



Approche inverse rapide pour la déconvolution d'images ultrasonores par une PSF variable

Nans Laroche^{a,b}, Ewen Carcreff^a, Sébastien Bourguignon^b, Jérôme Idier^b,
Aroune Duclos^c

^a The Phased Array Company (TPAC), Nantes, France

^b Laboratoire des Sciences du Numériques de Nantes (LS2N), Nantes, France

^c Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (LAUM), Le Mans, France

GIS ENCD-PdL, Laval, France

29 Mars 2019

Collaboration



Nans Laroche, Ewen Carcreff
Imagerie, développement logiciel

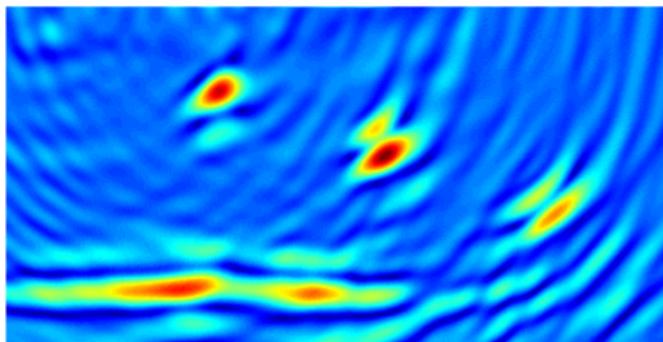
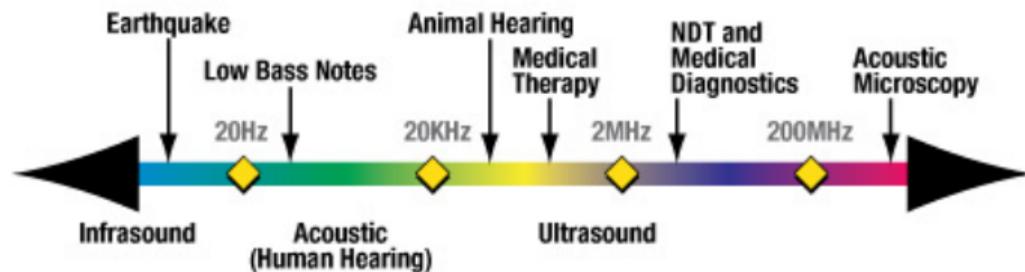
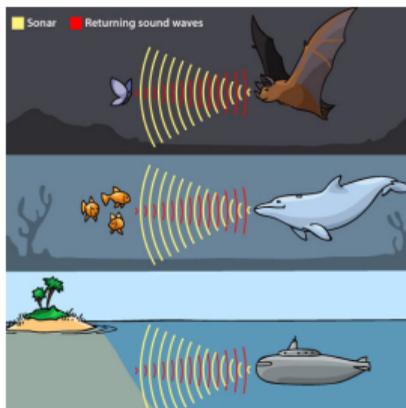


Sébastien Bourguignon, Jérôme Idier
Problèmes inverses, traitement du signal



Aroune Duclos
Acoustique, expérimentations

Imagerie ultrasonore



Contrôle Non Destructif



Imagerie médicale

Technologie



1950s

Inspection mono-élément



1980s

Premier système multi-voies



2000s

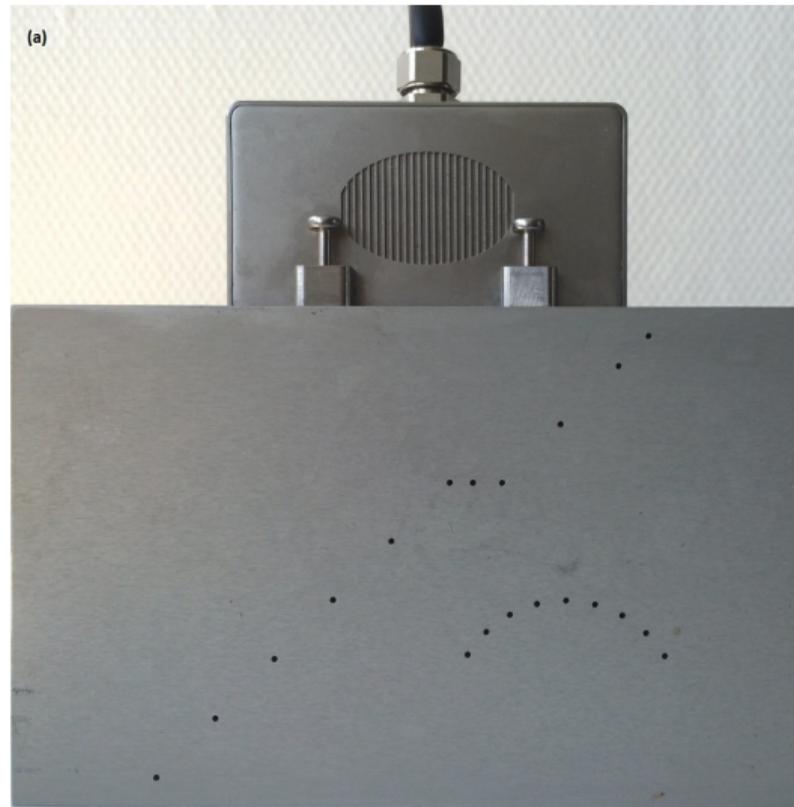
Système d'imagerie médicale



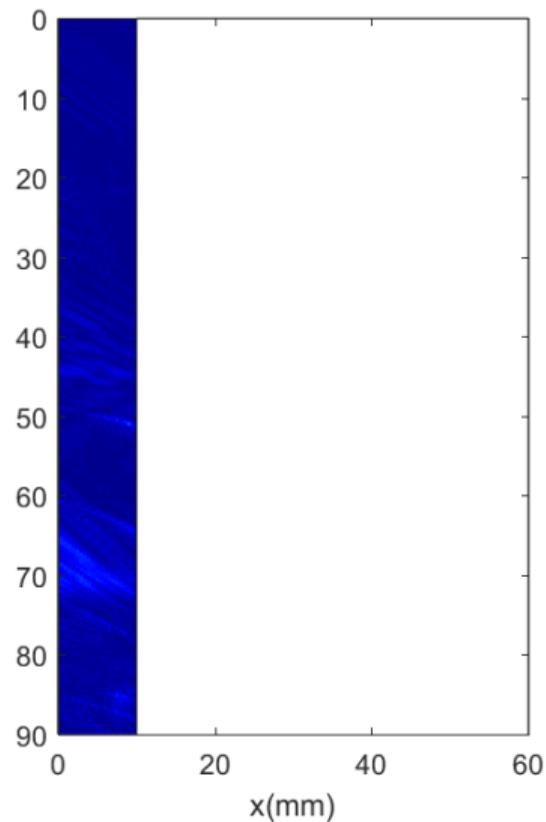
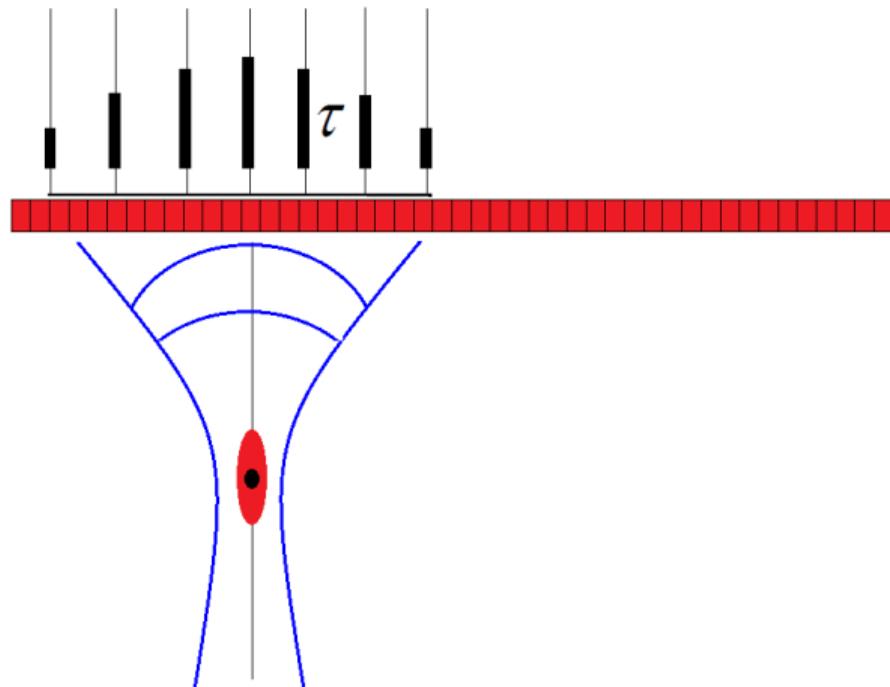
2010s

