



**HAL**  
open science

## Imagerie d'interface barrage-fondation par inversion de forme d'onde complète

Mohamed Aziz Boukraa, Lorenzo Audibert, Marcella Bonazzoli, Housseem Haddar, Denis Vautrin

### ► To cite this version:

Mohamed Aziz Boukraa, Lorenzo Audibert, Marcella Bonazzoli, Housseem Haddar, Denis Vautrin. Imagerie d'interface barrage-fondation par inversion de forme d'onde complète. Journées Scientifiques AGAP Qualité 2024, AGAP Qualité Géophysique Appliquée, Mar 2024, Poitiers, France. pp.04002, 10.1051/e3sconf/202450404002 . hal-04528638

**HAL Id: hal-04528638**

**<https://normandie-univ.hal.science/hal-04528638v1>**

Submitted on 2 Apr 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Imagerie d'interface barrage-fondation par inversion de forme d'onde complète

## Imaging of Dam-Foundation contact by Full Waveform Inversion with a shape optimization approach

Mohamed Aziz Boukraa<sup>1,2,\*</sup>, Lorenzo Audibert<sup>1,2</sup>, Marcella Bonazzoli<sup>1</sup>, Housseem Haddar<sup>1</sup> and Denis Vautrin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UMA, INRIA, ENSTA Paris, Institut Polytechnique de Paris, 91120 Palaiseau, France

<sup>2</sup>EDF R&D, département PRISME, bâtiment U, 6 quai Watier, BP 49, 78401 Chatou Cedex

**Résumé.** Dans le cadre de l'étude de la stabilité des barrages, la connaissance de l'interface entre le barrage et la roche revêt une grande importance. Le recours à des techniques géophysiques peut apporter des informations complémentaires par rapport aux mesures géotechniques. Nous proposons ici une méthode de traitement des mesures sismiques, l'objectif étant d'obtenir une image de l'interface entre le béton du barrage et le rocher de la fondation avec une résolution métrique. Il s'agit d'une technique de type « Full Waveform Inversion » avec optimisation de forme. Des résultats numériques utilisant des mesures synthétiques montrent la capacité de la méthode à retrouver l'interface avec une précision satisfaisante, pour un nombre limité de points de mesure et en présence de bruit.

**Abstract.** In the context of studying the stability of dams, imaging the interface between the dam and the rock is of great importance. Geophysical techniques can provide additional information to geotechnical measurements. Here, a method for processing seismic measurements is presented. The objective is to obtain an image of the interface between the concrete of the dam and the rock of the foundation with metric resolution. The proposed technique is based on "Full Waveform Inversion" with a shape optimization approach. Numerical results using synthetic measurements demonstrate the method's ability to accurately recover the interface with a limited number of measurement points and in the presence of noise.

---

\*Corresponding author: [mohamed.boukraa@inria.fr](mailto:mohamed.boukraa@inria.fr)

## 1 Introduction

Nous nous intéressons ici à l'imagerie de l'interface située entre le béton qui constitue les barrages poids et la roche sur laquelle ils reposent. L'objectif est d'améliorer la connaissance du comportement mécanique des barrages vis-à-vis de la poussée exercée par la retenue d'eau, et ainsi d'identifier des marges supplémentaires vis-à-vis de leur stabilité.

Pour les ouvrages peu documentés, la solution actuelle consiste à réaliser des forages carottés sur toute la hauteur du barrage. Cette approche a l'inconvénient d'être assez coûteuse et de ne fournir qu'une information ponctuelle à l'endroit de chaque forage, ce qui rend l'extrapolation à toute la structure délicate.

Une approche complémentaire est actuellement à l'étude. Il s'agit d'évaluer la plus-value que pourraient apporter certaines techniques de mesure géophysique afin d'obtenir une image 2D du fond de fouilles de façon non-destructive. La résolution spatiale escomptée est de l'ordre du mètre. Cela permettrait d'affiner la connaissance de la géométrie de l'interface et ainsi limiter le nombre des forages à réaliser sur site. Nous nous intéressons en particulier aux techniques d'imagerie par ondes sismiques.

Sur la base de signaux synthétiques et de mesures réalisées sur un site réel, deux techniques de traitement de type sismique réflexion et « Profil Sismique Vertical » ont été testées. Cependant, cela n'a pas conduit à des résultats satisfaisants.

Cela met en évidence la difficulté du problème, que l'on attribue notamment à la géométrie complexe de la structure. Les méthodes de traitement les plus classiques ne sont donc pas adaptées pour cette problématique.

