



Journées d'échanges du défi NEEDS
Bilan 2013 et Perspectives
21-22 octobre 2014 - Nantes



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



Imagerie et analyses d'images

Modélisation numérique pour l'imagerie en sodium liquide

ImagiNa (2013 et 2014)

François Baqué CEA DTN Cadarache
Serge Mensah CNRS LMA Marseille

www.cea.fr

21 octobre 2014

- **Présentation du besoin** **F. Baqué**

- **Imagerie de surface :** **F. Baqué**
 - **Tomographie**
 - **Détection automatique d'objet perdus**

- **Imagerie différentielle** **S. Mensah**
 - **Méthodes adjointes**
 - **Perspective : vers l'imagerie de fissures
au voisinage de soudures**

- Contrôles périodiques des réacteurs de génération IV refroidis au sodium liquide (futur prototype ASTRID)
 - **But** : vérifier le bon état des structures immergées dans le réacteur par visualisation par ultrasons lors des phases d'inspection

Besoins

- Vision globale, reconstruction de grandes formes
- Mesures de déformations (millimétriques) de structures
- Recherches de fissures débouchantes ou non
- Recherche de corps migrants
- Identification d'assemblage combustible



Mises en œuvre

- Capteurs fonctionnant en sodium liquide à 200 °C
- Systèmes de balayage de l'espace (en 3D)
- Modélisation et traitement numérique du signal et des images construites

■ Collaboration CEA / IGCAR (Inde)

- **Principe** : Construction d'image Cscan : mouvement mécanique du traducteur en face de l'objet à inspecter.
- TUSHT $\phi 15$ plan, situé à 400 mm de la cible. Sodium 180 °C

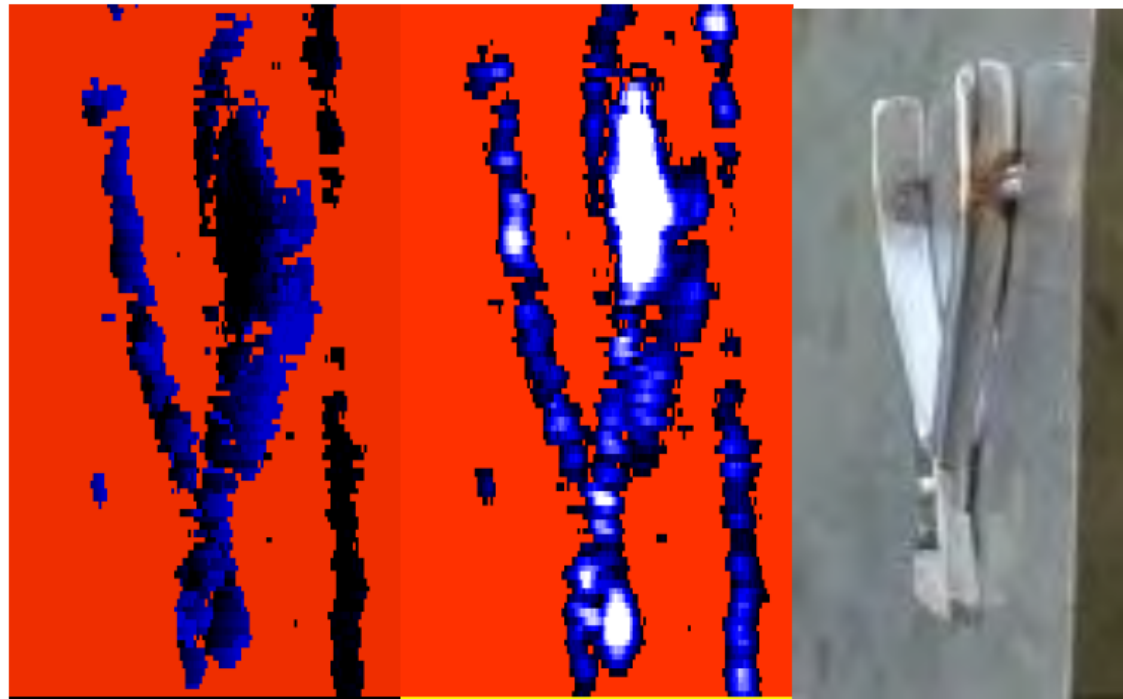
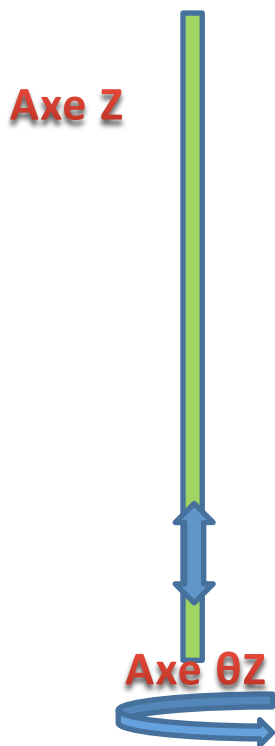


Image en sodium de la pince coupante en temps de vol et en amplitude

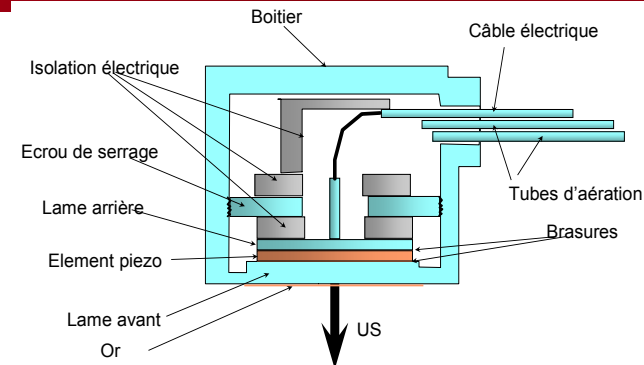
Contraintes des capteurs

■ Conditions pour le contrôle périodique :

- Capteurs installés en sodium pour le contrôle (quelques jours)
- Réacteur nucléaire à l'arrêt
- Température du sodium : 200 °C, quasi-isotherme
- Débit de sodium faible (vitesse quelques cm/s)