Pioneer

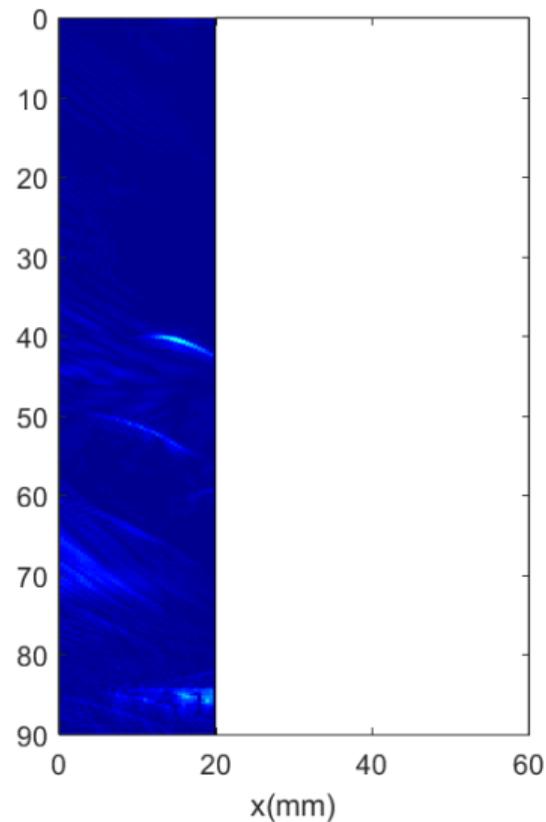
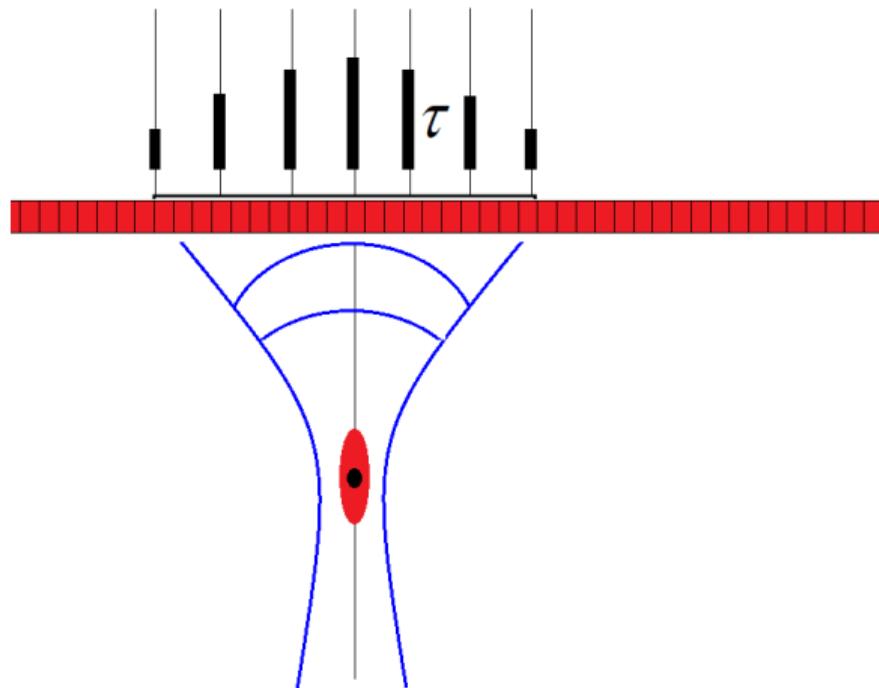
Imagerie conventionnelle



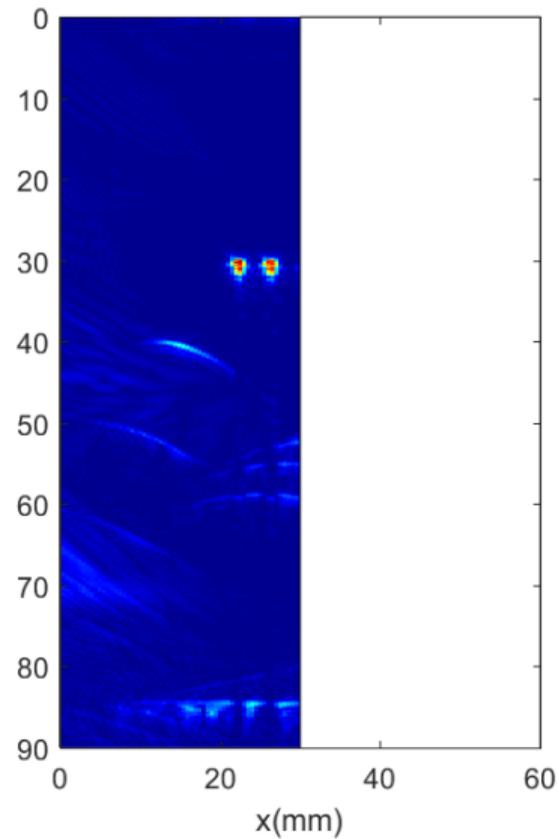
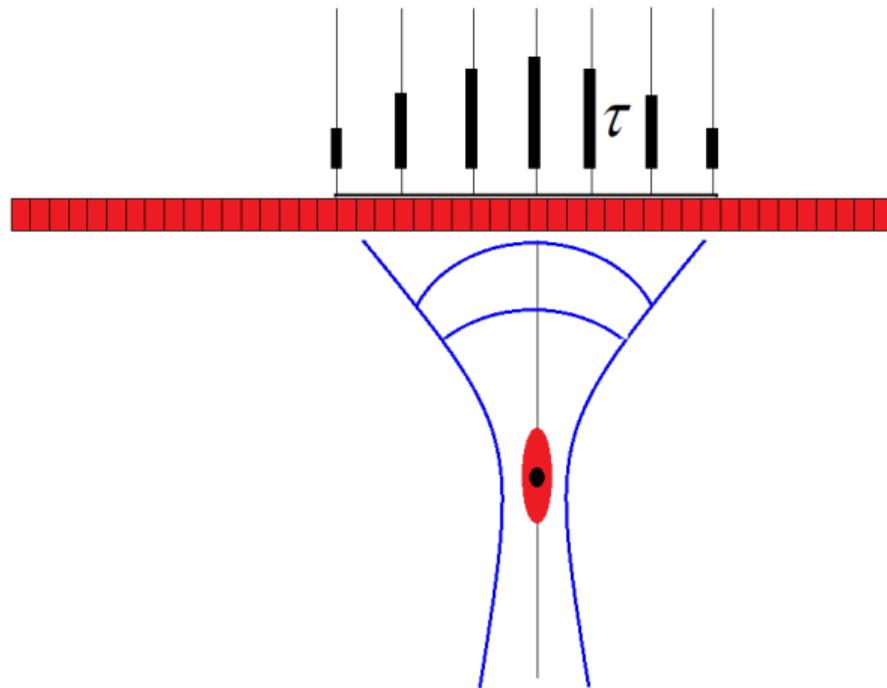
Imagerie conventionnelle