Par conséquent, afin d'être en mesure d'imager l'interface béton/rocher avec une résolution spatiale satisfaisante, il s'avère nécessaire de mettre en œuvre des techniques de traitement plus poussées capables de prendre en compte le plus fidèlement possible la géométrie de l'ouvrage et la complexité des modes de propagation d'onde qui en résultent.

## 2 Modélisation

Nous proposons ici une approche de type « inversion de forme d'onde complète » (Full-Waveform Inversion : FWI). Ce type de méthode comprend le développement d'un code de simulation basé sur un modèle mathématique déterministe de propagation d'ondes et le développement d'une méthode d'inversion utilisant une optimisation de forme géométrique. Cette méthode permet de générer une imagerie sismique en deux dimensions mettant en évidence la forme de l'interface. Nous avons cherché à limiter les coûts en termes de temps de calcul et d'espace mémoire requis dans nos développements.

### 2.1 Hypothèses

À des fins de modélisation, nous tenons à préciser quelques hypothèses fondamentales :

- Nous nous intéressons dans cette étude au cas des barrages poids, et nous supposons que leur forme est invariante le long de leur longueur. En conséquence, nous nous limitons à la reconstruction de l'interface dans un plan vertical (vue de profil).
- Nous supposons que le milieu étudié se compose uniquement de deux matériaux homogènes et isotropes : le béton pour le barrage et la roche. Tous les paramètres de ces matériaux sont considérés comme étant connus. En outre, nous négligeons toute forme de dissipation, et nous considérons que le contact est parfait entre ces matériaux, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'air ou d'eau.
- Nous considérons deux types de sources : celles positionnées à l'air libre le long des parois du barrage et celles immergées dans la retenue. Ces sources génèrent des ondes élastiques dans le solide (béton et roche) et des ondes acoustiques dans l'eau.
- Les mesures sont effectuées sur les parois du barrage. Il s'agit de déplacements (ou de manière équivalente de vitesses) en partie émergée, et pressions en partie immergée.

- Enfin, nous proposons de travailler dans le domaine fréquentiel, ce qui signifie que les ondes générées par les sources sont considérées comme des signaux harmoniques en temps.

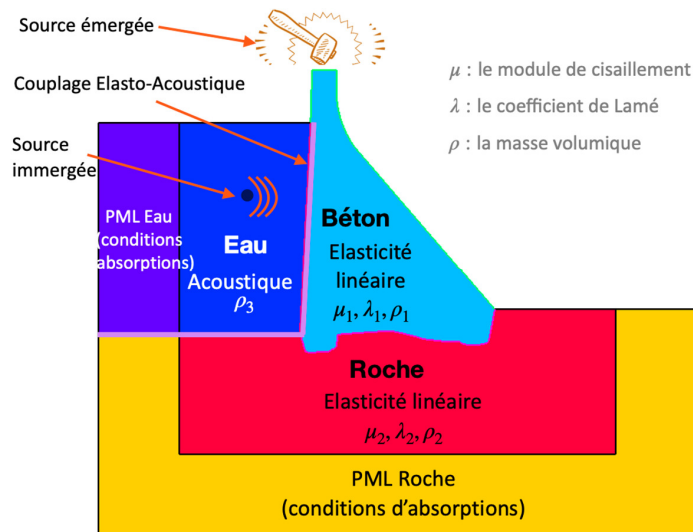
## 2.2 Technique de modélisation proposée

Dans ce travail, nous supposons que la sollicitation est contenue dans le plan, c'est-à-dire que la source est soit verticale, soit horizontale selon l'axe amont/aval du barrage. Dans ce cas, la propagation de l'onde sismique obéit à l'équation d'onde élastique linéaire dans le solide (barrage et roche) et à l'équation d'onde acoustique dans l'eau.

Pour résoudre numériquement ces modèles complexes, nous faisons appel à la méthode des éléments finis. Il existe des contraintes sur la taille des mailles qui doivent être suffisamment petites pour saisir les petites variations géométriques et pour garantir une modélisation précise à chaque fréquence considérée. Malgré le coût de calcul que cela engendre, cette précision est nécessaire pour modéliser la propagation d'une onde de manière réaliste, et pour pouvoir estimer avec succès la forme de l'interface entre le barrage et le fond rocheux.

Pour modéliser la propagation d'une onde en milieu infini tout en nous limitant à un domaine de calcul de dimensions finies, des conditions d'absorption ont été introduites sur les bords du domaine. Plus précisément, nous exploitons une technique numérique bien établie appelée PML (Perfectly Matched Layers ou couches parfaitement absorbantes) [1].

Un schéma du milieu ausculté tel que représenté dans l'outil de modélisation est présenté Figure 1.



