

Imagerie rapide de guides d'ondes cylindriques d'accès restreint basée sur un formalisme modal

Matthieu GALLEZOT, Fabien TREYSSÈDE, Laurent LAGUERRE

IFSTTAR, GERS/GeoEND, 44344 Bouguenais, France

Mardi 6 Novembre 2018, GdR MecaWave, Fréjus



Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Méthode de l'imagerie topologique
- 3 Résultats en guide fermé
- 4 Origine des artefacts en imagerie multimodale
- 5 Réduction de l'amplitude des artefacts
- 6 Résultats en guide ouvert
- 7 Conclusion

Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Méthode de l'imagerie topologique
- 3 Résultats en guide fermé
- 4 Origine des artefacts en imagerie multimodale
- 5 Réduction de l'amplitude des artefacts
- 6 Résultats en guide ouvert
- 7 Conclusion

Contexte

Contrôle Non Destructif (CND) par ondes guidées dans le génie civil : structures élancées, partiellement ou totalement enfouies (*guide ouvert* : direction transverse non bornée)



Câble de précontrainte



Tirant d'ancrage

Actuellement :

- Inspection des structures et détection de défauts échogènes par temps de vol¹
- Développement de modèles numériques pour l'analyse physique **basés sur un formalisme modal** : calcul des courbes de dispersion², de la propagation³ (réponse forcée) et de la diffraction des ondes guidées

1. Laguerre et Treyssède, Europ. J. Env. Civ. Eng. 2011

2. Nguyen *et al.*, J. Sound Vib. 2015

3. Gallezot *et al.*, J. Comp. Phys. 2018

Intérêt pour une méthode d'imagerie et difficultés associées

Information recherchée

Localisation de défauts abrupts (fissures, cavités...) dans un guide élastique ouvert, le long de l'axe et dans la section du guide

Difficultés

Des phénomènes de propagation complexes... :

- onde dispersive (variation de la vitesse avec la fréquence)
- onde multimodale

... mais qui contiennent beaucoup d'informations !

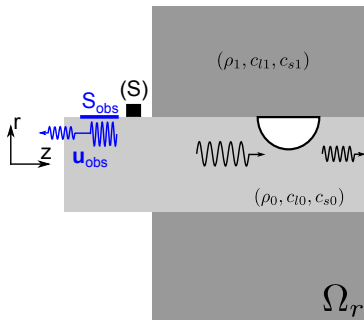
+ atténuation par fuites (rayonnement) dans le milieu environnant

+ accès limité à la structure : configuration en réflexion (*backscattering*)

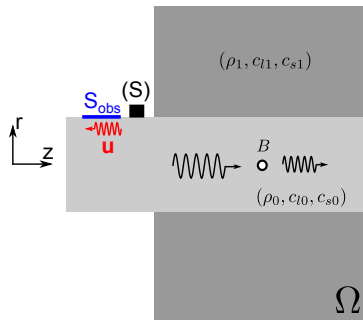
Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Méthode de l'imagerie topologique
 - Cadre du problème inverse
 - Gradient topologique
 - Le formalisme modal pour une imagerie rapide
- 3 Résultats en guide fermé
- 4 Origine des artefacts en imagerie multimodale
- 5 Réduction de l'amplitude des artefacts
- 6 Résultats en guide ouvert
- 7 Conclusion

Cadre du problème inverse



Milieu réel Ω_r (expé ou synthèse)



Milieu approché Ω (à optimiser)

Fonctionnelle de coût (domaine fréquentiel)

Minimiser

$$j(\Omega) = J(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} \int_{\mathbb{R}^+} \int_{S_{obs}} |\mathbf{u}(\mathbf{x}, \Omega, \omega) - \mathbf{u}_{obs}(\omega)|^2 dS_{obs} d\omega \quad (1)$$

c.à.d identifier la répartition de défauts réelle dans le milieu

Gradient topologique

Développement de la fonctionnelle pour un petit changement de topologie du milieu ⁴ :

$$j(\Omega) - j(\Omega_0) = f(\epsilon)g(\mathbf{x}) + o(f(\epsilon)), \quad \forall \mathbf{x} \in \Omega_0, (\epsilon \rightarrow 0), f(\epsilon) > 0 \quad (2)$$

Ω_0 : milieu **supposé connu** et sans défaut (à l'itération 0)

4. Bonnet, Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. 2006 ; Dominguez, Wave Motion *et al.*, 2005

Gradient topologique

Développement de la fonctionnelle pour un petit changement de topologie du milieu⁴ :

$$j(\Omega) - j(\Omega_0) = f(\epsilon)g(\mathbf{x}) + o(f(\epsilon)), \quad \forall \mathbf{x} \in \Omega_0, (\epsilon \rightarrow 0), f(\epsilon) > 0 \quad (2)$$

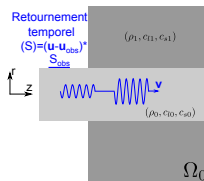
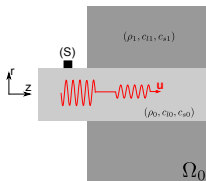
Ω_0 : milieu **supposé connu** et sans défaut (à l'itération 0)

Gradient topologique $g(\mathbf{x})$

Sensibilité de la fonctionnelle à l'inclusion d'un défaut en tout point $\mathbf{x} \in \Omega_0$.

Image obtenue = représentation spatiale du gradient. Dépend du **champ direct** et du **champ adjoint** :

$$g(\mathbf{x}) = \operatorname{Re} \left(\int_{\mathbb{R}^+} [\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{v}) : (\mathcal{A} : \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u})) - \rho\omega^2 \mathbf{v} \cdot \mathbf{u}] d\omega \right), \forall \mathbf{x} \in \Omega_0 \quad (3)$$

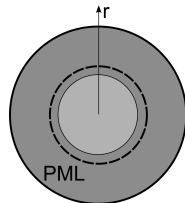


4. Bonnet, Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. 2006 ; Dominguez, Wave Motion et al., 2005

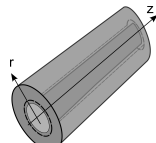
Formalisme modal pour une imagerie rapide : calcul des modes