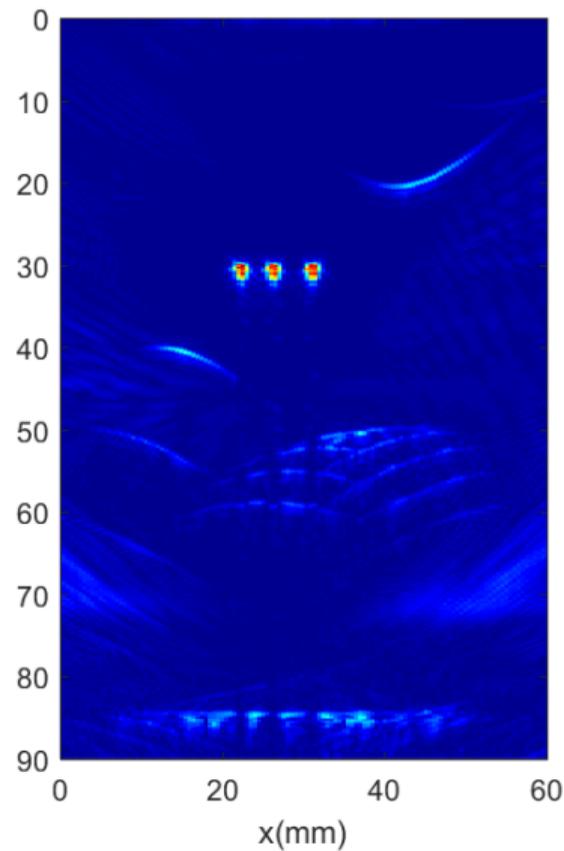
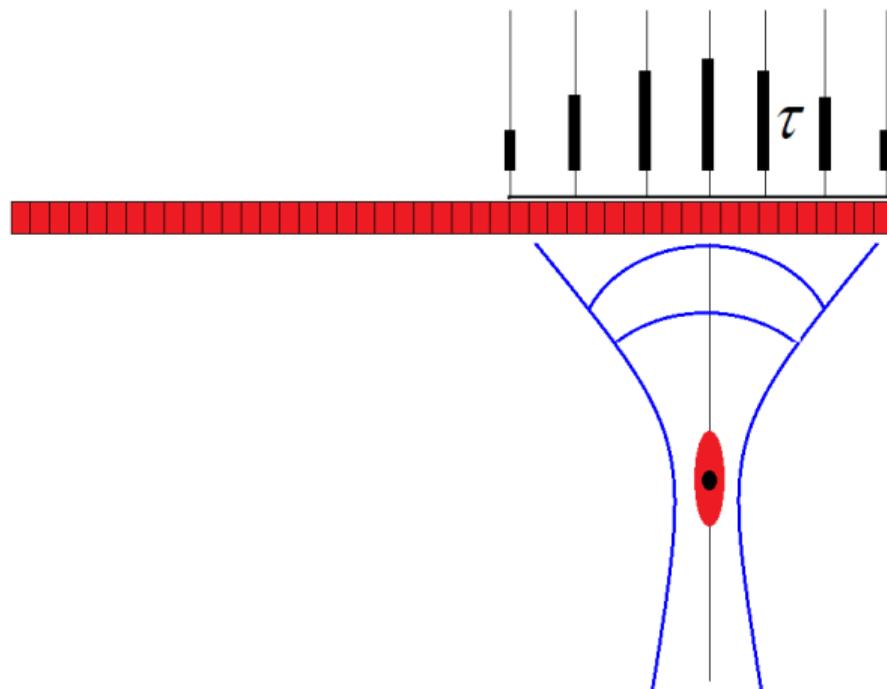
Imagerie conventionnelle



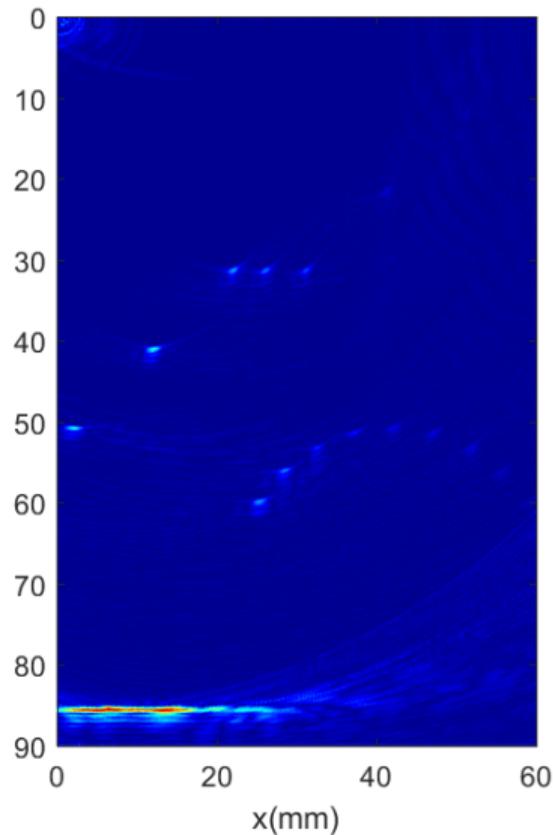
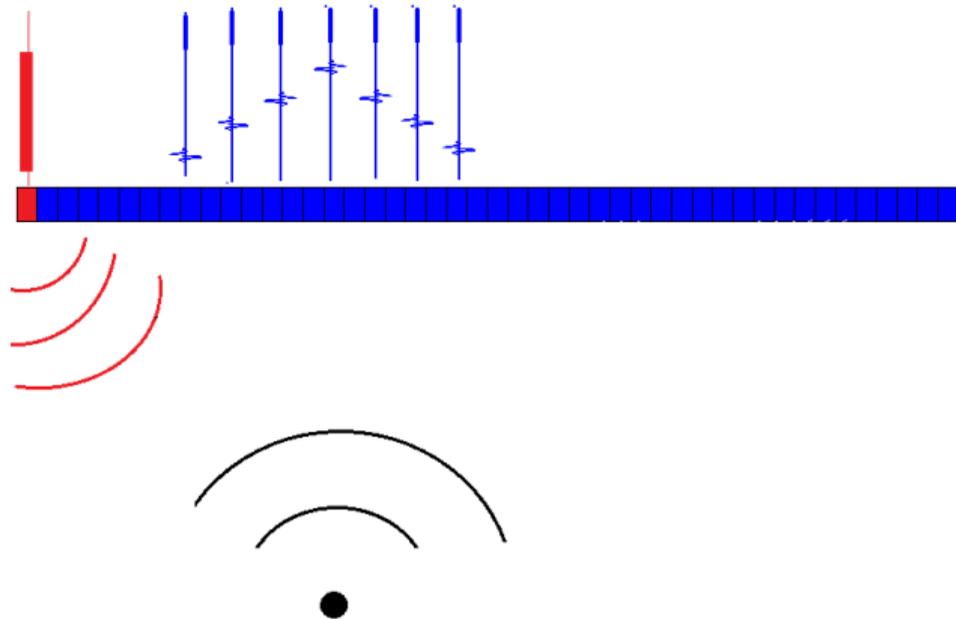
Imagerie conventionnelle



