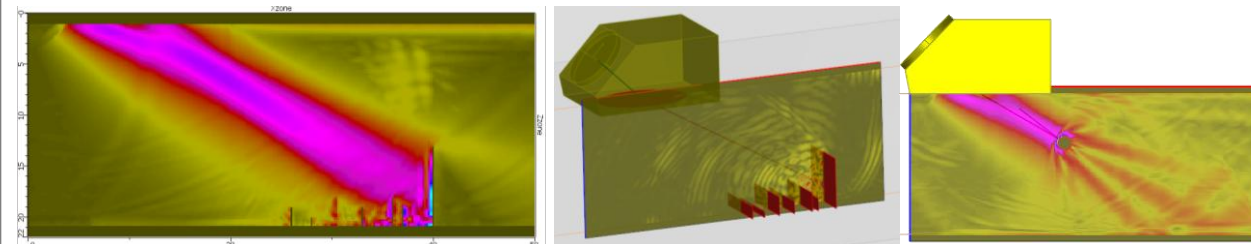
Défauts 'complexes' (profils spécifiques, petits, en 'cluster'...)



Applications avec ondes de surface (Rayleigh, ondes rampantes...)



Modélisation précise des phénomènes d'ombrage



Conclusion : cas d'application et perspectives

- | Avec le nouveau modèle 'Full FEM', CIVA devient une plateforme de simulation UT multi-modèles complète : Semi-Analytique (**SA**) + **Hybrides** (SA et Éléments Finis locaux) + 'Full component FEM' (**FFEM**)
- | Nouvel outil de référence pour la validation croisée de modèles et extension des cas d'application possibles
- | Modèle FFEM actuellement disponible pour des calculs 2D et 3D limités à des géométries de symétrie 2,5D (section identique le long de l'extrusion)
- | Amélioration continue dont les perspectives suivantes :
 - Capacité HPC pour réduire les temps de calcul (notamment en FFEM 3D)
 - Optimisation de l'implémentation du modèle FFEM
 - Nouvelles capacités : défauts 3D (e.g., TFP), géométries complexes, composite, béton, inspection en transmission...