**Fig. 1.** Représentation des matériaux du barrage, modèles de propagation d'onde dans chaque milieu et les conditions aux limites.

## 3 Inversion

### 3.1 Problème à résoudre

Comme indiqué précédemment, nous supposons que seule l'interface est inconnue, et que les autres caractéristiques du milieu de propagation sont connues a priori. Pour décrire la géométrie de l'interface sous forme mathématique, nous supposons qu'elle peut être représentée par une fonction, c'est-à-dire que pour chaque coordonnée selon l'axe horizontal,

la position de l'interface est donnée par une seule coordonnée verticale (voir Figure 2). Le nombre d'inconnues du problème inverse correspond donc au le nombre de points décrivant la fonction. De plus, nous supposons qu'aux deux extrémités de l'interface, les valeurs prises par la fonction sont connues a priori.

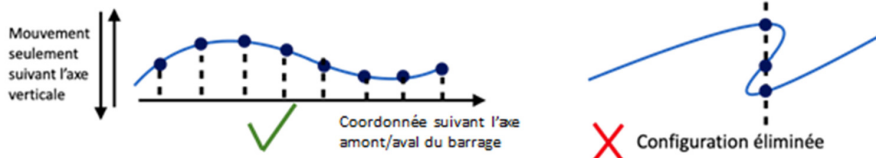


Fig. 2. Formes d'interface admissibles.

### 3.2 Full waveform inversion

Nous utilisons une technique de type « full waveform inversion » [2,3], qui se distingue par sa capacité à prendre en compte la totalité des signaux de mesures.

Il s'agit d'une méthode itérative dont l'objectif est de minimiser une fonction coût qui quantifie l'écart entre les mesures réelles et les mesures synthétiques. Plus précisément, la fonction coût est un critère de moindres carrés régularisé, qui prend en compte certaines informations a priori sur l'interface recherchée.

Pour minimiser ce critère, nous utilisons l'algorithme de la descente du gradient. Nous exploitons des techniques d'optimisation de forme qui permettent de calculer le gradient à l'aide d'un problème adjoint associé au modèle direct, ainsi que des résultats mathématiques liés à la dérivée de forme [4, 5, 6, 7].

Il est important de noter que le problème présente une nature non linéaire et instable, car les mesures ne varient pas proportionnellement aux inconnues ce qui ajoute une complexité supplémentaire à sa résolution. Cela est compensé par le terme de régularisation lié à la longueur de l'interface, limitant ainsi les aléas de reconstruction liés à des mesures potentiellement très bruitées.

Le principe de l'algorithme de résolution du problème inverse est décrit Figure 3.

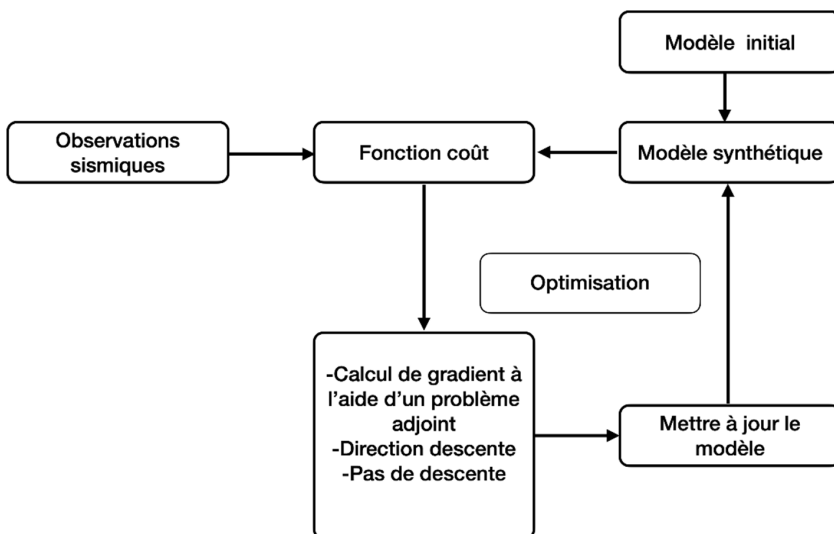


Fig. 3. Schéma explicatif du fonctionnement de la méthode FWI.

## 4 Résultats numériques

Afin de mieux cerner les capacités de cette méthode tout en s'affranchissant des problèmes liés à la présence de bruit dans les mesures réelles, nous avons choisi de travailler à partir de données simulées. Cela permet de se placer dans un contexte d'étude parfaitement maîtrisé où l'ensemble des caractéristiques du milieu ausculté et des paramètres d'acquisition sont définis par l'utilisateur. Nous introduisons également du bruit dans les mesures synthétiques.