- Guide fermé : section bornée
 - Guide ouvert : section initialement non bornée → troncature par une couche PML
- ① Équations harmoniques d'équilibre élastodynamique :

$$\begin{cases} \nabla \cdot \tilde{\sigma}(\tilde{\mathbf{u}}) + \tilde{\rho}\omega^2\tilde{\mathbf{u}} = \tilde{\mathbf{0}} \\ \tilde{\sigma}(\tilde{\mathbf{u}}) = \tilde{\mathbf{C}} : \tilde{\epsilon}(\tilde{\mathbf{u}}), \tilde{\epsilon}(\tilde{\mathbf{u}}) = (\nabla\tilde{\mathbf{u}} + (\nabla\tilde{\mathbf{u}})^T)/2 \end{cases} \quad (4)$$



section avec PML



Formalisme modal pour une imagerie rapide : calcul des modes

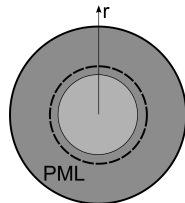
- Guide fermé : section bornée
- Guide ouvert : section initialement non bornée → troncature par une couche PML

① Équations harmoniques d'équilibre élastodynamique :

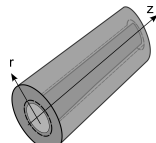
$$\begin{cases} \nabla \cdot \tilde{\sigma}(\tilde{\mathbf{u}}) + \tilde{\rho}\omega^2\tilde{\mathbf{u}} = \tilde{\mathbf{0}} \\ \tilde{\sigma}(\tilde{\mathbf{u}}) = \tilde{\mathbf{C}} : \tilde{\epsilon}(\tilde{\mathbf{u}}), \tilde{\epsilon}(\tilde{\mathbf{u}}) = (\nabla\tilde{\mathbf{u}} + (\nabla\tilde{\mathbf{u}})^T)/2 \end{cases} \quad (4)$$

② Transformée de Fourier Spatiale ($z \rightarrow k$) (propagation : e^{jkz})

$$\hat{\mathbf{u}}(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{u}(z)e^{-jkz} dz \quad (5)$$



section avec PML



Formalisme modal pour une imagerie rapide : calcul des modes

- Guide fermé : section bornée
- Guide ouvert : section initialement non bornée → troncature par une couche PML

① Équations harmoniques d'équilibre élastodynamique :

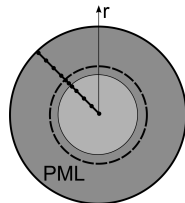
$$\begin{cases} \tilde{\nabla} \cdot \tilde{\sigma}(\tilde{\mathbf{u}}) + \tilde{\rho}\omega^2\tilde{\mathbf{u}} = \tilde{\mathbf{0}} \\ \tilde{\sigma}(\tilde{\mathbf{u}}) = \tilde{\mathbf{C}} : \tilde{\epsilon}(\tilde{\mathbf{u}}), \tilde{\epsilon}(\tilde{\mathbf{u}}) = (\nabla\tilde{\mathbf{u}} + (\nabla\tilde{\mathbf{u}})^T)/2 \end{cases} \quad (4)$$

② Transformée de Fourier Spatiale ($z \rightarrow k$) (propagation : e^{jkz})

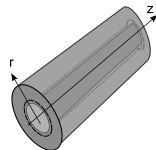
$$\hat{\mathbf{u}}(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{u}(z)e^{-jkz} dz \quad (5)$$

③ Discrétisation EF de la section du guide avec PML :

$$\left(\mathbf{K}_1 - \omega^2\mathbf{M} + jk(\mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_2^T) + k^2\mathbf{K}_3 \right) \hat{\mathbf{U}} = \hat{\mathbf{0}} \quad (6)$$



Discrétisation de la section avec PML



Formalisme modal pour une imagerie rapide : calcul des modes

- Guide fermé : section bornée
- Guide ouvert : section initialement non bornée → troncature par une couche PML

① Équations harmoniques d'équilibre élastodynamique :

$$\begin{cases} \tilde{\nabla} \cdot \tilde{\sigma}(\tilde{\mathbf{u}}) + \tilde{\rho}\omega^2\tilde{\mathbf{u}} = \tilde{\mathbf{0}} \\ \tilde{\sigma}(\tilde{\mathbf{u}}) = \tilde{\mathbf{C}} : \tilde{\epsilon}(\tilde{\mathbf{u}}), \tilde{\epsilon}(\tilde{\mathbf{u}}) = (\nabla\tilde{\mathbf{u}} + (\nabla\tilde{\mathbf{u}})^T)/2 \end{cases} \quad (4)$$

② Transformée de Fourier Spatiale ($z \rightarrow k$) (propagation : e^{jkz})

$$\hat{\mathbf{u}}(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{u}(z)e^{-jkz} dz \quad (5)$$

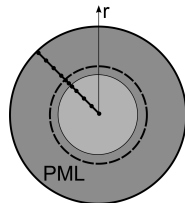
③ Discrétisation EF de la section du guide avec PML :

$$\left(\mathbf{K}_1 - \omega^2 \mathbf{M} + jk(\mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_2^T) + k^2 \mathbf{K}_3 \right) \hat{\mathbf{U}} = \hat{\mathbf{0}} \quad (6)$$

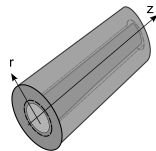
④ Linéarisation (PVP linéaire) :

$$(\mathbf{A} - k\mathbf{B})\mathbf{x} = \hat{\mathbf{0}} \text{ avec } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{U}} \\ k\hat{\mathbf{U}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_3, \mathbf{M}$ symétriques \Rightarrow paires (k_m, \mathbf{U}_m) et $(k_{-m}, \mathbf{U}_{-m})$,
($m = 1, \dots, M$).



Discrétisation de la section avec PML



Solutions par formalisme modal

Problème de synthèse

Simulation du champ réel : réponse forcée + diffraction des ondes guidées

Solutions par formalisme modal

Problème de synthèse

Simulation du champ réel : réponse forcée + diffraction des ondes guidées

Problèmes direct et adjoint

Milieu sain (itération 0) → pas de défaut, **seulement problème de réponse forcée**

- ① Calcul de la base modale (coûteux mais réalisé seulement une fois)
- ② Problèmes avec source : $(\mathbf{K}_1 - \omega^2 \mathbf{M} + jk(\mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_2^T) + k^2 \mathbf{K}_3) \hat{\mathbf{U}} = \hat{\mathbf{F}}(k)$, avec :

$$\text{Problème direct : } \mathbf{F}_u(z, \omega) = \mathbf{F}_u f(\omega) \delta(z - z_s) \Rightarrow \hat{\mathbf{F}}_u(k) = \mathbf{F}_u f(\omega) e^{jkz_s}$$

$$\text{Problème adjoint : } \mathbf{F}_v(z, \omega) = \sum_{i=1}^N \mathbf{F}_{v_i}(\omega) \delta(z - z_i) \Rightarrow \hat{\mathbf{F}}_v(k) = \sum_{i=1}^N \mathbf{F}_{v_i}(\omega) e^{jkz_i}$$

