



HAL
open science

Détection de cavités souterraines par tomographie 3D en ondes de surface

Kevin Samyn, Adnand Bitri

► **To cite this version:**

Kevin Samyn, Adnand Bitri. Détection de cavités souterraines par tomographie 3D en ondes de surface. 12èmes Journées scientifiques de l'AGAP, Oct 2013, Nancy, France. 4 p. hal-00872897

HAL Id: hal-00872897

<https://brgm.hal.science/hal-00872897v1>

Submitted on 14 Oct 2013

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.

Détection de cavités souterraines par tomographie 3D en ondes de surface

K. Samyn⁽¹⁾, A. Bitri⁽¹⁾

⁽¹⁾ BRGM, Direction Risques et Prévention, Unité Risque Cavités, Aménagement et Imagerie

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le cadre du programme de Recherche et Développement initié par le Plan Cavité et a pour objectif le développement et l'amélioration de méthodes géophysiques non destructives pour la détection, la caractérisation et la surveillance des cavités souterraines et des désordres associés. La méthode géophysique concernée par cette étude est la tomographie sismique 3D en ondes de surface.

Pour mieux comprendre les réponses sismiques provenant de cavités différentes, un code de modélisation élastique 3D en différences finies est utilisé. La méthode de différences finies a été choisie pour sa capacité de prendre en compte des modèles 3D hétérogènes pour pouvoir introduire des configurations géologiques complexes notamment la présence d'une cavité et simuler correctement la propagation des ondes de surface. Les sismogrammes synthétiques ainsi générés ont été utilisés pour tester l'efficacité du code d'inversion tomographique 3D des ondes de surface. Les résultats de l'inversion des temps d'arrivées montrent que les anomalies de perturbations de vitesse sont relativement cohérentes avec la profondeur et la forme réelles des cavités des modèles synthétiques.

Si ces méthodologies fonctionnent dans un cadre théorique idéalisé, tel un milieu homogène en l'absence de bruit de mesure, l'ajout de bruit haute fréquence dans les données dégrade fortement les inversions, rendant leurs résultats incertains. Dans ce cas le couplage avec d'autres méthodes géophysiques, serait particulièrement intéressant.

Modélisation élastique 3D

Afin d'interpréter correctement les données sismique acquises sur le terrain il convient d'extraire la signature de la cavité du bruit géologique environnant. Pour cela il est nécessaire de comparer les données enregistrées au droit d'une cavité connue, à des données simulées numériquement. L'objectif est de fournir un outil de modélisation directe permettant de simuler la propagation 3D élastique dans le sous-sol et un outil d'inversion tomographique 3D des temps d'arrivées. Comme la qualité des résultats dépend du modèle numérique utilisé celui-ci a été choisi pour prendre en compte :

- des modèles 3D hétérogènes pour pouvoir introduire des configurations géologiques complexes notamment la présence d'une cavité ;
- une propagation élastique 3D pour simuler les ondes de surface ;
- la production de sismogrammes synthétiques et d'instantanées de propagation comme document de base de l'interprétation ;
-

Après avoir introduit le modèle physique choisi, les algorithmes de modélisations numériques et inversions tomographiques des exemples d'application seront exposés et commentés.

Il existe de nombreuses méthodes numériques pour résoudre le problème de la propagation des ondes élastique dans le sous-sol. Parmi elles, on peut mentionner la méthode basée de la théorie des rais (Cerveny et al. 1977), la méthode de réflectivité (Fuchs et Muller, 1971), celles basées sur les faisceaux gaussiens (Madariaga and Papadimitriou, 1985 ou enfin les méthodes de différences finies (Virieux, 1986, Lavander, 1988, Graves, 1996). Elle consiste à discrétiser le milieu à l'aide d'une grille de points équidistances, ce qui permet d'approximer les dérivées d'une fonction par des combinaisons linéaires de valeurs discrètes basé sur le développement en série de Taylor de la fonction concernée.

L'avantage de ces dernières méthodes réside dans le pouvoir de prendre en compte n'importe quel type d'onde se propageant dans des milieux hétérogènes. Les interfaces qui séparent des milieux très différents (comme la limite air/sol ou sol/eau) sont facilement modélisables. Ces méthodes ont aussi des limitations. La première limitation est la dispersion numérique qui n'autorise pas de propagations sur des grandes distances. La seconde est le temps de calcul qui augmente avec la taille du modèle et la fréquence maximale du signal source. Ces limitations sont négligeables dans le cas de notre étude car les modèles simulés sont de l'ordre de la centaine de mètres cubes.

La formulation proposée par Virieux (1986) est celle des équations de l'électrodynamique au premier ordre, où les vitesses et les contraintes s'expriment en fonction des propriétés mécaniques du milieu. Ces équations doivent être complétées par des conditions initiales et conditions aux limites du domaine considéré (Cerian et al. 1985, Virieux 1986, Collino and Tsogka, 2001, Bohlen and Saenger 2006). Le modèle de différence fini permet de modéliser des milieux très hétérogènes y compris des cavités remplis d'eau. Les paramètres élastiques de l'air sont trop différents de ceux qui caractérisent le milieu rocheux, donc un vide ne peut pas être introduit dans le modèle précédent. La solution est de considérer le vide comme un sous-domaine au sein du maillage et de lui imposer des conditions de type de surface libre (Grandjean 1998).