Pour les premiers résultats d'inversion que nous allons présenter ici, nous partons de l'hypothèse que le bassin est vide, et que les capteurs et les sources peuvent être positionnés le long des deux parements du barrage. Nous avons considéré que la taille des supports pour la source et les capteurs est de 10 cm.

Nous prenons en compte les deux sollicitations dans le plan (horizontale et verticale) pour chaque position de source. De même, pour chaque capteur, on considère qu'il est capable de mesurer les deux polarisations, normales et tangentielles, à chaque position.

Nous considérons une bande de fréquences allant de 100 à 500 Hz avec un pas de 10 Hz. Les caractéristiques des matériaux sont indiquées dans le Tableau 1.

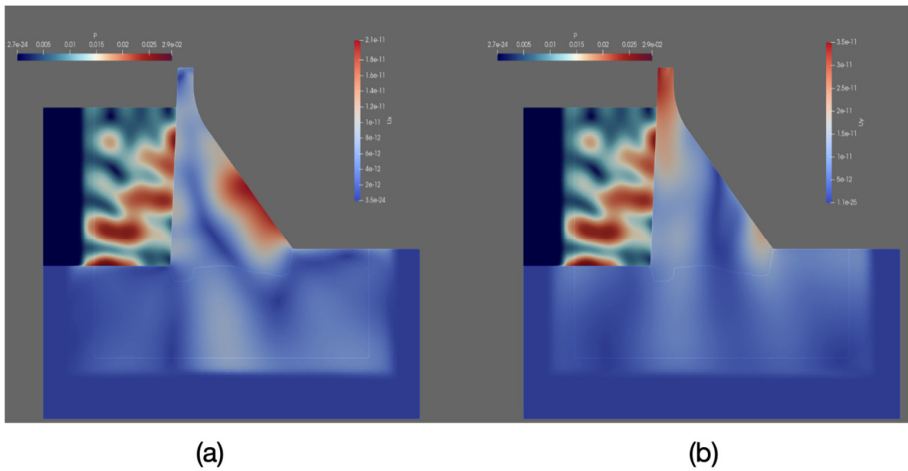
**Tableau 1.** Paramètres matériaux du modèle numérique.

	Roche	Béton	Eau
$V_s$ : vitesse de cisaillement	2500 m/s	2200 m/s	1440 m/s
$\rho$ : masse volumique	2500 kg/m <sup>3</sup>	2200 kg/m <sup>3</sup>	1000 kg/m <sup>3</sup>
$\nu$ : coefficient de Poisson	0,25	0,2	

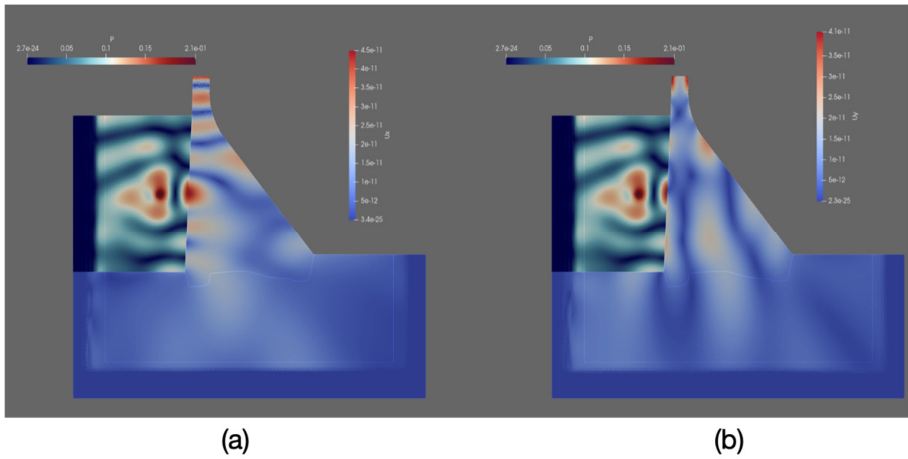
### 4.1 Résultats

#### 4.1.1 Résultats de modélisation de la propagation de l'onde

Les deux figures suivantes montrent la propagation de l'onde pour une source mono-fréquentielle (150 Hz) située sur la crête du barrage (Figure 4) ou dans le réservoir (Figure 5). Ces figures nous permettent d'observer le caractère évanescents de l'onde dans les PML. Cela montre, d'un point de vue numérique, la bonne implémentation de ces conditions d'absorption.