Solutions par formalisme modal

Problème de synthèse

Simulation du champ réel : réponse forcée + diffraction des ondes guidées

Problèmes direct et adjoint

Milieu sain (itération 0) → pas de défaut, **seulement problème de réponse forcée**

- ① Calcul de la base modale (coûteux mais réalisé seulement une fois)
- ② Problèmes avec source : $(\mathbf{K}_1 - \omega^2 \mathbf{M} + jk(\mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_2^T) + k^2 \mathbf{K}_3) \hat{\mathbf{U}} = \hat{\mathbf{F}}(k)$, avec :

$$\text{Problème direct : } \mathbf{F}_u(z, \omega) = \mathbf{F}_u f(\omega) \delta(z - z_s) \Rightarrow \hat{\mathbf{F}}_u(k) = \mathbf{F}_u f(\omega) e^{jkz_s}$$

$$\text{Problème adjoint : } \mathbf{F}_v(z, \omega) = \sum_{i=1}^N \mathbf{F}_{vi}(\omega) \delta(z - z_i) \Rightarrow \hat{\mathbf{F}}_v(k) = \sum_{i=1}^N \mathbf{F}_{vi}(\omega) e^{jkz_i}$$

Solutions par décomposition modale :

$$\mathbf{U}(z, \omega) = \sum_{m=1}^M \mathbf{E}_m \hat{\mathbf{F}}_u(k_m(\omega)) e^{jk_m z}, \quad \mathbf{V}(z, \omega) = \sum_{m=1}^M \mathbf{E}_m \hat{\mathbf{F}}_v(k_m(\omega)) e^{jk_m z} \quad (8)$$

Permet d'obtenir le champ en tout point de guide pour une source quelconque :
calcul très rapide.

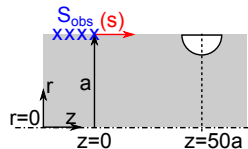
Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Méthode de l'imagerie topologique
- 3 Résultats en guide fermé**
 - Description du cas test
 - Localisation rapide par gradient empirique
 - Configuration monomodale
 - Configuration multimodale
- 4 Origine des artefacts en imagerie multimodale
- 5 Réduction de l'amplitude des artefacts
- 6 Résultats en guide ouvert
- 7 Conclusion

Description du cas test

Configuration du guide :

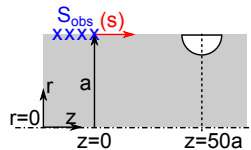
- Guide fermé : pas de milieu environnant



Description du cas test

Configuration du guide :

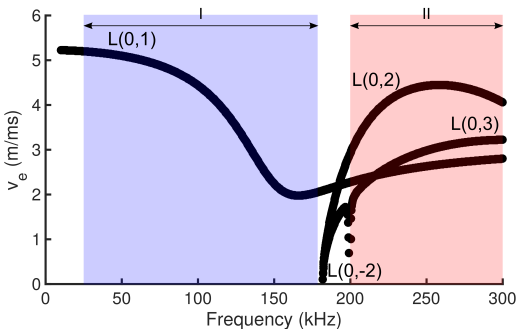
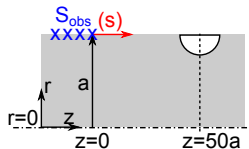
- Guide fermé : pas de milieu environnant
- Acier viscoélastique (modèle de Kelvin–Voigt)



Description du cas test

Configuration du guide :

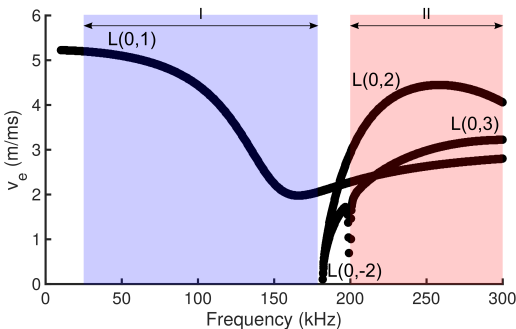
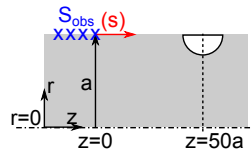
- Guide fermé : pas de milieu environnant
- Acier viscoélastique (modèle de Kelvin–Voigt)
- Axisymétrie : modes longitudinaux (de compression)



Description du cas test

Configuration du guide :

- Guide fermé : pas de milieu environnant
- Acier viscoélastique (modèle de Kelvin–Voigt)
- Axisymétrie : modes longitudinaux (de compression)
- Source ponctuelle à la surface : (I) monomodale (dispersif) ; (II) multimodale



Gradient utilisé

Rappel : gradient topologique $g(\mathbf{x})$

$$g(\mathbf{x}) = \operatorname{Re} \left(\int_{\mathbb{R}^+} [\sigma(\mathbf{v}) : (\mathcal{A} : \sigma(\mathbf{u})) - \rho\omega^2 \mathbf{v} \cdot \mathbf{u}] d\omega \right), \forall \mathbf{x} \in \Omega_0 \quad (9)$$

\mathbf{u} : champ direct ; \mathbf{v} : champ adjoint ; \mathcal{A} tenseur de polarisation spécifique du type de défaut recherché (à déterminer).

Gradient simplifié empirique pour une localisation rapide

Rodriguez *et al.*, Ultrasonics 2012 :

$$g_e(\mathbf{x}) = \left| \int_{\mathbb{R}^+} \mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) d\omega \right|, \forall \mathbf{x} \in \Omega_0. \quad (10)$$

Perte d'information sur la topologie du défaut : peut-on encore parler de gradient *topologique*? (similaire au gradient de densité, voir par exemple Tromp *et al.*, Geophys. J. Int. 2005 en Full Waveform Inversion)

Imagerie avec la source (I) monomodale

Mesure : 1 récepteur ponctuel (\equiv 1 seul point source pour le problème adjoint)

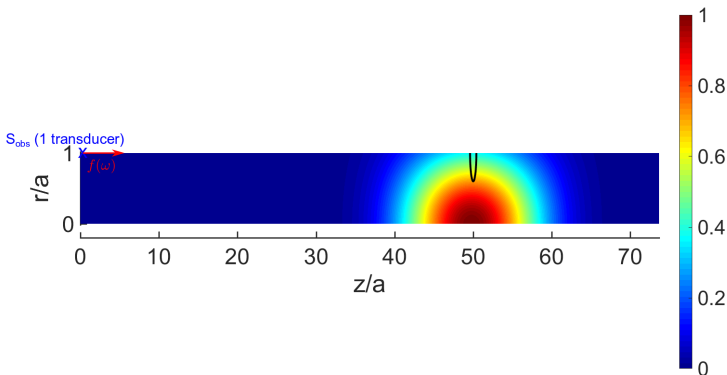


Image intégrée sur 640 fréquences. Échelle normalisée.
Diamètre défaut : $0,4a \approx \lambda_{\min}/2, 75$.