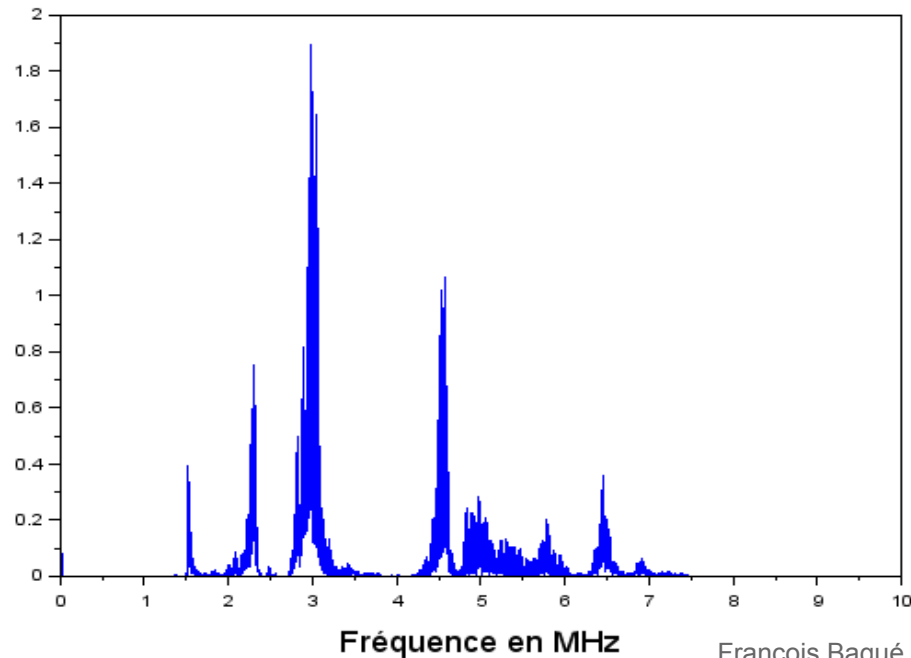
■ Transducteur ultrasonore envisagé par le CEA : TUSHT®

- Déjà utilisé dans les réacteurs Phénix et Superphénix
- Conçu pour fonctionner sous 600 °C pendant de longues périodes
- Amortissement faible (réponse impulsionnelle très longue)
- Permet de travailler en énergie (amplitude, enveloppe du signal) et en temps de propagation (mesure de la célérité en sodium)

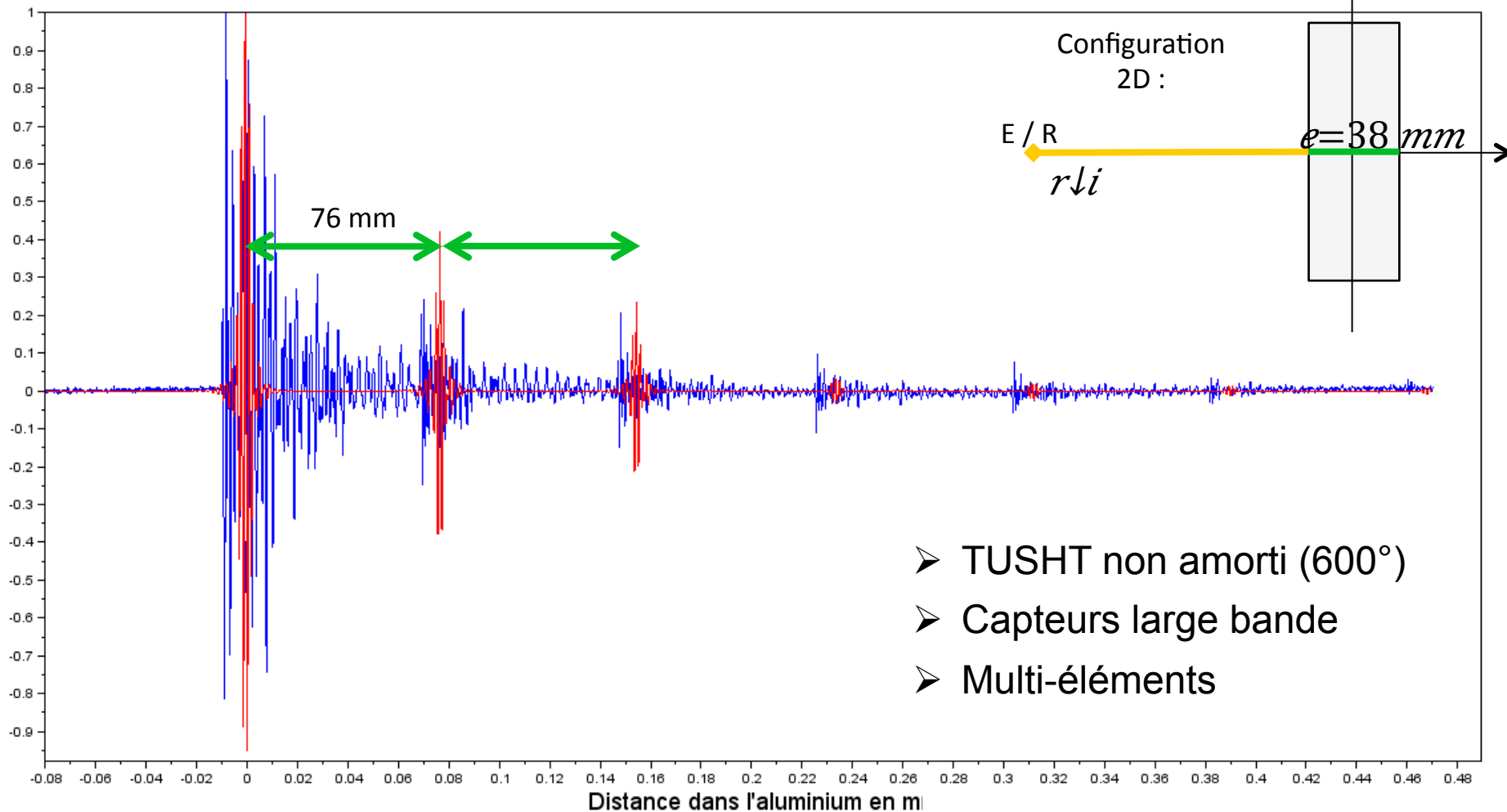


	Fréquences	Limites champs proche/lointain
TUSHT $\phi 15$, plan, réf. T15E1	Multifréquentiel : 2,3 MHz 3 MHz 4,5 MHz	46 mm 134 mm 200 mm
Panametrics NDT, 5 MHz, 1''	4 MHz	550 mm

Densité spectrale de puissance du TUSHT



Réponse d'un traducteur du commerce (rouge) et d'un TUSHT (bleu) sur une plaque



Performances souhaitées

- Détection de fissures : 0,8 mm de large (spécification ASME du contrôle visuel)
- Détection de défauts de forme et de position de l'ordre du millimètre

Accessibilité , balayage et complexité de l'environnement

- Non spécifiés aujourd'hui
- Grandes scènes à observer par rapport à la zone de balayage supposée restreinte : précision de la position, propagation (variations de température et convection, a priori négligeables)

Limitations
capteurs

Limitations
balayage et
accessibilité

Performances
souhaitées

Complexité de
l'environnement

OBJECTIFS DE LA THÈSE

Développer une méthodologie

- 1) d'imagerie et de détection de petits objets (jusqu'à l'ordre du mm)
- 2) d'imagerie de défauts de forme et d'intégrité (fissures, fluage...)