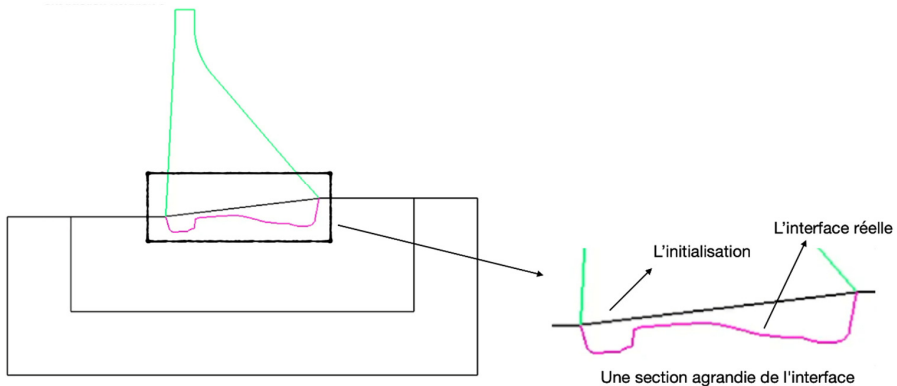
**Fig. 4.** Champs de déplacement horizontal (a) et vertical (b) dans le barrage, et champ de pression dans le réservoir pour une source située sur crête du barrage.



**Fig. 5.** Champs de déplacement horizontal (a) et vertical (b) dans le barrage, et champ de pression dans le réservoir pour une source située dans le réservoir.

#### 4.1.2 Configuration étudiée

Pour la plupart des résultats présentés par la suite, l'interface à l'état initial est représentée par une droite reliant les deux extrémités supposées connues (voir Figure 6). De plus, afin de comparer les résultats de reconstruction, nous montrons à chaque test une section zoomée de l'interface ainsi qu'une valeur d'erreur relative qui quantifie l'écart entre la reconstruction et la solution exacte.

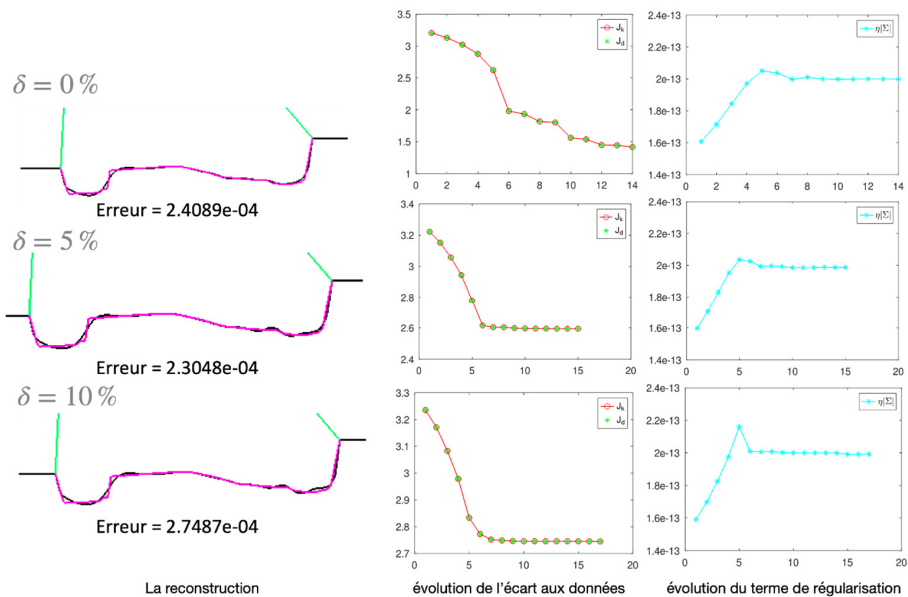


**Fig. 6.** Initialisation considérée.

Nous montrons également les évolutions du critère (l'écart aux données et le terme de régularisation) ce qui permet de s'assurer en partie de la convergence de l'algorithme. L'axe des abscisses correspond au nombre d'itérations et l'axe des ordonnées à la valeur de la fonction coût en échelle logarithmique.

#### 4.1.3 Influence du niveau de bruit

Nous présentons sur la Figure 7 les résultats obtenus pour différents niveaux de bruit. Les mesures ont été obtenues pour 11 positions de la source (5 côté amont, 5 côté aval et 1 sur la crête), 180 capteurs (90 côté amont, 90 côté aval, ce qui est comparable à la campagne de mesures réalisée sur site) et 5 fréquences (100, 150, 200, 250 et 300 Hz).