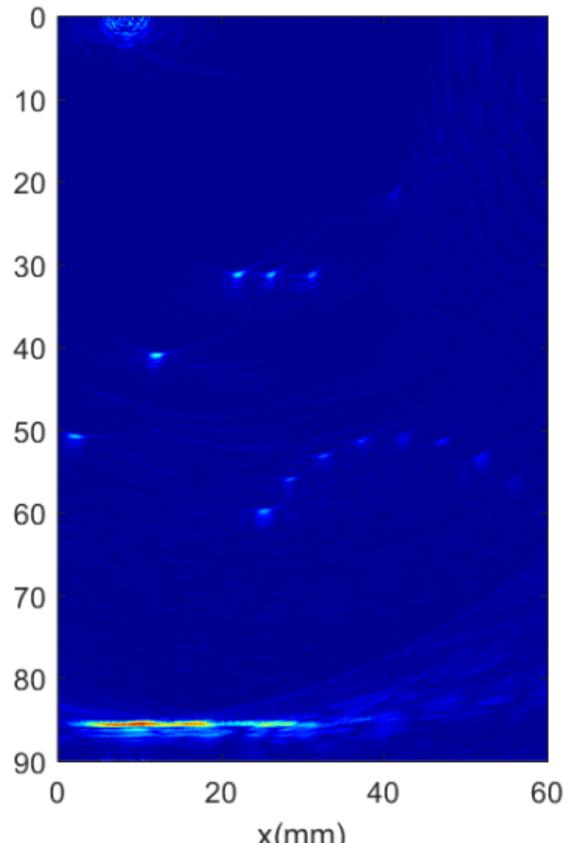
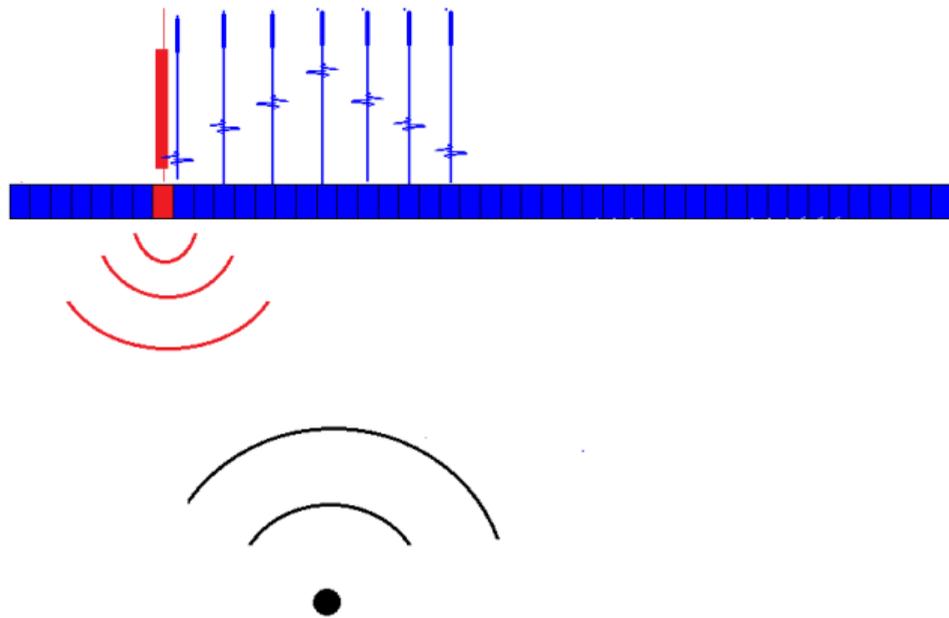
Imagerie conventionnelle



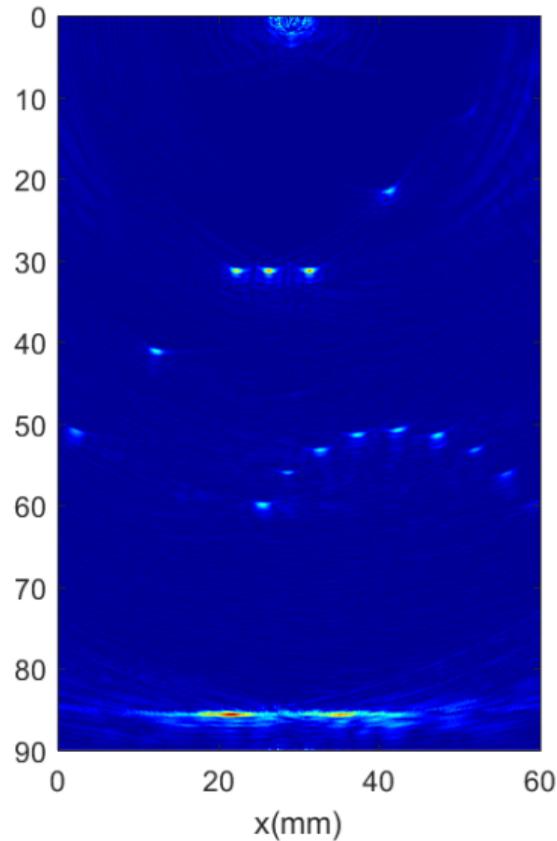
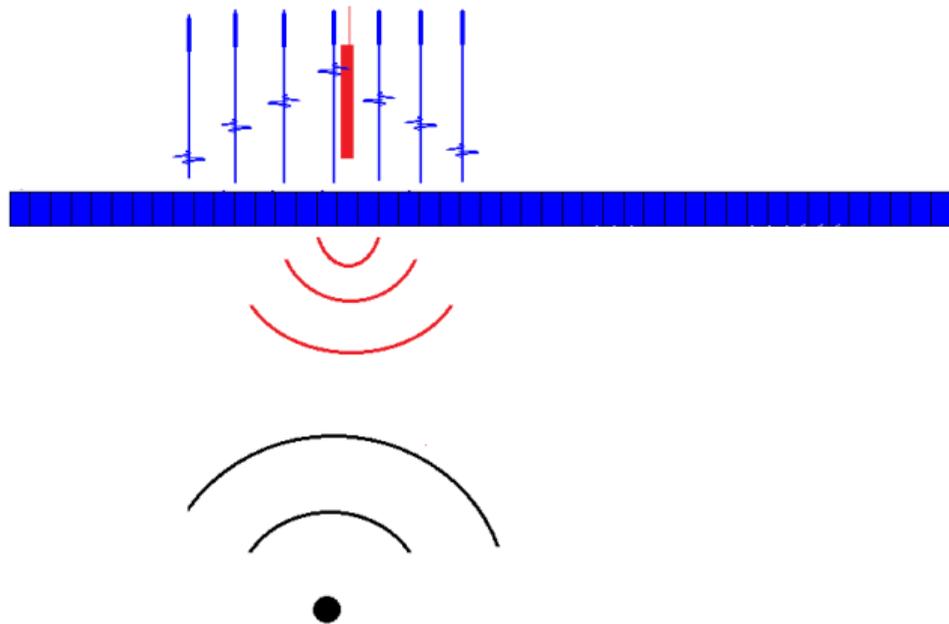
Imagerie FMC : Element 1/64



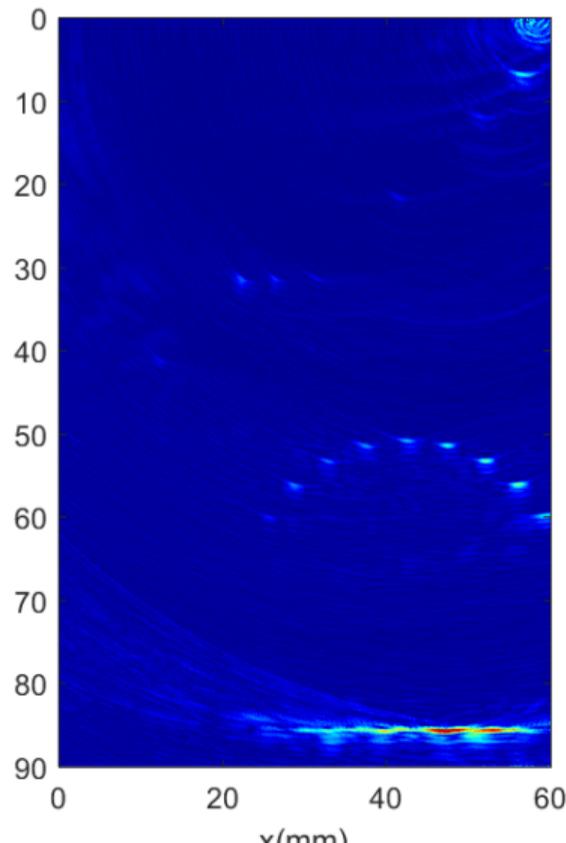
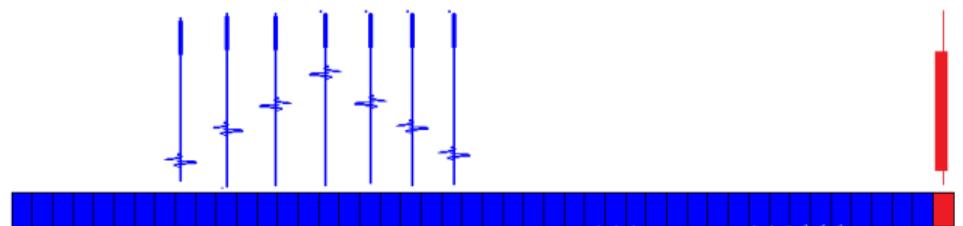
Imagerie FMC : Element 10/64