- Localisation correcte suivant z (centre tâche); **pas de précision dans la section**.
- La dispersion modale ne pose pas de problèmes (incluse a priori dans les modèles).

Imagerie avec la source (II) multimodale

Mesure : 1 récepteur ponctuel (\equiv 1 seul point source pour le problème adjoint)

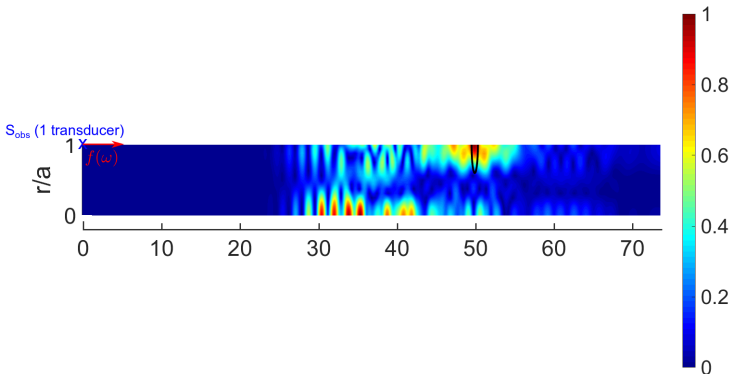


Image intégrée sur 400 fréquences. Échelle normalisée.
Diamètre défaut : $0,4a \approx \lambda_{\min}/1,25$.

Nombreux artefacts : localisation ambiguë.

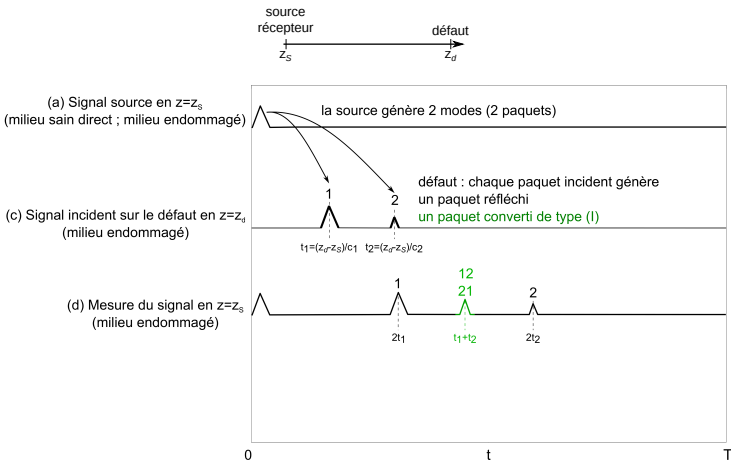
Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Méthode de l'imagerie topologique
- 3 Résultats en guide fermé
- 4 Origine des artefacts en imagerie multimodale**
 - Source du problème adjoint et focus
 - Conversions modales
- 5 Réduction de l'amplitude des artefacts
- 6 Résultats en guide ouvert
- 7 Conclusion

Construction de la source du problème adjoint (résidus)

Représentation temporelle 1D : $\int_{\mathbb{R}} \mathbf{u}(\mathbf{z}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{z}, \omega) d\omega = \int_0^T \mathbf{u}(\mathbf{z}, t) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{z}, T - t) dt$.

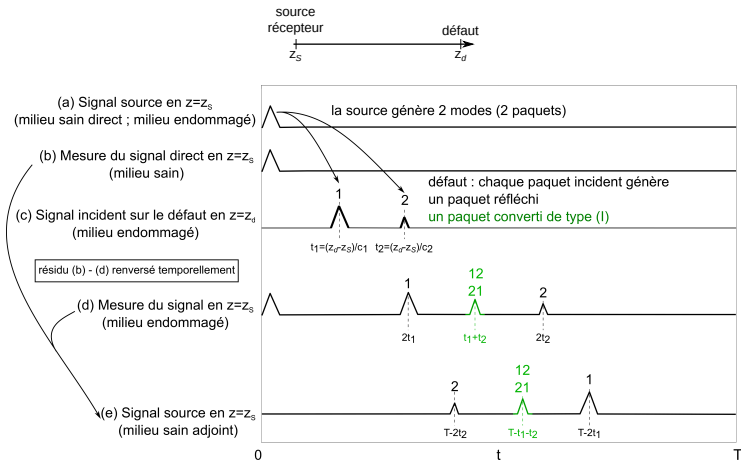
Exemple d'une configuration bimodale : $c_1 = 2c_2$.



Construction de la source du problème adjoint (résidus)

Représentation temporelle 1D : $\int_{\mathbb{R}} \mathbf{u}(\mathbf{z}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{z}, \omega) d\omega = \int_0^T \mathbf{u}(\mathbf{z}, t) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{z}, T - t) dt$.

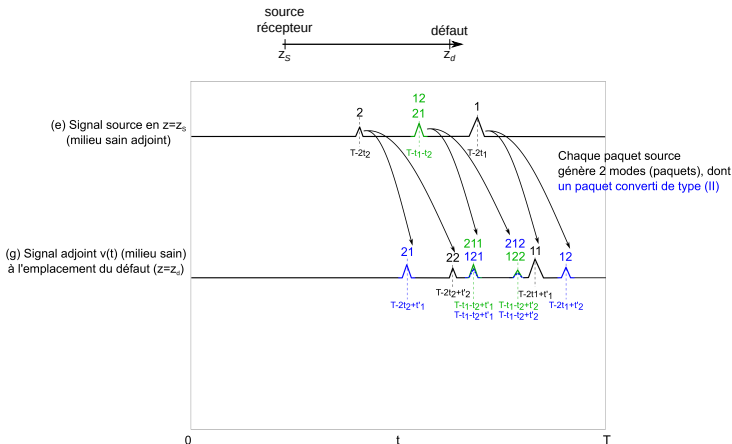
Exemple d'une configuration bimodale : $c_1 = 2c_2$.