Méthodes fondées sur la **quantité d'informations *a priori* disponibles**

■ Utilisation de la connaissance a priori :

Exploitation de la connaissance de la scène ou de la pièce
Par un modèle numérique (simulation CIVA et COMSOL)
Par une mesure expérimentale préalable

■ Imagerie : construction d'images tomographiques, recherche de corps migrants

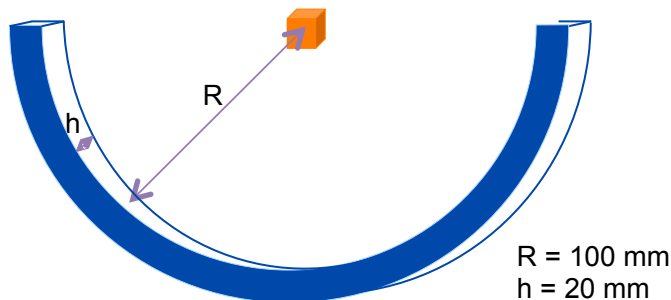
■ Analyse différentielle (méthodes adjointes, retournement temporel)

■ Finalité

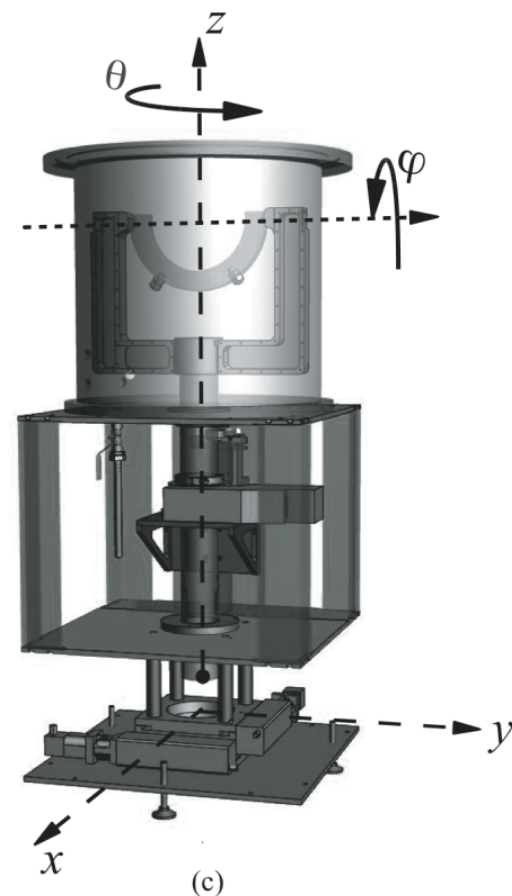
- Détection/caractérisation d'objets migrants

■ Système générique utilisé : ANAIS

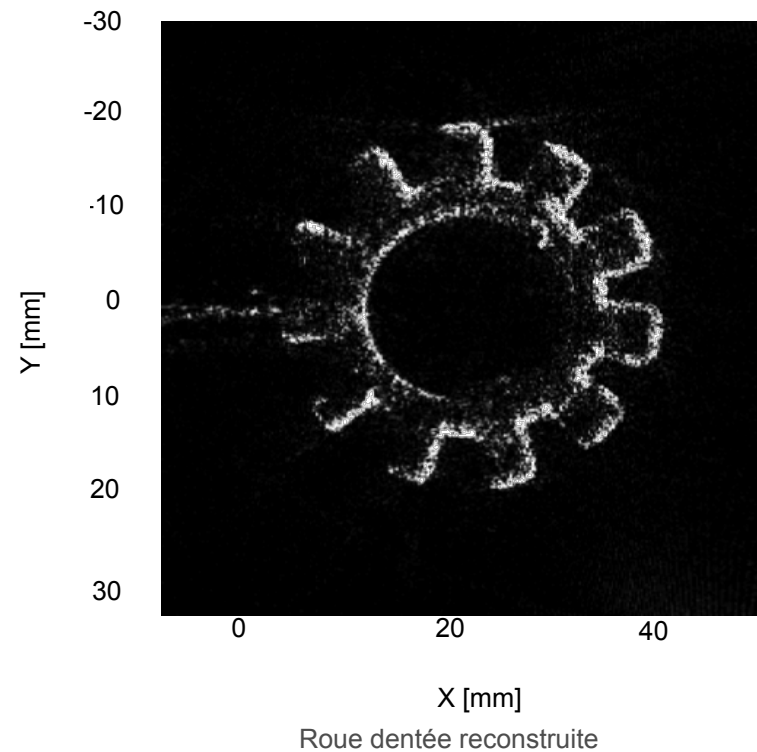
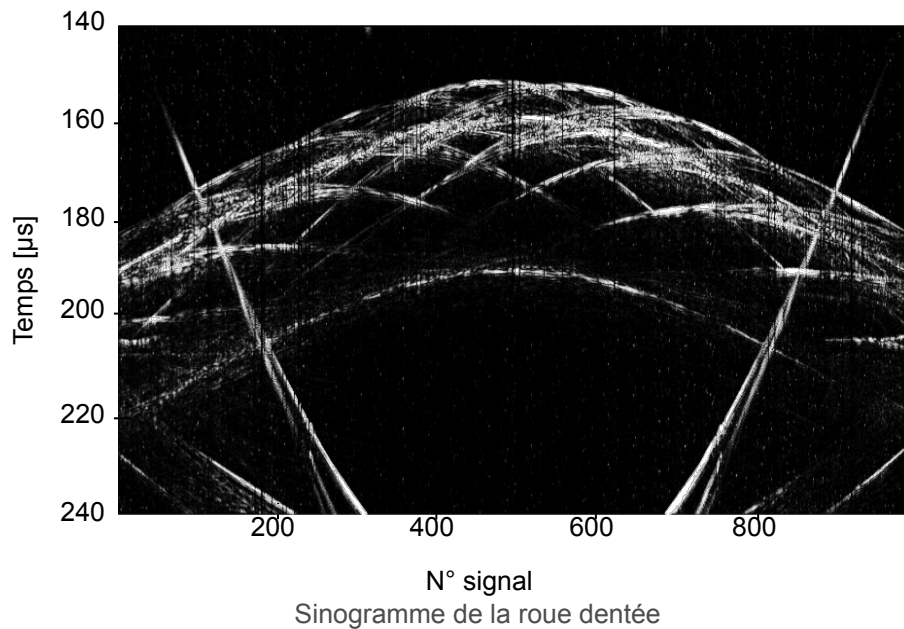
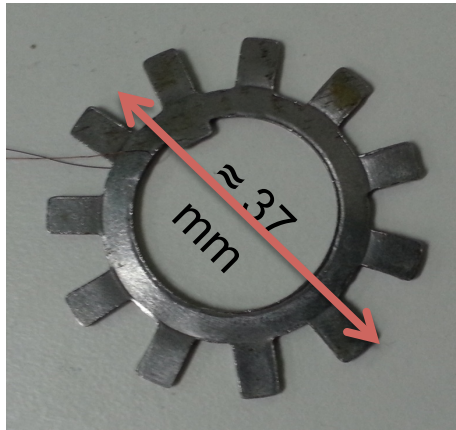
- Antenne semi-circulaire 1024 éléments, 3 MHz
- Modèle générique
- Valide l'utilisation du multiéléments
- Efficacité (car disponible)