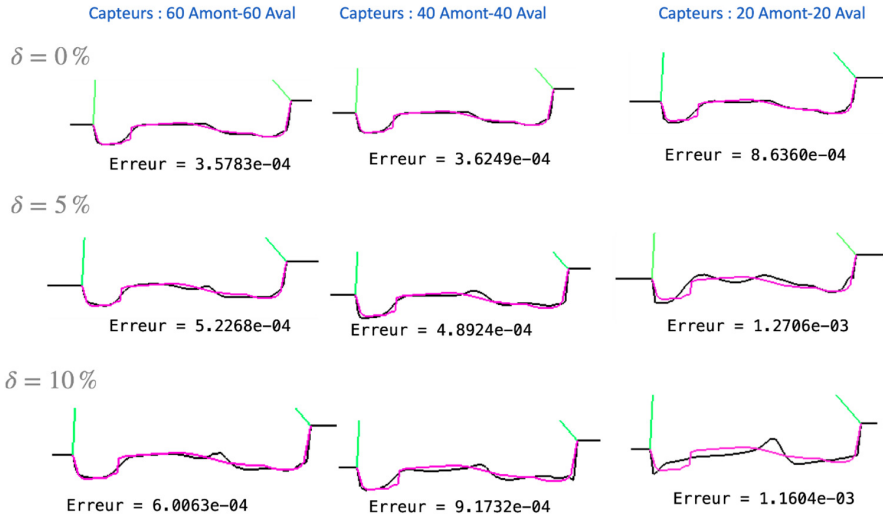
**Fig. 7.** Résultats de reconstruction avec 11 sources (5 côté amont, 5 côté aval et 1 sur la crête), 180 capteurs (90 côté amont, 90 côté aval) et 5 fréquences (100, 150, 200, 250 et 300 Hz).

Ces premiers résultats montrent que notre algorithme est performant et capable de s'affranchir des difficultés liées à la présence de bruit dans les mesures.



#### 4.1.4 Influence du nombre de points de mesures

Les résultats présentés sur la Figure 8 montrent que pour un nombre limité de mesures, la méthode reste performante et parvient à reconstruire avec succès la forme de l'interface. En présence de bruit dans les mesures, les résultats ont tout de même tendance à se dégrader lorsque le nombre de points de mesures est trop limité (20 côté amont et côté aval).

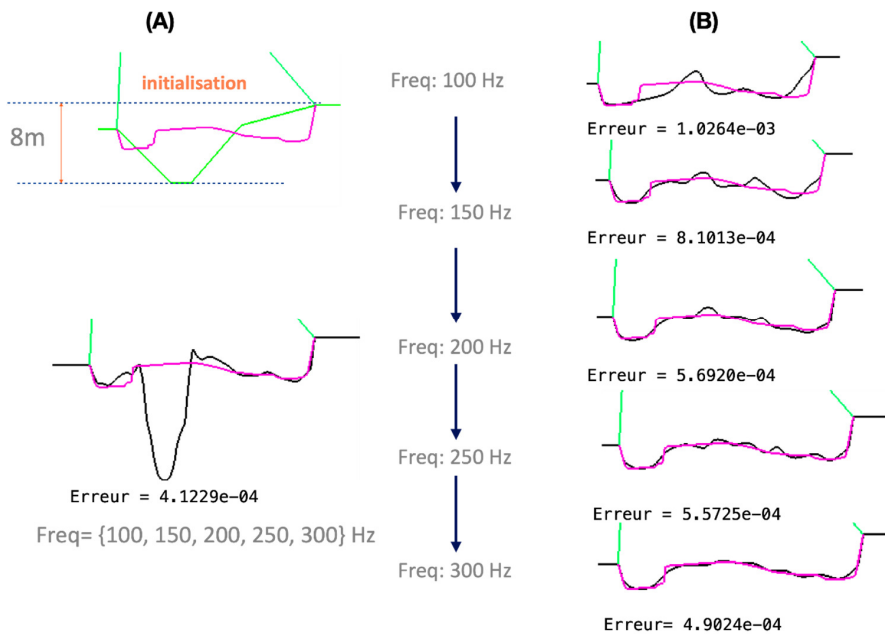


**Fig. 8.** Résultats de reconstruction obtenus avec 1 source sur la crête, différents nombres de capteurs (120, 80, 40) et une fréquence (150 Hz).

#### 4.1.5 Influence des fréquences

Nous comparons ici les résultats obtenus pour deux approches différentes dans la prise en compte des mesures : l'une considère simultanément toutes les fréquences dès la première itération (A) tandis que l'autre prend les fréquences de manière successive des basses fréquences vers les hautes fréquences, en utilisant les résultats de l'étape précédente comme initialisation (B).