Focus sur le défaut

$$\int_{\mathbb{R}} \mathbf{u}(\mathbf{z}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{z}, \omega) d\omega = \int_0^T \mathbf{u}(\mathbf{z}, t) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{z}, T - t) dt.$$

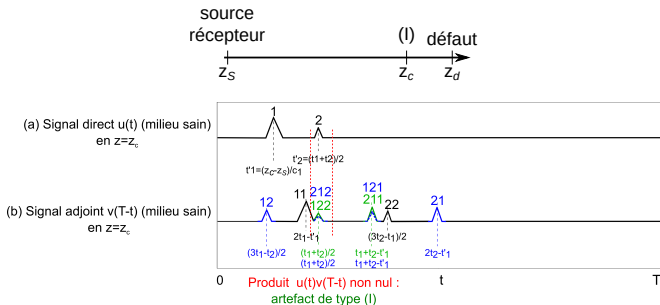
Source du problème adjoint : **contient 4 paquets**



Origine des artefacts : conversions modales de type I (défaut)

$$\int_{\mathbb{R}} \mathbf{u}(\mathbf{z}_c, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{z}_c, \omega) d\omega = \int_0^T \mathbf{u}(\mathbf{z}_c, t) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{z}_c, T-t) dt.$$

Exemple d'un artefact en $z_c = \frac{c_2 + c_1}{2c_1} (z_d - z_s) + z_s$.



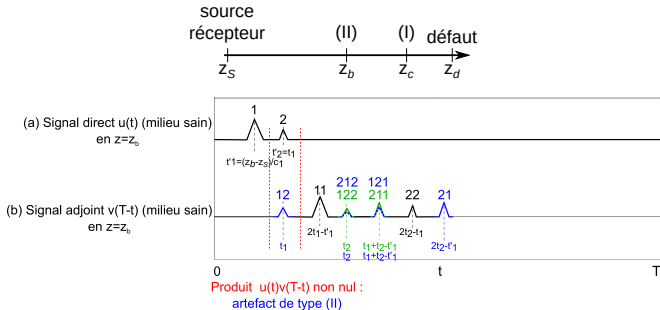
Artefact de type (I)

- Éviter la conversion vers des paquets de type (I) (verts) par le défaut : impossible car intrinsèque au défaut
- Position de l'artefact : dépend de la distance $(z_d - z_s)$

Origine des artefacts : conversions modales de type II (source)

$$\int_{\mathbb{R}} \mathbf{u}(\mathbf{z}_b, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{z}_b, \omega) d\omega = \int_0^T \mathbf{u}(\mathbf{z}_b, t) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{z}_b, T-t) dt.$$

Exemple d'un artefact en $z_b = \frac{c_2}{c_1}(z_d - z_S) + z_S$.



Artefact de type II

- Éviter la conversion vers des paquets de type II (bleus) par la source adjointe → améliorer la sélectivité modale
- Position de l'artefact : dépend de la distance $(z_d - z_S)$

Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Méthode de l'imagerie topologique
- 3 Résultats en guide fermé
- 4 Origine des artefacts en imagerie multimodale
- 5 Réduction de l'amplitude des artefacts**
 - Méthode 1 : augmentation du nombre de sources/récepteurs
 - Méthode 2 : post-traitement
- 6 Résultats en guide ouvert
- 7 Conclusion

Méthode 1 : augmentation du nombre de sources/récepteurs

(a) Mesure : 1 récepteur ponctuel (\equiv 1 seul point source pour le problème adjoint)

(b) Mesure : 4 récepteurs ponctuels (\equiv 4 points source pour le problème adjoint)

- Somme des contributions au niveau du défaut
- Création des artefacts à différentes positions (dépend de la distance au défaut)

→ **diminution de l'amplitude des artefacts**

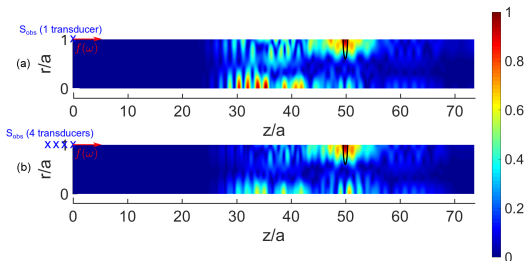


Image intégrée sur 400 fréquences. Échelle normalisée.
Diamètre défaut : $0,4a \approx \lambda_{\min}/1,25$.

Méthode 1 : augmentation du nombre de sources/récepteurs

(a) Mesure : 1 récepteur ponctuel (\equiv 1 seul point source pour le problème adjoint)

(b) Mesure : 4 récepteurs ponctuels (\equiv 4 points source pour le problème adjoint)

- Somme des contributions au niveau du défaut
- Création des artefacts à différentes positions (dépend de la distance au défaut)

→ **diminution de l'amplitude des artefacts**

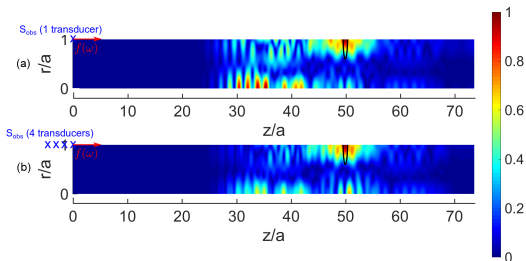


Image intégrée sur 400 fréquences. Échelle normalisée.
Diamètre défaut : $0,4a \approx \lambda_{\min}/1,25$.

Configuration multimodale : localisation correcte suivant z + dans la section.

Méthode 2 : post-traitement des artefacts

Mesure : 1 récepteur ponctuel (\equiv 1 seul point source pour le problème adjoint)

- 1 Localisation suivant z : extraction de la valeur du gradient monomodal suivant z pour $r = 0$

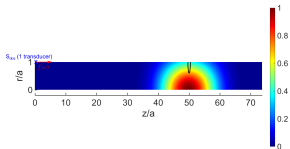
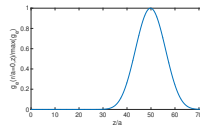


Image monomodale



Profil post-traitement

Méthode 2 : post-traitement des artefacts

Mesure : 1 récepteur ponctuel (\equiv 1 seul point source pour le problème adjoint)

- 1 Localisation suivant z : extraction de la valeur du gradient monomodal suivant z pour $r = 0$

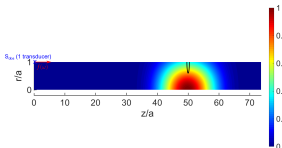
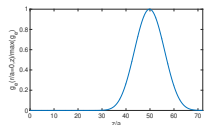


Image monomodale



Profil post-traitement

- 2 Localisation dans la section : multiplication de l'image multimodale par le profil