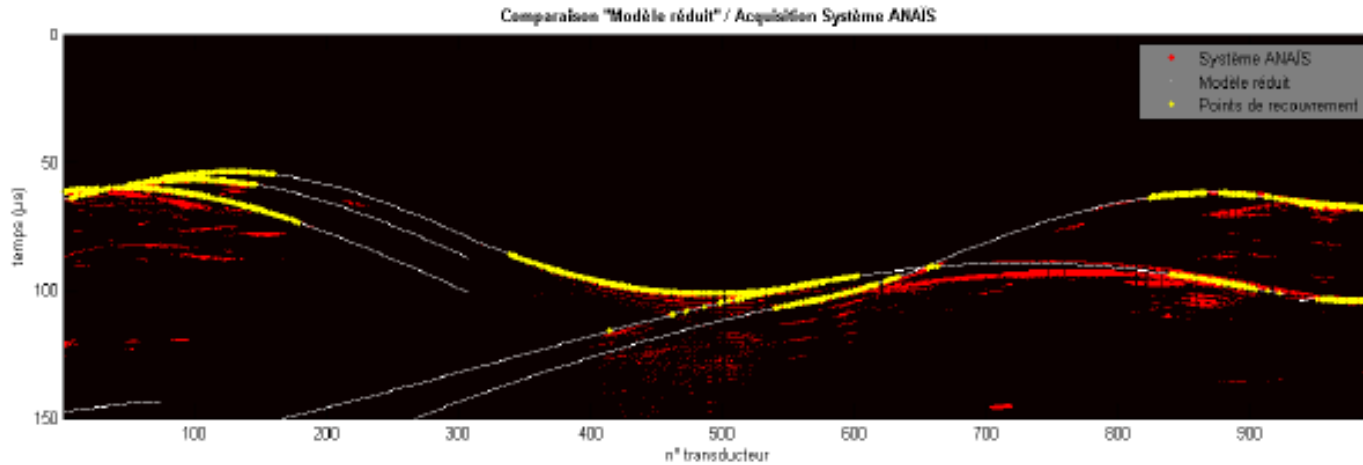


Synoptique de l'antenne ANAIS

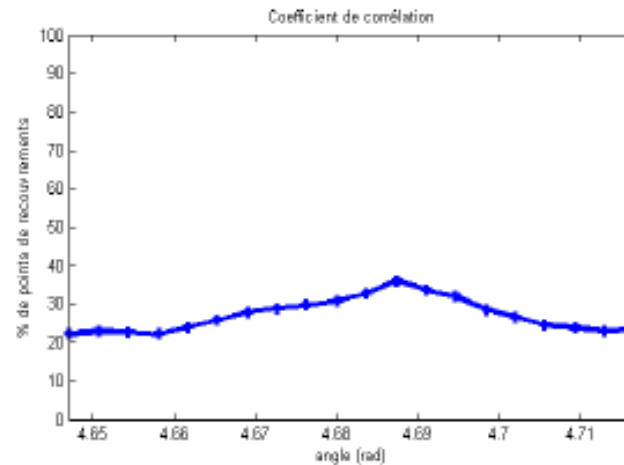
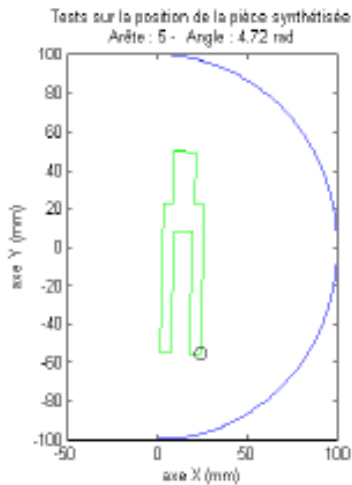


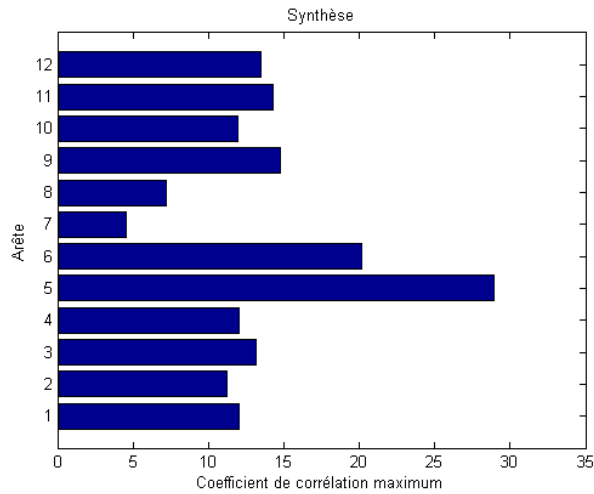
■ Reconstruction de forme : exemple de la roue dentée