Imagerie FMC : Element 32/64



Imagerie FMC : Element 64/64



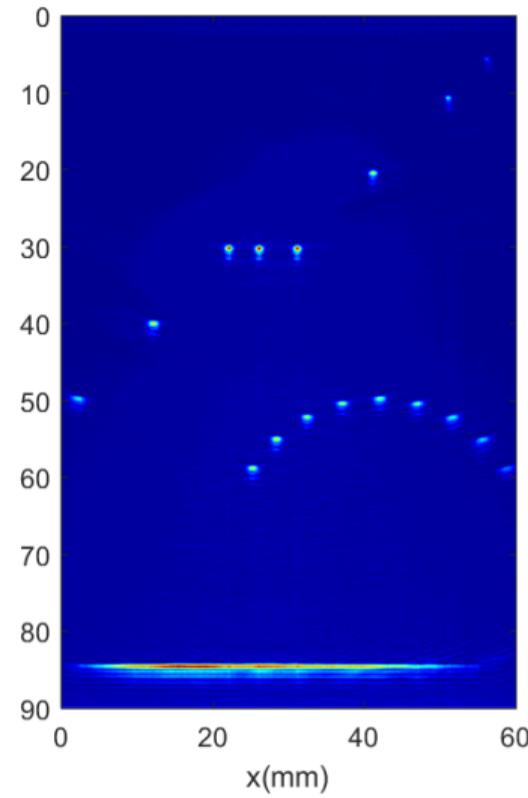
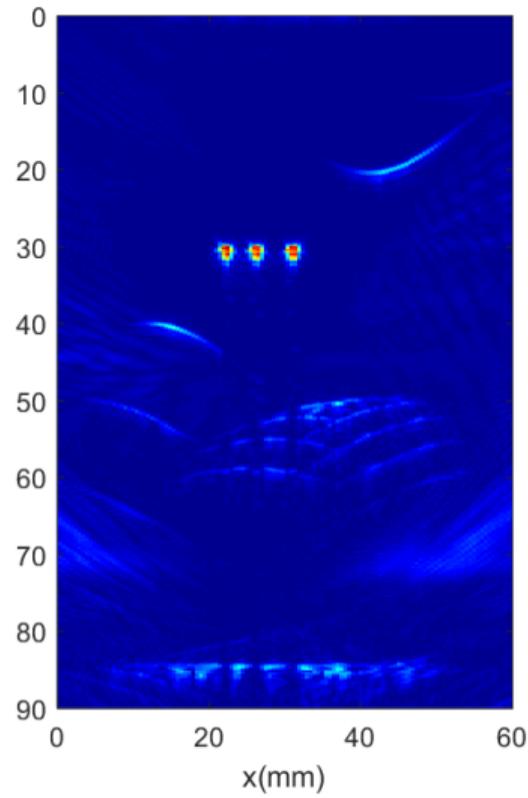
Total Focusing Method

- Acquisition Full Matrix Capture (FMC) ou Full Synthetic Aperture (FSA)^[1] :
- Calcul de temps de vol : $\tau(i, j, x, z)$
- Reconstruction linéaire TFM de O à partir de y ^[2] :

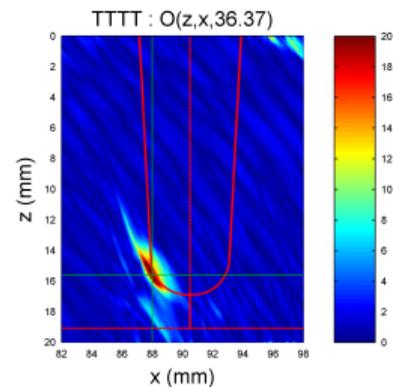
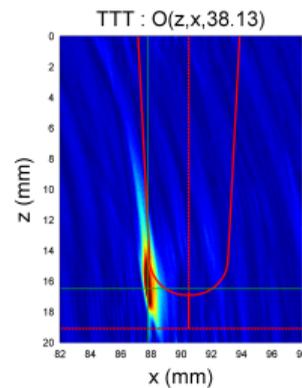
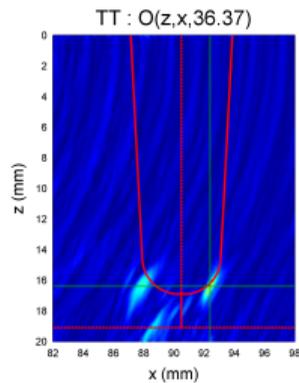
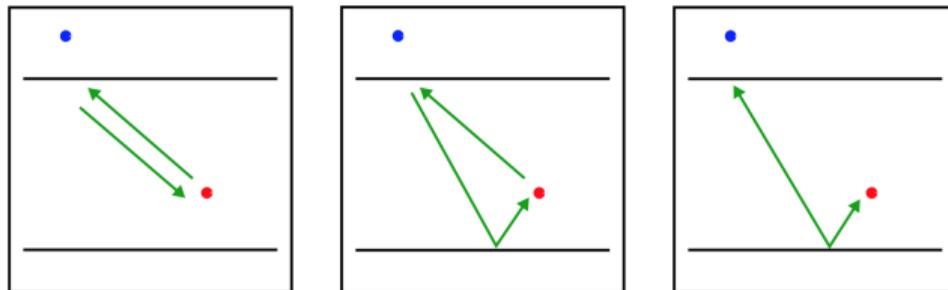
$$O_{\text{TFM}}(x, z) = \sum_{i=1}^{N_{el}} \sum_{j=1}^{N_{el}} y_{i,j} \left(\tau(x, z, i, j) \right)$$

-
1. J.A. JENSEN et al. (2006). « Synthetic aperture ultrasound imaging ». In : *Ultrasonics*
 2. C. HOLMES, B. DRINKWATER et P. WILCOX (2005). « Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation ». In : *NDT&E International*

Imagerie conventionnelle vs Total Focusing Method

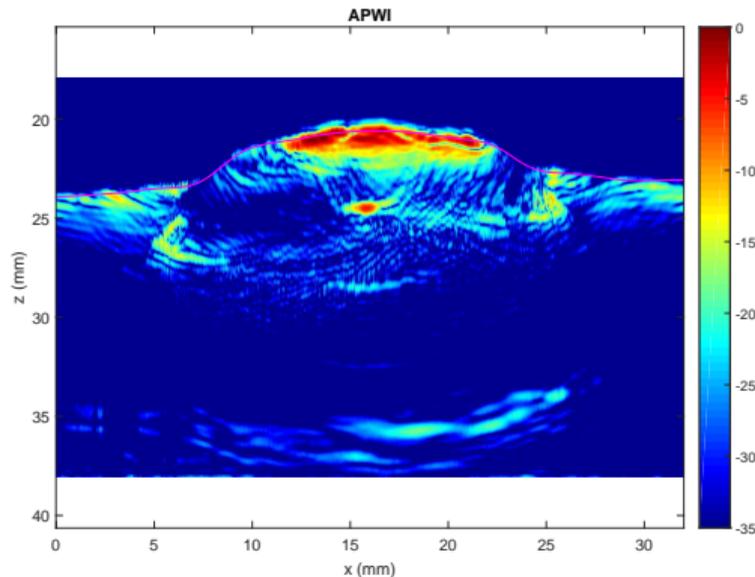


Exemples d'application : Reconstruction utilisant des modes de rebond



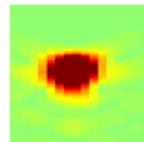
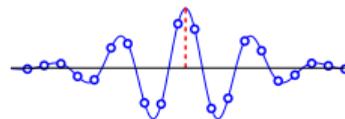
Exemples d'application : Imagerie de pièces à surface complexe

- Détection de la surface et reconstruction avec un seul jeu de données en temps réel



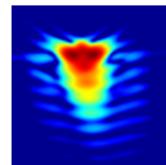
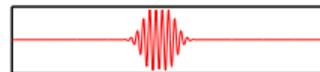
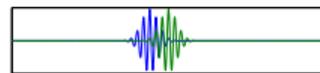
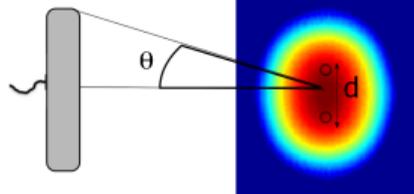
Limitations