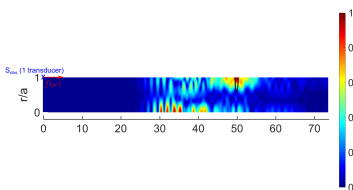


Image multimodale

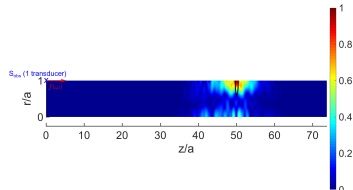


Image multimodale après post-traitement

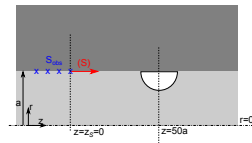
Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Méthode de l'imagerie topologique
- 3 Résultats en guide fermé
- 4 Origine des artefacts en imagerie multimodale
- 5 Réduction de l'amplitude des artefacts
- 6 Résultats en guide ouvert**
 - Description du cas test
 - Influence de l'atténuation
- 7 Conclusion

Description du cas test

Configuration du guide :

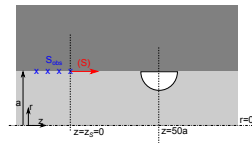
- Guide ouvert : milieu environnant (modèle : milieu avec PML)



Description du cas test

Configuration du guide :

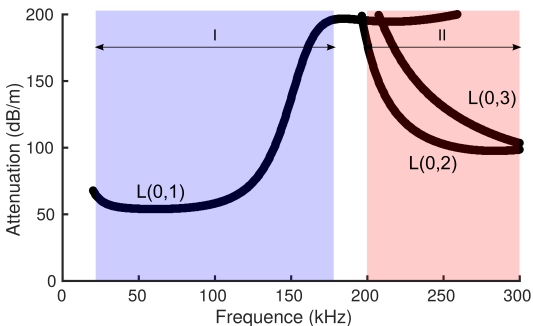
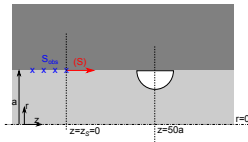
- Guide ouvert : milieu environnant (modèle : milieu avec PML)
- Acier viscoélastique dans enrobant ciment



Description du cas test

Configuration du guide :

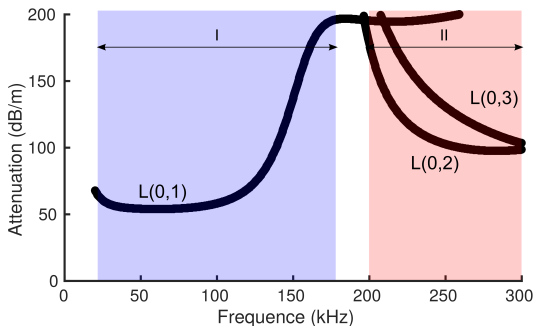
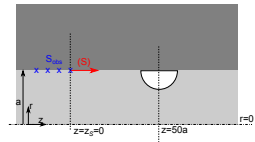
- Guide ouvert : milieu environnant (modèle : milieu avec PML)
- Acier viscoélastique dans enrobant ciment
- Axisymétrie : modes à fuite longitudinaux (de compression)



Description du cas test

Configuration du guide :

- Guide ouvert : milieu environnant (modèle : milieu avec PML)
- Acier viscoélastique dans enrobant ciment
- Axisymétrie : modes à fuite longitudinaux (de compression)
- Source ponctuelle à la surface : (I) monomodale (dispersif); (II) multimodale



Imagerie avec la source (I) monomodale

Mesure : 1 récepteur ponctuel (\equiv 1 seul point source pour le problème adjoint)

(a) Décalage de l'image en amont du défaut

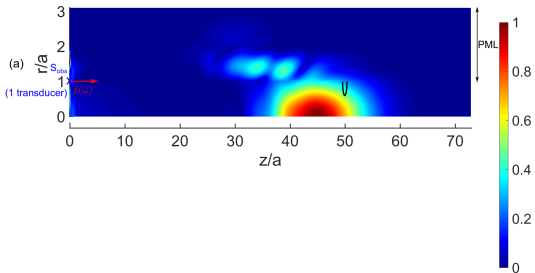


Image intégrée sur 640 fréquences. Échelle normalisée.

Imagerie avec la source (I) monomodale

Mesure : 1 récepteur ponctuel (\equiv 1 seul point source pour le problème adjoint)

(a) Décalage de l'image en amont du défaut

(b) Correction de l'atténuation du mode à fuite L(0,1) :

$$U(z, \omega) = \sum_{m=1}^M E_m \hat{F}(k_m) e^{i \operatorname{Re}(k_m) z} \rightarrow \text{intérêt du formalisme modal}$$

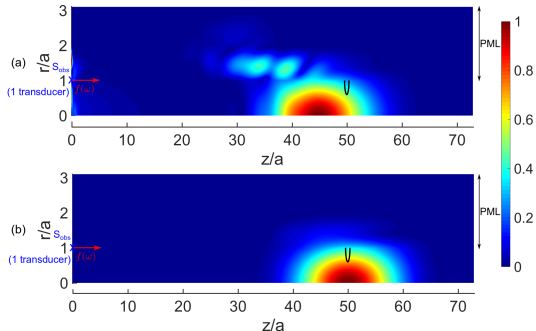


Image intégrée sur 640 fréquences. Échelle normalisée.

Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Méthode de l'imagerie topologique
- 3 Résultats en guide fermé
- 4 Origine des artefacts en imagerie multimodale
- 5 Réduction de l'amplitude des artefacts
- 6 Résultats en guide ouvert
- 7 Conclusion**

Conclusion et perspectives

Conclusions

Étude avec configuration de mesure restreinte (guide ouvert)

- Configuration monomodale : localisation suivant l'axe du guide

Conclusion et perspectives

Conclusions

Étude avec configuration de mesure restreinte (guide ouvert)

- Configuration monomodale : localisation suivant l'axe du guide
- Configuration multimodale :

Conclusion et perspectives

Conclusions

Étude avec configuration de mesure restreinte (guide ouvert)

- Configuration monomodale : localisation suivant l'axe du guide
- Configuration multimodale :
 - Localisation suivant l'axe du guide + dans la section

Conclusion et perspectives

Conclusions

Étude avec configuration de mesure restreinte (guide ouvert)

- Configuration monomodale : localisation suivant l'axe du guide
- Configuration multimodale :
 - Localisation suivant l'axe du guide + dans la section
 - Artefacts créés par conversions modales (source adjointe, défaut) ; amplitude réduite avec plusieurs transducteurs ; post-traitement possible par image monomodale

Conclusion et perspectives

Conclusions

Étude avec configuration de mesure restreinte (guide ouvert)

- Configuration monomodale : localisation suivant l'axe du guide
- Configuration multimodale :
 - Localisation suivant l'axe du guide + dans la section
 - Artefacts créés par conversions modales (source adjointe, défaut) ; amplitude réduite avec plusieurs transducteurs ; post-traitement possible par image monomodale
- Formalisme modal : calcul rapide des champs direct et adjoint + correction atténuation

Conclusion et perspectives

Conclusions

Étude avec configuration de mesure restreinte (guide ouvert)

- Configuration monomodale : localisation suivant l'axe du guide
- Configuration multimodale :
 - Localisation suivant l'axe du guide + dans la section
 - Artefacts créés par conversions modales (source adjointe, défaut) ; amplitude réduite avec plusieurs transducteurs ; post-traitement possible par image monomodale
- Formalisme modal : calcul rapide des champs direct et adjoint + correction atténuation

Perspectives

- Étude d'une configuration d'imagerie idéale → identification des facteurs de dégradation de l'image
- Prise en compte a priori d'éléments diffractants (exemple : jonction guide fermé/ouvert)

Merci pour votre attention !