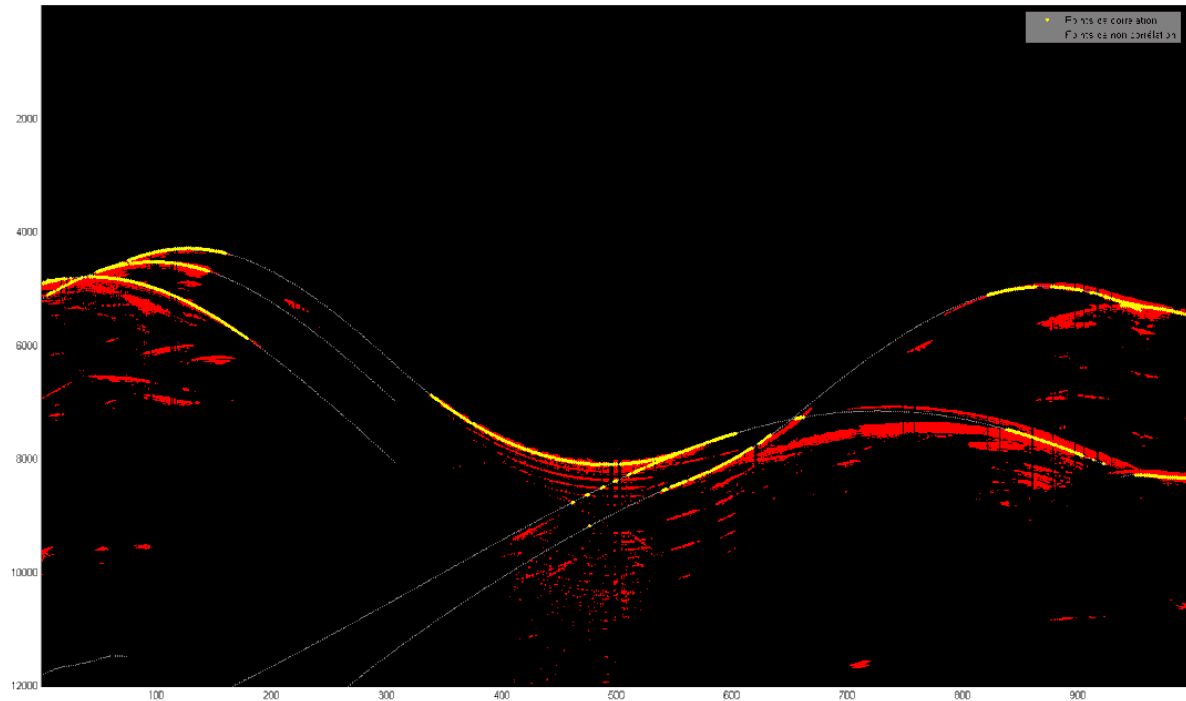
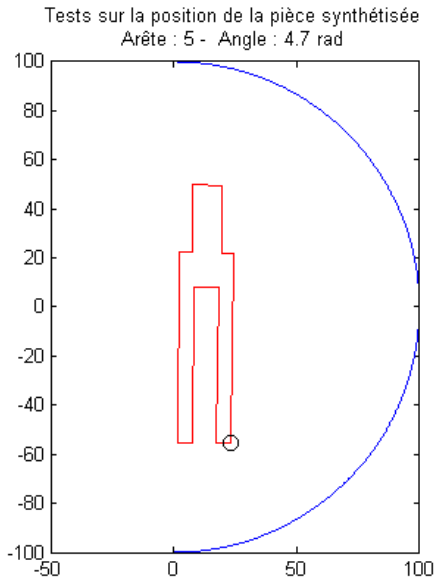


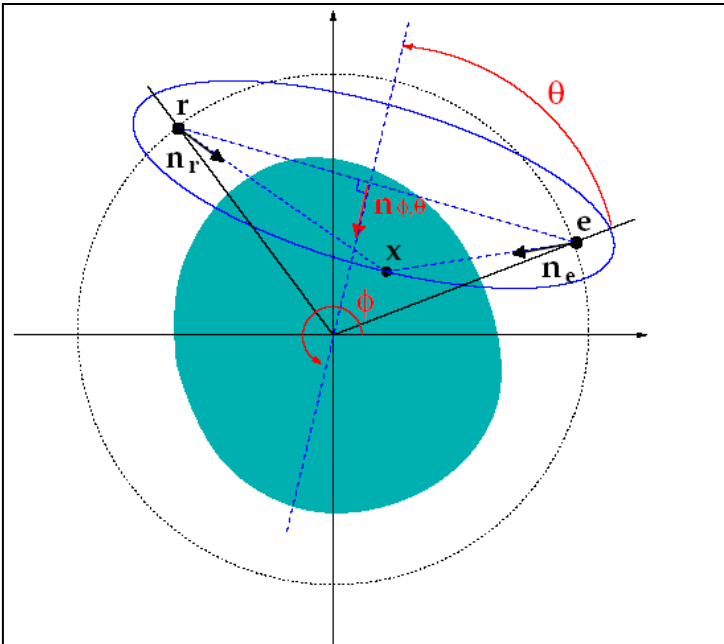
Position et orientation : la corrélation est maximale





Sélection de la simulation par le coefficient de corrélation maximum.





Scattering acquisition geometry

$$\phi = \pi + \frac{1}{2} (\text{angle}(\mathbf{e}) + \text{angle}(\mathbf{r}))$$

$$\theta = \frac{1}{2} |\text{angle}(\mathbf{e}) - \text{angle}(\mathbf{r})|$$

$\mathbf{n}_{\phi,\theta}$: unitary vector of the mediatrix defined by the angles ϕ and θ

$\mathbf{n}_e = \nabla (\|\mathbf{x} - \mathbf{e}\|)$: unitary vector in the transmitter – voxel direction

Elliptical scalar product

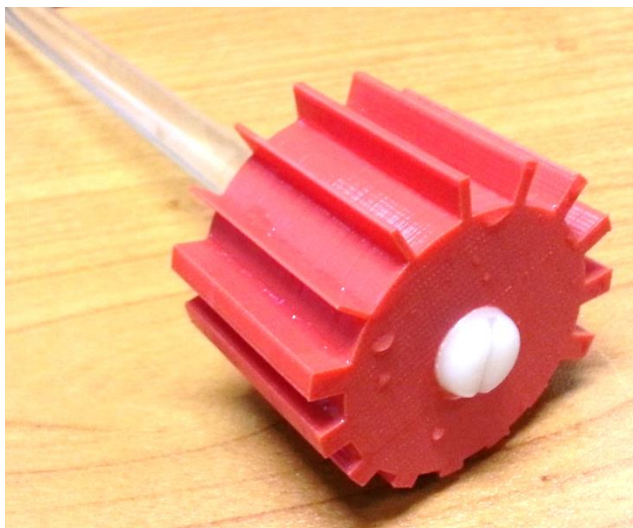
$$\mathbf{K} \odot \mathbf{x} = k \mathbf{n}_{\phi,\theta} \odot \mathbf{x}$$

$$\triangleq -k (\|\mathbf{x} - \mathbf{e}_K\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{r}_K\|)$$