- Bande passante limitée \leadsto Imprécision, mauvaise résolution

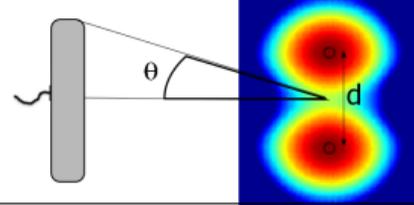


- Défauts proches \leadsto Recouvrement

Non Résolu



Résolu

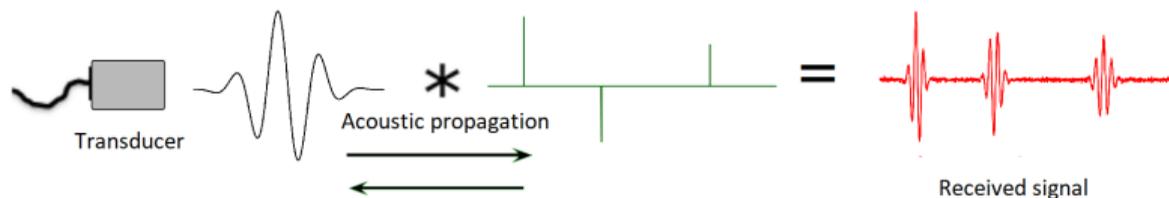


$$\text{Critère de Rayleigh : } d_{\min} = \frac{0.61\lambda}{\sin(\theta)}$$

\leadsto Limite théorique de résolution de la méthode TFM^[3]

3. F. SIMONETTI (2006). « Localization of pointlike scatterers in solids with subwavelength resolution ». In : *Applied Physics Letters*

Modèle direct sur les données



(NB : $\mathbf{o}_{\text{TFM}} = \mathbf{B}^T \mathbf{y}$)

- Modèle de données linéaire PSF $\mathbf{h}_{i,j}^{i_x, i_z}$ [4] : $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{o} + \mathbf{n}$.
- Bande passante limitée des transducteurs \leadsto **Problème mal posé**
- Minimisation d'un critère des moindres carrés pénalisés [5] :

$$J(\mathbf{o}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{o}\|^2 + \phi(\mathbf{o})$$

4. N. LAROCHE et al. (2018). « An inverse approach for ultrasonic imaging by total focusing point for close reflectors separation ». In : *2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*. Kobe, Japan : IEEE

5. J. IDIER (2008). *Bayesian Approach to Inverse Problems*. London, U.K. : ISTE Ltd et John Wiley & Sons Inc

Modèle direct sur l'image TFM

- Formulation d'un modèle direct dans l'espace image à partir des données TFM : \rightsquigarrow **Problème de déconvolution à PSF variable**

- $\mathbf{o}_{\text{TFM}} = \mathbf{B}^T \mathbf{y}$ et $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{o} + \mathbf{n}$. \rightsquigarrow $\mathbf{o}_{\text{TFM}} = \mathbf{B}^T \mathbf{H}\mathbf{o} + \mathbf{n}$.

- + Réduction de la taille du problème.

- + Presque un problème de déconvolution.

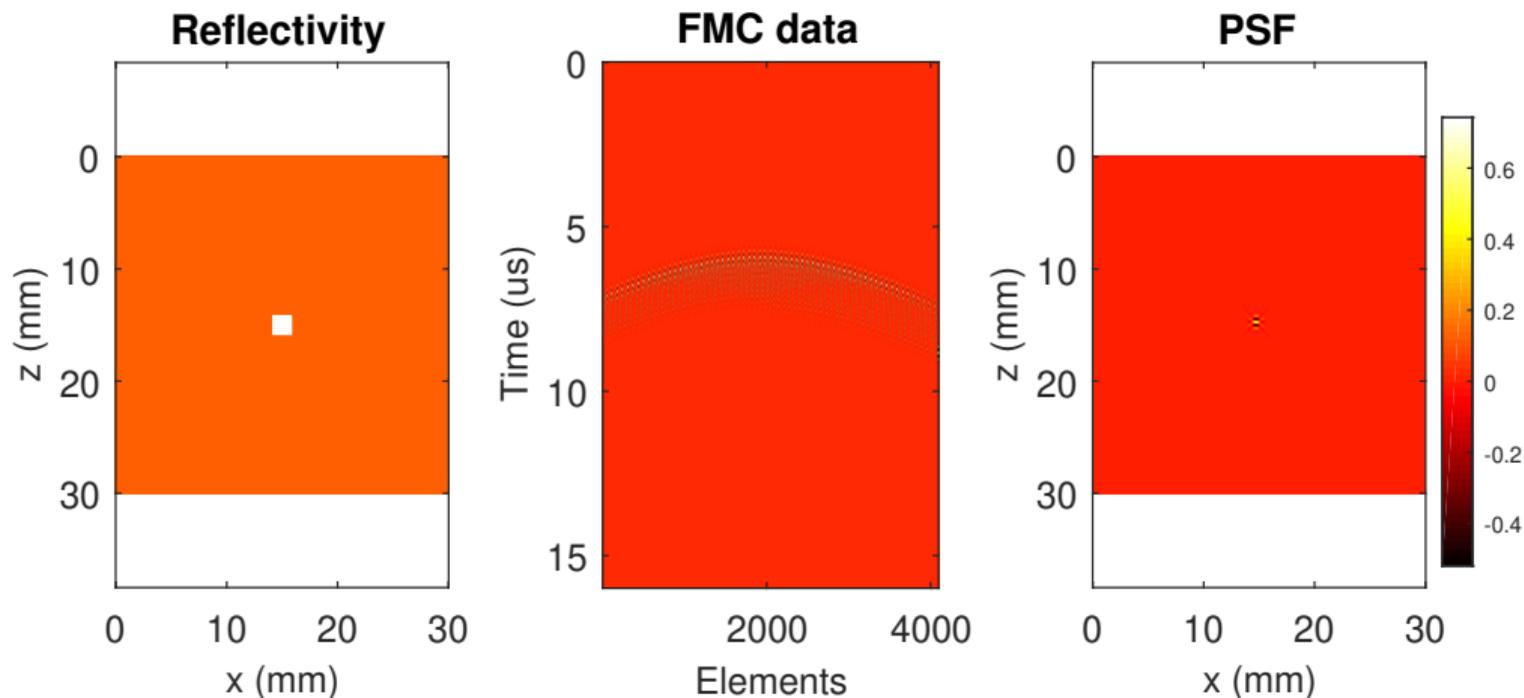
- Perte d'information par rapport aux données temporelles.

- Minimisation d'un critère des moindres carrés pénalisés :

$$J(\mathbf{o}) = \|\mathbf{o}_{\text{TFM}} - \mathbf{B}^T \mathbf{H}\mathbf{o}\|^2 + \phi(\mathbf{o})$$