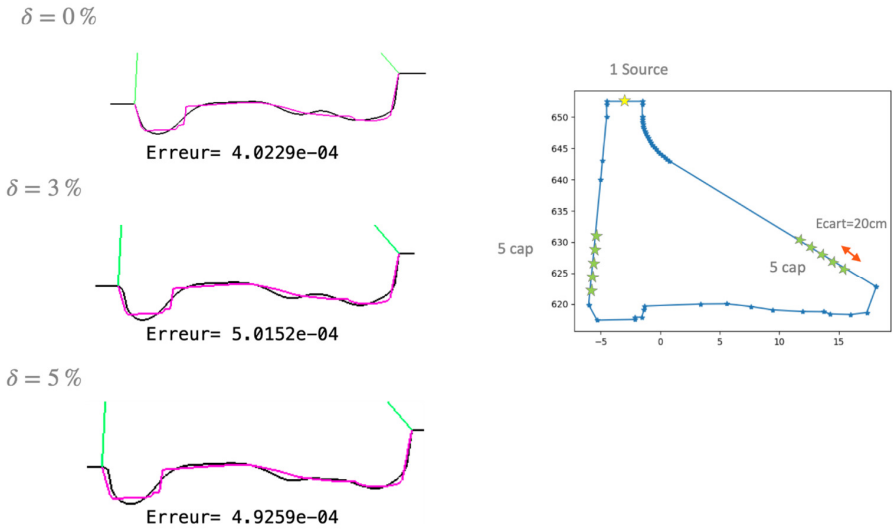
Nous observons que la seconde approche consistant à considérer les fréquences de manière successive est particulièrement intéressante. Elle se distingue par sa capacité à converger vers la solution exacte même dans le cas où notre estimation initiale est très éloignée de la réalité comme cela est illustré sur la Figure 9. De plus, cette méthode permet de mieux détecter les points anguleux et les marches dans la structure. Elle parvient à cela en exploitant davantage d'informations issues de fréquences plus élevées.



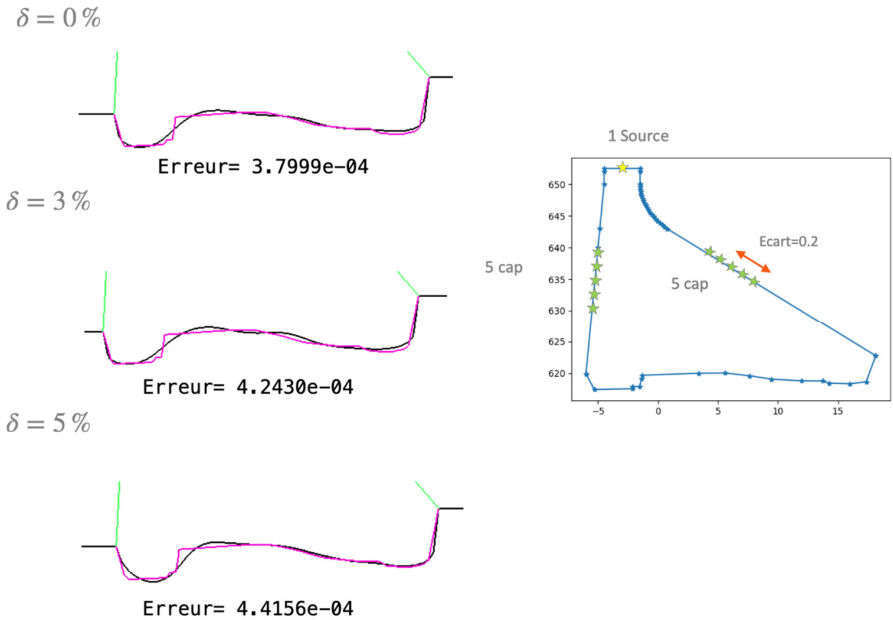
**Fig. 9.** Comparaison entre les approches par sommation (A) et par accumulation (B) de fréquences, avec une initialisation différente, une source sur la crête et 20 capteurs.