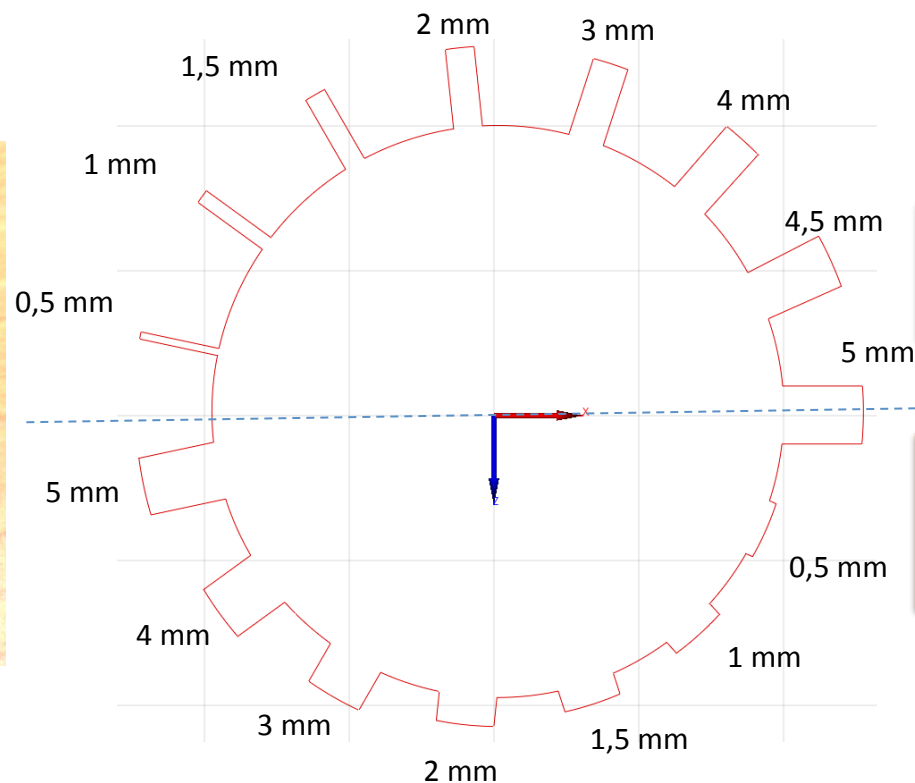
Elliptical Fourier transforms (Mensah et al., JASA 2007, IEEE UFFC 2012, Ultrasonics 2014)

$$\mathcal{F}_{\mathcal{E}}(f(\mathbf{x})) = \int f(\mathbf{x}) \frac{e^{-i\mathbf{K} \odot \mathbf{x}}}{[\mathbf{x}]_{\mathbf{K}}} d\mathbf{x} = \int f(\mathbf{x}) \varepsilon^{-i\mathbf{K} \odot \mathbf{x}} d\mathbf{x}.$$

$$\mathcal{F}_{\mathcal{E}}^{-1}(\tilde{f}(\mathbf{K})) = f(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^N} \int \tilde{f}(\mathbf{K}) [\mathbf{x}]_{\mathbf{K}} e^{i\mathbf{K} \odot \mathbf{x}} d\mathbf{K}$$

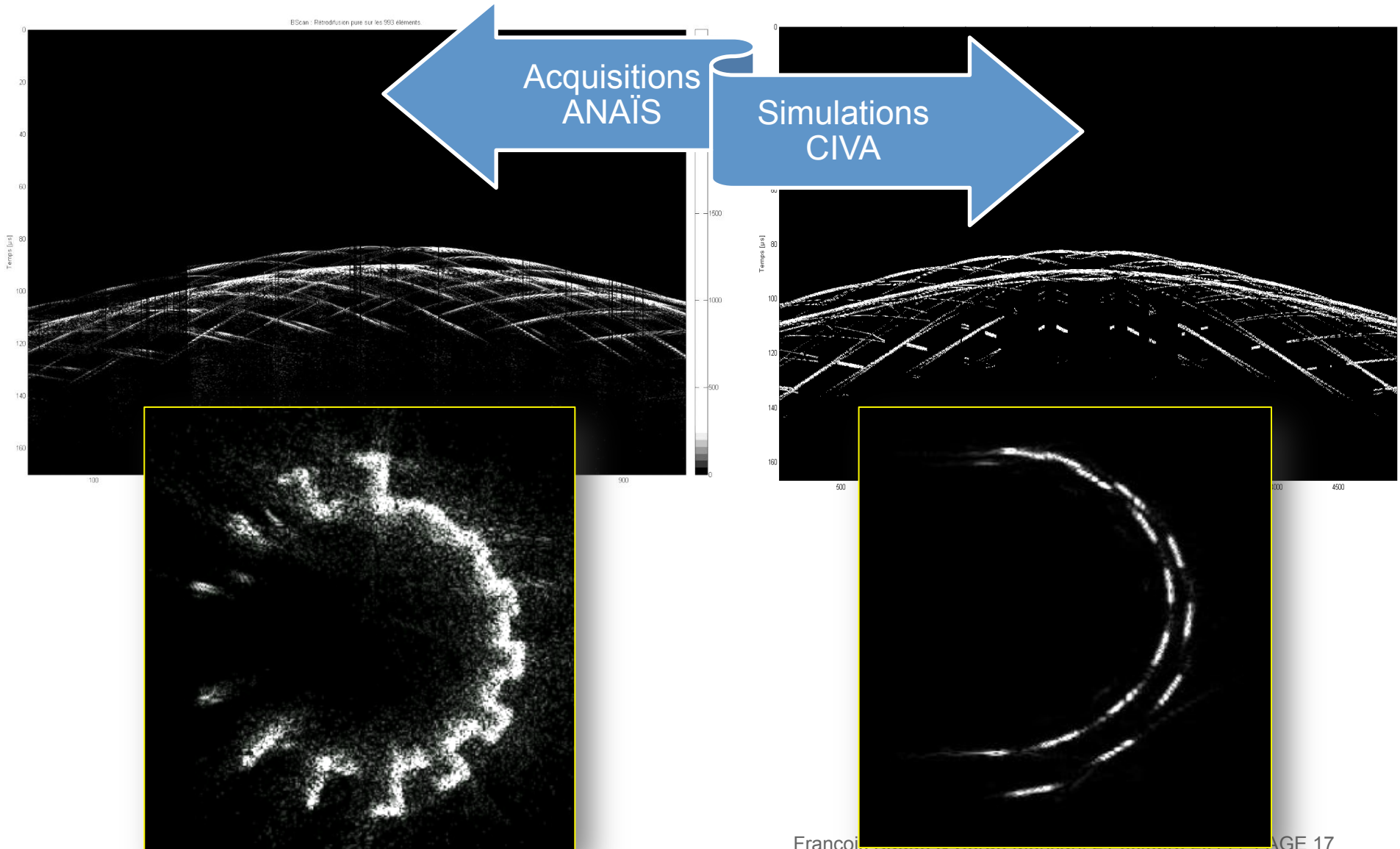


Pièce étalon en polymère réalisée au LMA.