Calcul d'une PSF

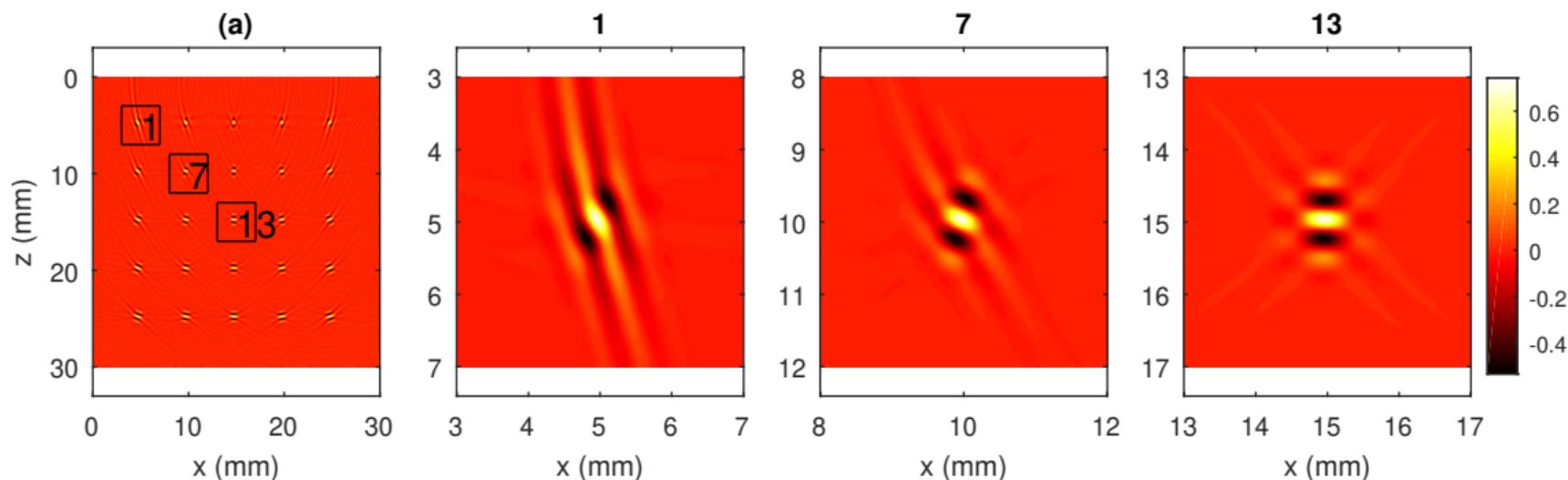
- $\mathbf{B}^T \mathbf{H} \in \mathbb{R}^{N_x N_z \times N_x N_z}$ contient l'image TFM associée à un réflecteur ponctuel pour chaque pixel.



Modèle de déconvolution à PSF variable

- Complexité de calcul des PSF : $O(N_{el}^2 N_t (N_x N_z)^2) \rightsquigarrow$ Problème de complexité et de stockage

⇒ Hypothèse : La variation spatiale des PSF est lente, on peut interpoler quelques PSF espacées dans l'image^[6].



Calcul de convolution rapide par FFT

La PSF est approximée en tout point :

$$h_{r_0}(\mathbf{r}) \approx \sum_{i=1}^{N_{\text{PSF}}} w_i(\mathbf{r}_0) h_i(\mathbf{r}).$$

(avec $\mathbf{o}_i(\mathbf{r}) = w_i(\mathbf{r}) \mathbf{o}(\mathbf{r})$)

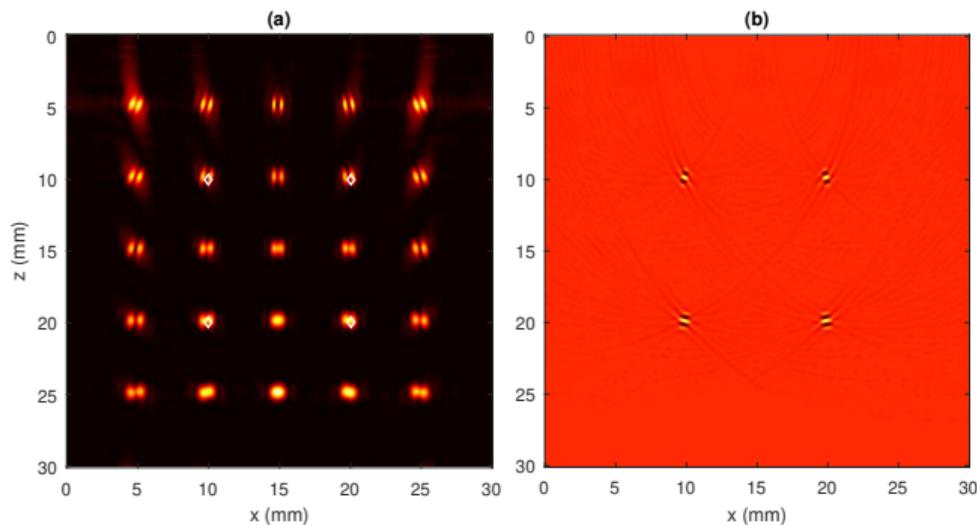
$$(\mathbf{H}_s \mathbf{o})(\mathbf{r}_0) = \sum_{\mathbf{r}} h_{\mathbf{r}}(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}) \mathbf{o}(\mathbf{r}) \approx \sum_{i=1}^{N_{\text{PSF}}} (h_i * \mathbf{o}_i)(\mathbf{r}_0)$$

D'où

$$\mathbf{H}_s \mathbf{o} \approx \sum_{i=1}^{N_{\text{PSF}}} \mathbf{H}_i \mathbf{W}_i \mathbf{o} \quad \text{et} \quad \mathbf{H}_s^t \mathbf{y} \approx \sum_{i=1}^{N_{\text{PSF}}} \mathbf{W}_i \mathbf{H}_i^t \mathbf{y},$$

où \mathbf{H}_i désigne la matrice de convolution discrète associée à la PSF h_i et \mathbf{W}_i est la matrice diagonale contenant les poids w_i .

Résultats synthétiques



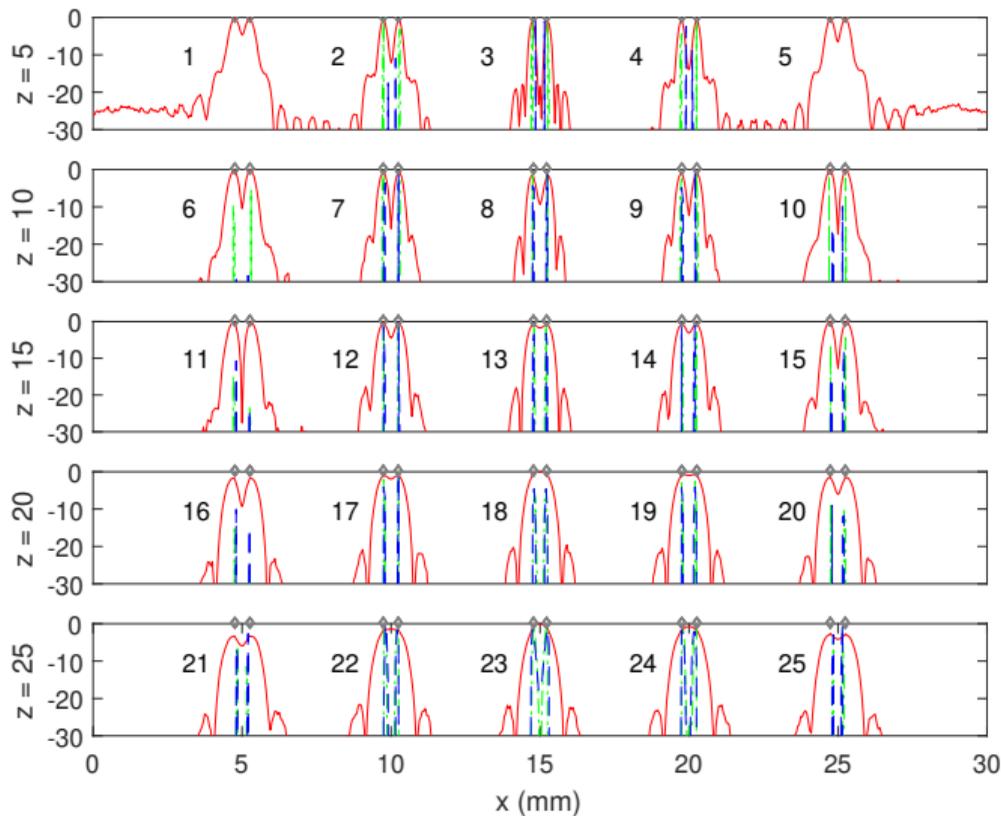
Sonde : contact, 64 elements, 5 MHz,
pitch 0.5 mm