#### 4.1.6 Influence de la position des capteurs

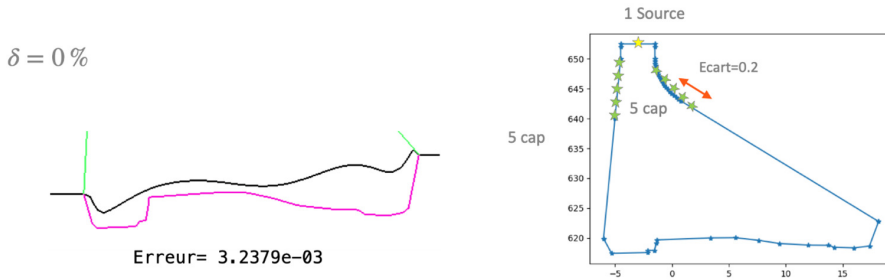
Les derniers résultats présentés ici concernent le positionnement de la chaîne de capteurs sur les deux parements. D'après les résultats présentés sur la Figure 10 (capteurs en bas du parement), la Figure 11 (capteurs à mi-hauteur) et la Figure 12 (capteurs en haut du parement), nous constatons que les positions des capteurs influencent fortement le résultat de reconstruction : le résultat est satisfaisant pour un nombre réduit de capteurs s'ils sont positionnés à proximité de la roche ou à mi-hauteur, mais il se dégrade si les capteurs sont uniquement positionnés en haut des côtés aval et amont. Cela peut s'expliquer par le manque de réflexions à cet emplacement.



**Fig. 10.** Résultats de reconstruction de l'interface en prenant 5 capteurs en bas de chaque côté, une source sur la crête, trois fréquences (100, 150 et 200 Hz) et 3 niveaux de bruit.



**Fig. 11.** Résultats de reconstruction de l'interface en prenant 5 capteurs au milieu de chaque côté, une source sur la crête, trois fréquences (100, 150 et 200 Hz) et 3 niveaux de bruit.



**Fig. 12.** Résultats de reconstruction de l'interface en prenant 5 capteurs en haut de chaque côté, une source sur la crête, trois fréquences (100, 150 et 200 Hz) et pour des mesures exactes.

## 5 Conclusion et perspectives

Nous pouvons conclure que les premiers tests réalisés sur données synthétiques aboutissent à des résultats satisfaisants. Les résultats actuels montrent que l'on retrouve une interface proche de la solution exacte, et ce même avec un nombre limité de points de mesure et en présence de bruit dans les mesures. De plus, la stratégie d'inversion consistant à considérer chaque fréquence l'une après l'autre semble améliorer la robustesse de l'algorithme. Enfin, il semble préférable de positionner les capteurs en bas des parements amont et aval pour améliorer la robustesse de l'algorithme.

Nous envisageons de poursuivre les tests de sensibilité par rapport aux différents paramètres d'acquisition (nombre et positions des capteurs, nombre et positions des points source, fréquences considérées, niveau de bruit dans les mesures, ...). Des tests de robustesse sont également à prévoir dans le cas où les hypothèses de modélisation ne sont pas tout-à-fait vérifiées (homogénéité du barrage, ...) ou si certaines informations a priori ne sont pas connues de façon exacte (géométrie du barrage, positions et/ou orientation de la source et des capteurs, caractéristiques des matériaux, ...). On pourra sur cette base envisager de les estimer. L'application aux mesures réelles obtenues sur site est aussi envisageable.

Enfin, d'autres pistes de recherche restent à étudier. Par exemple, nous souhaitons comparer notre méthode avec l'approche de migration, qui avait déjà été utilisée pour cette problématique mais dans une version simplifiée. Ce type de méthode est plus rapide et moins exigeant en termes de ressources informatiques. Cependant, ces techniques présentent des limites en termes de résolution d'image, en particulier dans des zones complexes où la propagation des ondes est fortement perturbée. Une possibilité serait d'utiliser la méthode de migration comme une étape d'initialisation pour la méthode « Full Waveform Inversion », ce qui pourrait contribuer à réduire le temps de calcul.

## Références

1. Michler, C., Demkowicz, L., Kurtz, J., and Pardo, D., Improving the performance of perfectly matched layers by means of hp-adaptivity. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, 23(4), 832-858. (2007).
2. Lailly, P, The Seismic Inverse Problem as a Sequence of before Stack Migrations, Bednar, J.B., Robinson, E. and Weglein, A., Eds., *Conference on Inverse Scattering, Theory and Application*, SIAM, Philadelphia, 1983, 206-220.
3. Tarantola, A, Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation. *Geophysics*, 1984, 49(8):1259-1266.
4. Murat, F., Simon, J., Sur le contrôle par un domaine géométrique. *Laboratoire d'Analyse, Numérique de l'Université de Paris VI*, (1976).

5. Cea, J. Conception optimale ou identification de formes, calcul rapide de la dérivée directionnelle de la fonction coût. *M2AN - Modélisation mathématique et analyse numérique*, Tome 20 (1986), no. 3, pp. 371-402.
6. Henrot, M., Michel, P., *Variation et optimisation de formes*, Collection Mathématiques & applications, 24, Springer, Paris (2005).
7. Allaire, G and Schoenauer, M, *Conception optimale de structures*, Mathématiques et Applications, Springer Berlin Heidelberg, (2006).