Variation de la **largeur** des dents (hauteur constante : 5 mm)

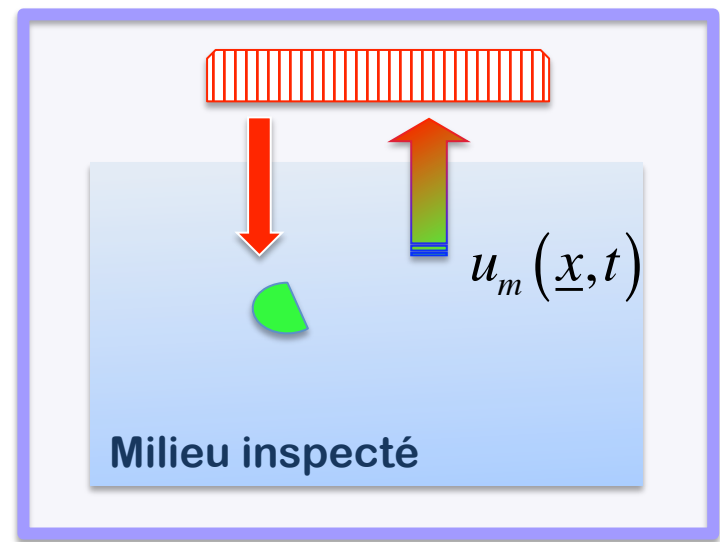
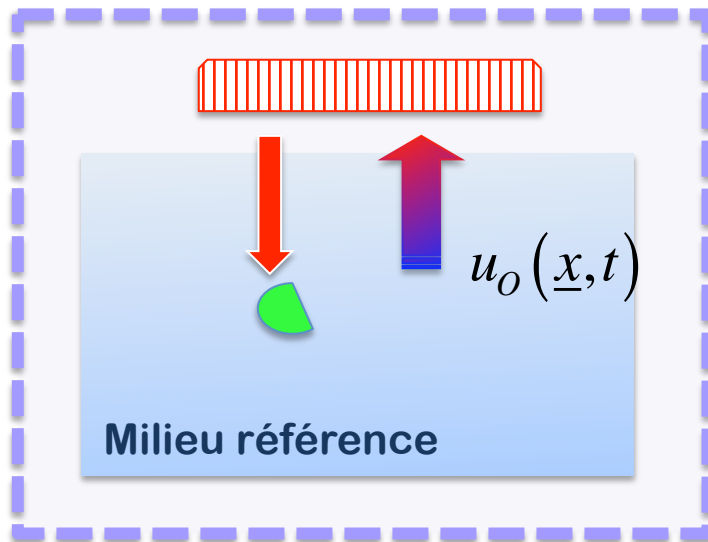
Variation de la **hauteur** des dents (largeur constante : 5 mm)



Imagerie des milieux hétérogènes à fort contraste

Minimiser

$$E_Q = \frac{1}{2} \int_0^T \int_{\Gamma_m} (u_0 - u_m)^2 dx dt$$



Eq. propagation : $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\text{div } \sigma(u)}{\rho} = F$, Loi de Hooke : $\underline{\sigma}_2(u) = \underline{C}_4 \underline{\varepsilon}_2(u)$

$$E_Q = \frac{1}{2} \int_0^T \int_{\Gamma_m} (u_0 - u_m)^2 dx dt, \quad \delta E_Q = \frac{1}{2} \int_0^T \int_{\Gamma_m} \nabla_u E_Q \cdot f(x) dx dt$$

Erreur quadratique % référence

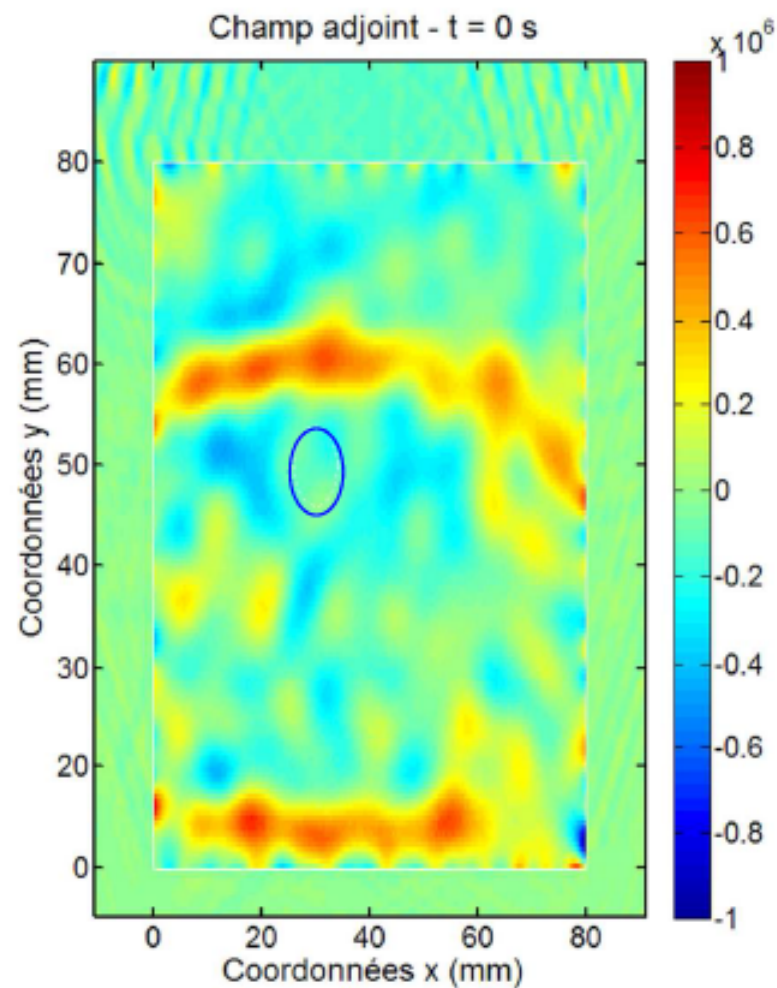
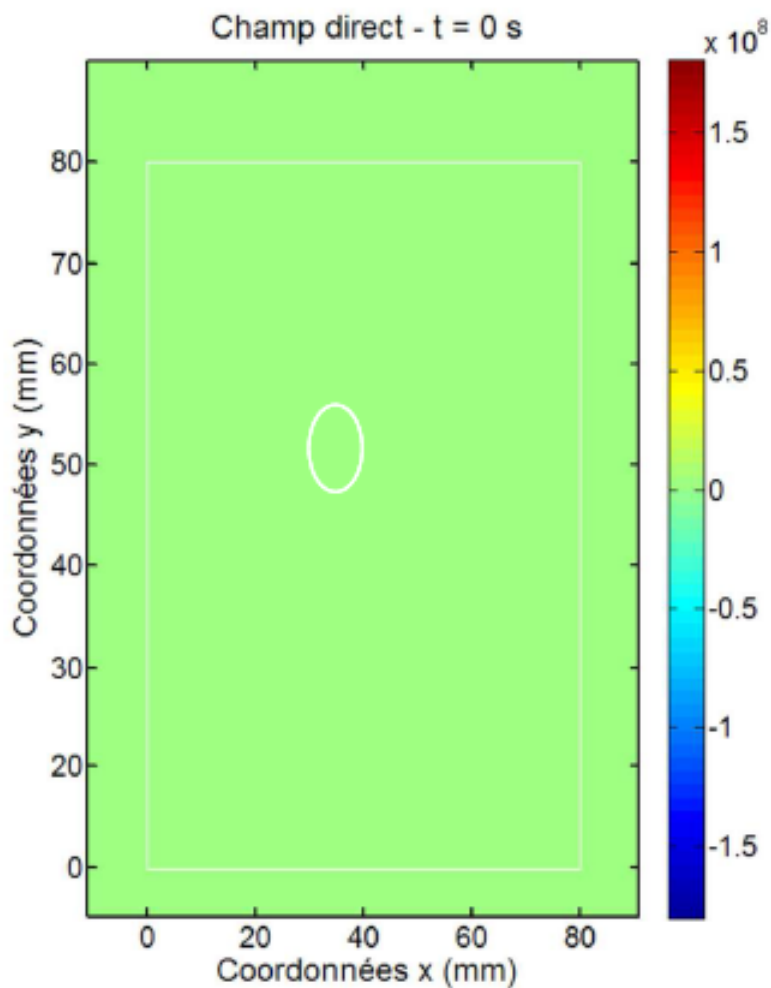
Différentielle de l' E_Q