Matériau : Vitesse 5000 m/s

Défauts : Distance 0.5 mm

Longueur d'onde : $\lambda = 1$ mm

Résultats synthétiques

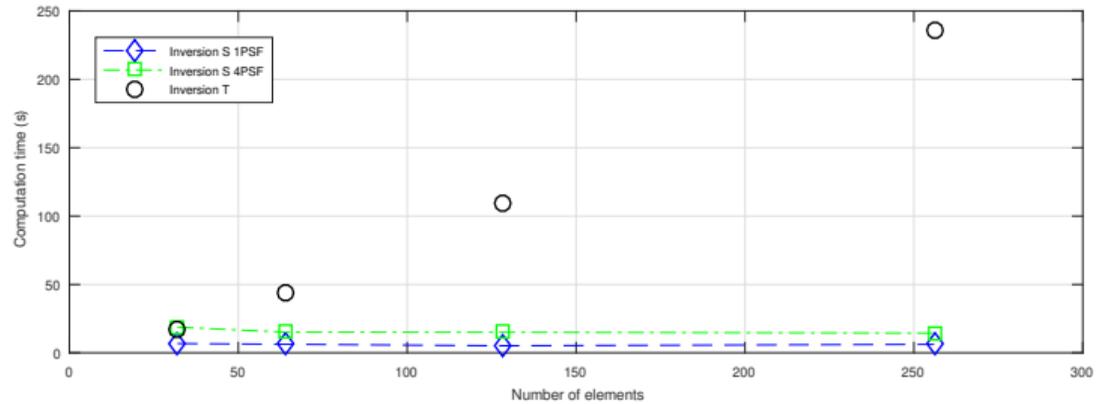
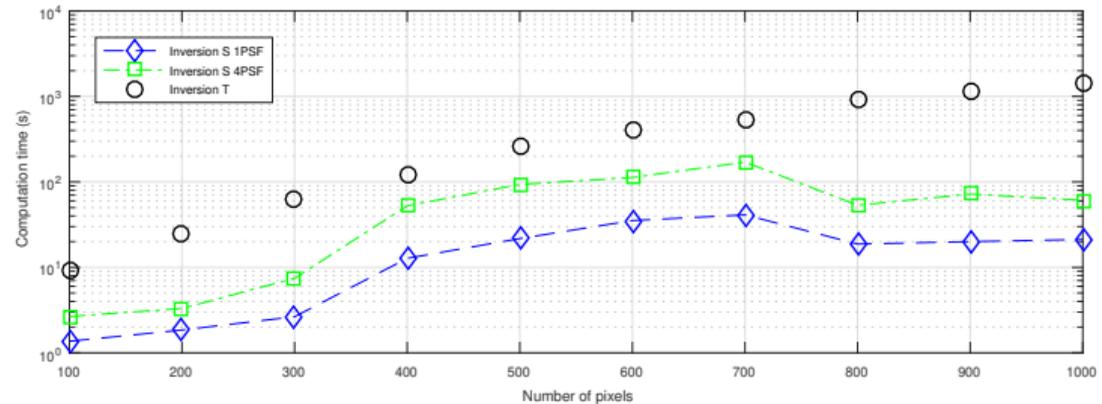


(-) TFM

(-) Inversion 1 PSF

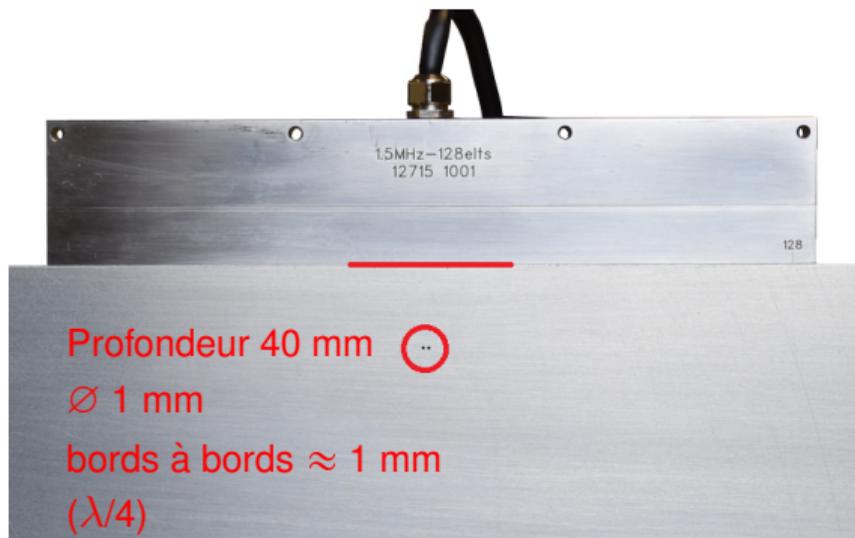
(-) Inversion 4 PSF

Résultats synthétiques



(○) Inversion T
 (—) Inversion S
 1 PSF
 (—) Inversion S
 4 PSF

Séparation de 2 défauts proches 1.5 MHz



Sonde : contact, 128 éléments (32 utilisés)
1.5 MHz, pitch 2 mm

Matériau : Aluminium

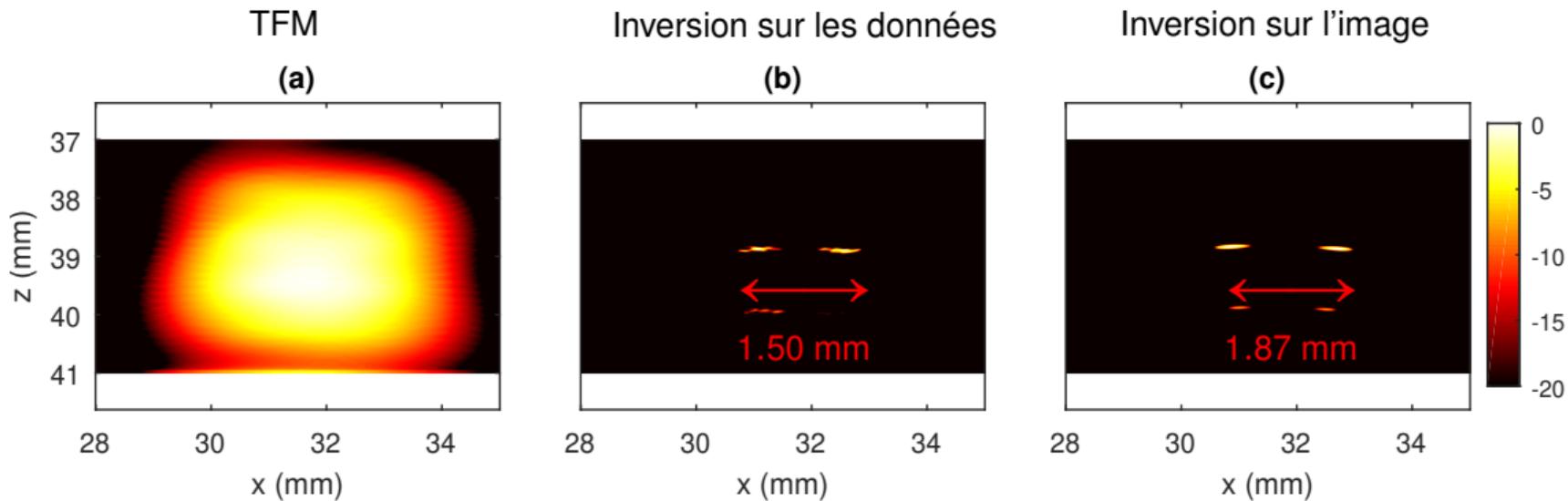
Défauts : *Side Drilled Hole* (SDH) ∅ 1.0 mm

Longueur d'onde : $\lambda = 4.2$ mm

Critère de Rayleigh : 0.97λ

PSF : Modèle d'écho gaussien

Image de 2 défauts proches 1.5 MHz



↔ Rayleigh/4

Conclusions et perspectives

Conclusions :

- Approches problèmes inverses utilisant un modèle linéaire et de la parcimonie.
- Meilleures performances pour la séparation des défauts proches.

Autres applications possibles :

- Détection (débruitage, bruit de structure, *etc.*).
- Localisation de défauts.
- Modèles valides pour tout types d'imagerie (PWI, CWI, *etc.*).

Perspectives :

- Application à des cas réels de fissure proche de la surface.
- Application de modèles de propagation pour l'imagerie de matériau complexes.

Merci de votre attention

Nans Laroche

`nans.laroche@tpac-ndt.com`