Rappel : gradient topologique $g(\mathbf{x})$

$$g(\mathbf{x}) = \operatorname{Re} \left(\int_{\mathbb{R}^+} [\sigma(\mathbf{v}) : (\mathcal{A} : \sigma(\mathbf{u})) - \rho\omega^2 \mathbf{v} \cdot \mathbf{u}] d\omega \right), \forall \mathbf{x} \in \Omega_0 \quad (11)$$

\mathbf{u} : champ direct ; \mathbf{v} : champ adjoint ; \mathcal{A} tenseur de polarisation spécifique du type de défaut recherché (à déterminer).

Rappel : gradient topologique $g(\mathbf{x})$

$$g(\mathbf{x}) = \operatorname{Re} \left(\int_{\mathbb{R}^+} [\sigma(\mathbf{v}) : (\mathcal{A} : \sigma(\mathbf{u})) - \rho\omega^2 \mathbf{v} \cdot \mathbf{u}] d\omega \right), \forall \mathbf{x} \in \Omega_0 \quad (11)$$

\mathbf{u} : champ direct ; \mathbf{v} : champ adjoint ; \mathcal{A} tenseur de polarisation spécifique du type de défaut recherché (à déterminer).

Approximations du gradient pour une localisation rapide :

- 1 Suppression tenseur de polarisation (info. sur topologie défaut) + $\rho\omega^2$:

$$g_S(\mathbf{x}) = \operatorname{Re} \left(\int_{\mathbb{R}^+} \mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) d\omega \right), \forall \mathbf{x} \in \Omega_0. \quad (12)$$

Rappel : gradient topologique $g(\mathbf{x})$

$$g(\mathbf{x}) = \operatorname{Re} \left(\int_{\mathbb{R}^+} [\sigma(\mathbf{v}) : (\mathcal{A} : \sigma(\mathbf{u})) - \rho\omega^2 \mathbf{v} \cdot \mathbf{u}] d\omega \right), \forall \mathbf{x} \in \Omega_0 \quad (11)$$

\mathbf{u} : champ direct ; \mathbf{v} : champ adjoint ; \mathcal{A} tenseur de polarisation spécifique du type de défaut recherché (à déterminer).

Approximations du gradient pour une localisation rapide :

- 1 Suppression tenseur de polarisation (info. sur topologie défaut) + $\rho\omega^2$:

$$g_S(\mathbf{x}) = \operatorname{Re} \left(\int_{\mathbb{R}^+} \mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) d\omega \right), \forall \mathbf{x} \in \Omega_0. \quad (12)$$

- 2 Rodriguez *et al.*, Ultrasonics 2012 :

$$g_e(\mathbf{x}) = \left| \int_{\mathbb{R}^+} \mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) d\omega \right|, \forall \mathbf{x} \in \Omega_0. \quad (13)$$

Rappel : gradient topologique $g(\mathbf{x})$

$$g(\mathbf{x}) = \operatorname{Re} \left(\int_{\mathbb{R}^+} [\sigma(\mathbf{v}) : (\mathcal{A} : \sigma(\mathbf{u})) - \rho\omega^2 \mathbf{v} \cdot \mathbf{u}] d\omega \right), \forall \mathbf{x} \in \Omega_0 \quad (11)$$

\mathbf{u} : champ direct ; \mathbf{v} : champ adjoint ; \mathcal{A} tenseur de polarisation spécifique du type de défaut recherché (à déterminer).

Approximations du gradient pour une localisation rapide :

- 1 Suppression tenseur de polarisation (info. sur topologie défaut) + $\rho\omega^2$:

$$g_S(\mathbf{x}) = \operatorname{Re} \left(\int_{\mathbb{R}^+} \mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) d\omega \right), \forall \mathbf{x} \in \Omega_0. \quad (12)$$

- 2 Rodriguez *et al.*, Ultrasonics 2012 :

$$g_e(\mathbf{x}) = \left| \int_{\mathbb{R}^+} \mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) d\omega \right|, \forall \mathbf{x} \in \Omega_0. \quad (13)$$

- 3 Rodriguez *et al.*, Ultrasonics 2014 :

$$g_{de}(\mathbf{x}) = \left| \int_{\mathbb{R}^+} \frac{\mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega)}{|\mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega)|^2} d\omega \right|, \forall \mathbf{x} \in \Omega_0. \quad (14)$$

Rappel : gradient topologique $g(\mathbf{x})$

$$g(\mathbf{x}) = \operatorname{Re} \left(\int_{\mathbb{R}^+} [\sigma(\mathbf{v}) : (\mathcal{A} : \sigma(\mathbf{u})) - \rho\omega^2 \mathbf{v} \cdot \mathbf{u}] d\omega \right), \forall \mathbf{x} \in \Omega_0 \quad (11)$$

\mathbf{u} : champ direct ; \mathbf{v} : champ adjoint ; \mathcal{A} tenseur de polarisation spécifique du type de défaut recherché (à déterminer).