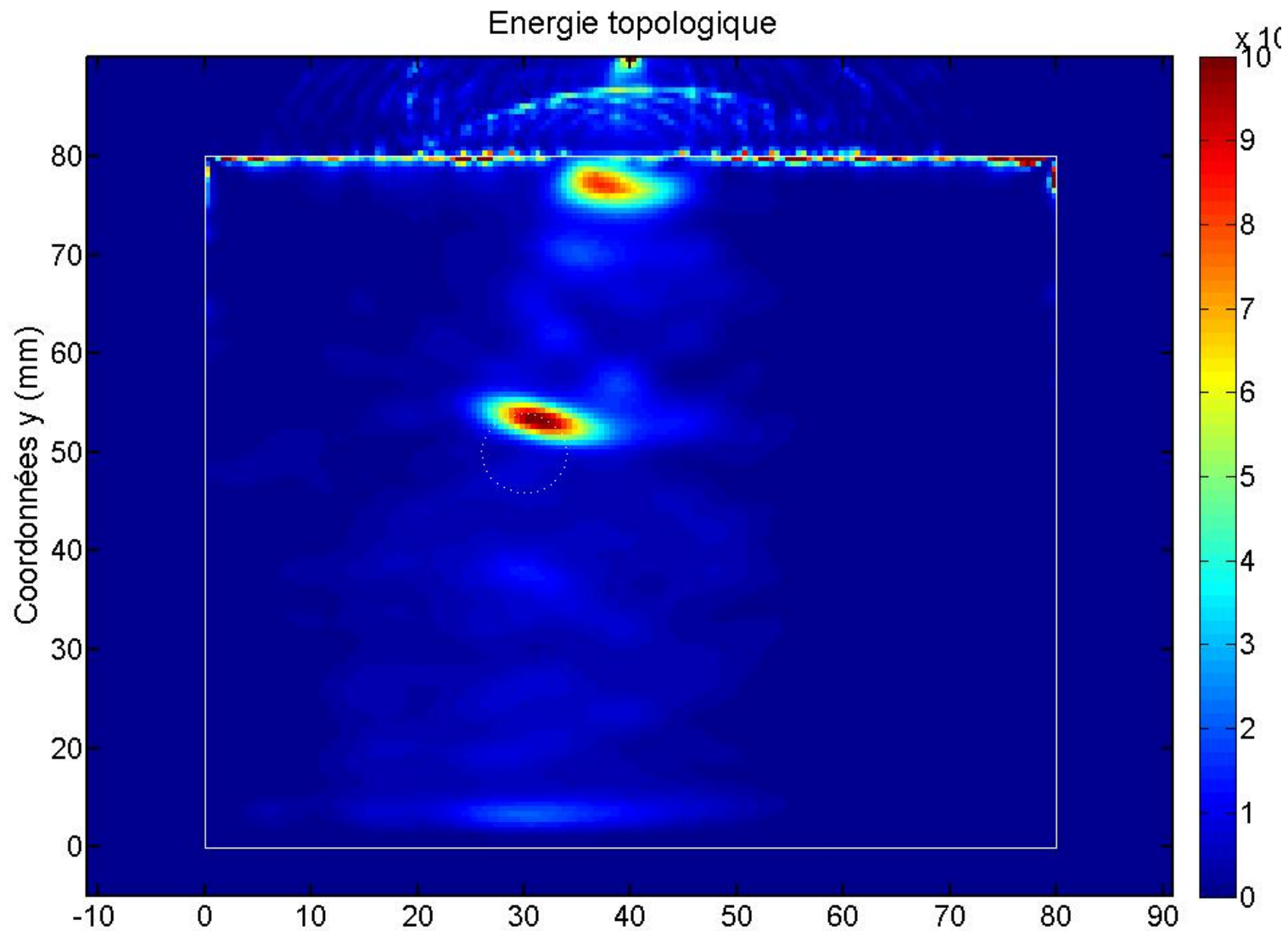
Condition de bord	$f(x)$	$\nabla_u E_Q$
2D Dirichlet	$\frac{2\pi}{\log(\epsilon)}$	$\frac{2\mu(\mu + \eta)}{2\mu + \eta} u_0 v_0$
2D Neumann	$\pi \epsilon^2$	$\frac{(\mu + \eta)}{2\mu\eta} [4\mu\sigma(u_0) : \varepsilon(v_0) + (\eta - 2\mu) \text{tr}\sigma(u_0) \cdot \text{tr}\varepsilon(v_0)]$

Garreau, SIAM JCO 2001

En pratique :
Energie topologique

$$\nabla_u E_Q \approx \frac{1}{2} \int_0^T \|u_0(x, t)\|^2 \cdot \|v_0(x, t)\|^2 dt$$





■ Rappel de la problématique

■ Développer une méthodologie

- 1) d'imagerie et de détection de petits objets (jusqu'à l'ordre du mm)
- 2) d'imagerie de défauts de forme et d'intégrité (fissures, fluage...)

■ Approches envisagées et étudiées

■ Approche tomographique

■ Approche différentielle

■ Application à la détection de fissures au niveau de soudures

Merci aux personnes impliquées dans le travail de thèse d'Emma LUBEIGT, doctorante :

Clément VASSEUR, CDD au CNRS/LMA

Gilles Gobillot, Ingénieur au CEA Cadarache

Jean-François Chaix et
Sandrine RAKOTONARIVO du CNRS/LMA Aix