Approximations du gradient pour une localisation rapide :

- 1 Suppression tenseur de polarisation (info. sur topologie défaut) + $\rho\omega^2$:

$$g_S(\mathbf{x}) = \operatorname{Re} \left(\int_{\mathbb{R}^+} \mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) d\omega \right), \forall \mathbf{x} \in \Omega_0. \quad (12)$$

- 2 Rodriguez et al., Ultrasonics 2012 :

$$g_e(\mathbf{x}) = \left| \int_{\mathbb{R}^+} \mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) d\omega \right|, \forall \mathbf{x} \in \Omega_0. \quad (13)$$

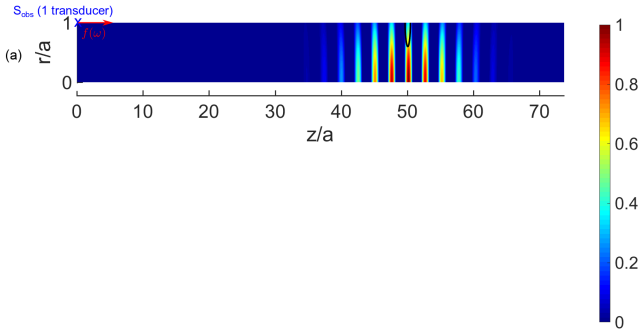
- 3 Rodriguez et al., Ultrasonics 2014 :

$$g_{de}(\mathbf{x}) = \left| \int_{\mathbb{R}^+} \frac{\mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega)}{|\mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega)|^2} d\omega \right|, \forall \mathbf{x} \in \Omega_0. \quad (14)$$

Perte d'information sur la topologie du défaut : peut-on encore parler de gradient *topologique* ? (similaire au gradient de densité, voir par exemple Tromp et al., Geophys. J. Int. 2005 en Full Waveform Inversion)

Comparaison des formulations empiriques de gradient

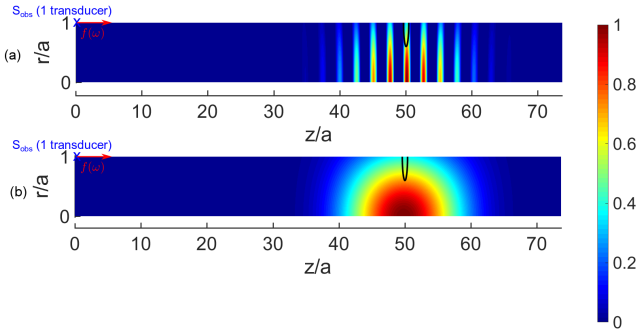
(a) $g_S(\mathbf{x}) = \text{Re} \left(\int_{\mathbb{R}^+} \mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) d\omega \right), \forall \mathbf{x} \in \Omega_0$ (oscillations)



Comparaison des formulations empiriques de gradient

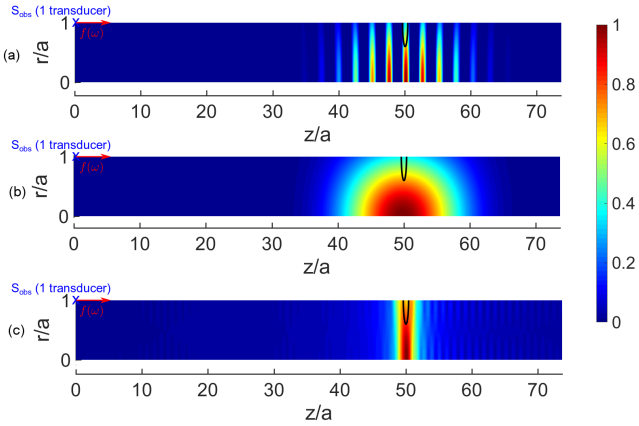
(a) $g_S(\mathbf{x}) = \text{Re} \left(\int_{\mathbb{R}^+} \mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) d\omega \right), \forall \mathbf{x} \in \Omega_0$ (oscillations)

(b) $g_e(\mathbf{x}) = \left| \int_{\mathbb{R}^+} \mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) d\omega \right|, \forall \mathbf{x} \in \Omega_0$ (enveloppe)



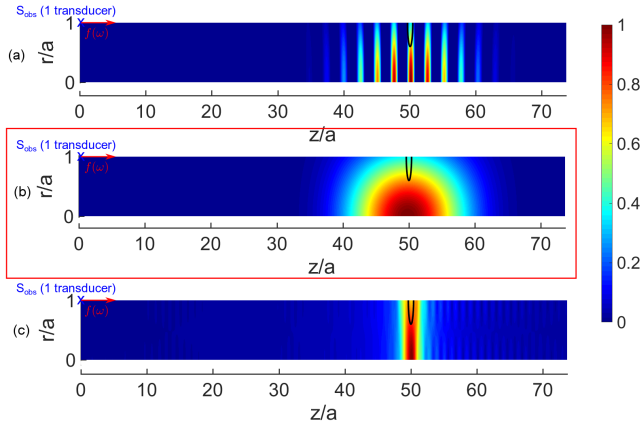
Comparaison des formulations empiriques de gradient

- (a) $g_S(\mathbf{x}) = \text{Re} \left(\int_{\mathbb{R}^+} \mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) d\omega \right), \forall \mathbf{x} \in \Omega_0$ (oscillations)
- (b) $g_e(\mathbf{x}) = \left| \int_{\mathbb{R}^+} \mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) d\omega \right|, \forall \mathbf{x} \in \Omega_0$ (enveloppe)
- (c) $g_{de}(\mathbf{x}) = \left| \int_{\mathbb{R}^+} \frac{\mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) \mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega)}{|\mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega)|^2} d\omega \right|, \forall \mathbf{x} \in \Omega_0$ (meilleure résolution ; + bruit)



Comparaison des formulations empiriques de gradient

- (a) $g_S(\mathbf{x}) = \text{Re} \left(\int_{\mathbb{R}^+} \mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) d\omega \right), \forall \mathbf{x} \in \Omega_0$ (oscillations)
- (b) $g_e(\mathbf{x}) = \left| \int_{\mathbb{R}^+} \mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) d\omega \right|, \forall \mathbf{x} \in \Omega_0$ (enveloppe)
- (c) $g_{de}(\mathbf{x}) = \left| \int_{\mathbb{R}^+} \frac{\mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) \mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega)}{|\mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega)|^2} d\omega \right|, \forall \mathbf{x} \in \Omega_0$ (meilleure résolution ; + bruit)



Sensibilité au type de défaut

4 points source/récepteur pour le problème adjoint.

Exemple d'un défaut au cœur.

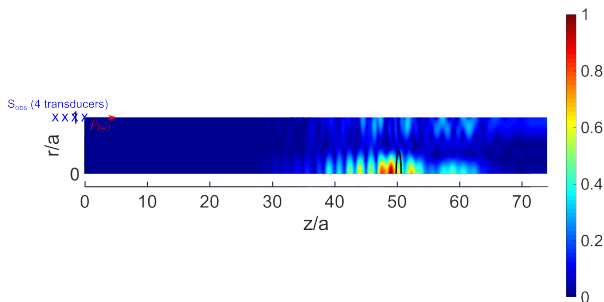


Image intégrée sur 400 fréquences. Échelle normalisée.
Diamètre défaut : $0,4a \approx \lambda_{\min}/1,25$.

Localisation imparfaite suivant z (centre tâche); sensibilité à l'emplacement du défaut dans la section.