Afin de montrer l'efficacité et les apports de la modélisation élastique 3D, quelques cas sont étudiés. Il s'agit de modèles 3D à couches planes horizontales dont la deuxième couche contient une cavité simple et une cavité complexe. Le dispositif d'acquisition 3D est constitué de 4 lignes parallèles ou chaque ligne contient 24 récepteurs espacés de 2m. Les tirs sont disposés selon 4 lignes perpendiculaires aux lignes des géophones et espacés de 4m le long de ces lignes. La source sismique est un point force agitant en surface $z=0$ représentée en temps par la fonction de Ricker de l'ordre 2. L'illustration 1 montre les instantanés de propagation à différents temps de la composante verticale du champ d'onde élastique en surface dans le cas de la cavité simple et complexe. Ces instantanés montrent une perturbation de l'onde P et une perturbation plus conséquente de l'onde de Rayleigh (onde R). Ce sont ces perturbations de temps de trajets de l'onde de Rayleigh que nous proposons d'étudier, dans ce rapport, par tomographie 3D en ondes de surface.

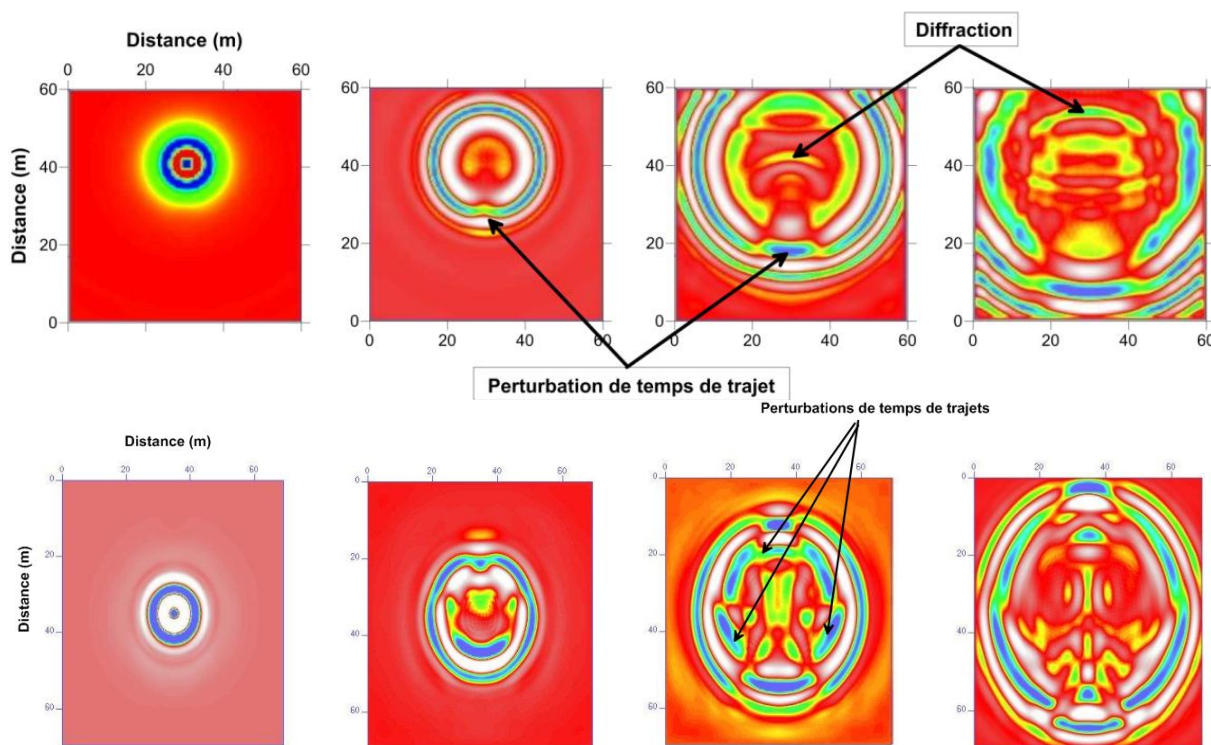


Illustration 1 : Instantanés de la composante verticale du champ d'onde élastique en surface, dans le cas d'un milieu stratifié contenant une cavité simple (haut) et complexe (bas).

Tomographie

Il existe de nombreuses techniques d'analyse temps-fréquence permettant d'évaluer la transformation de Fourier dans des petites fenêtres glissantes le long du signal sismique (Allen and Rabiner, 1977). Cependant, ces techniques souffrent généralement d'un manque de résolution pour le pointé précis de perturbations de temps trajet. Dans cette étude, nous avons donc mis au point une séquence de traitement permettant de mesurer plus précisément les temps de trajet de l'onde de surface aux différentes fréquences. Des sismogrammes synthétiques ont été générés à partir de ces modèles par un algorithme de modélisation par différences finies élastique temps.

Ces sismogrammes simulent les enregistrements d'une acquisition terrestre 3D avec 4 lignes de 24 géophones espacés de 2 m et 4 lignes de sources espacées de 4 m le long de ces lignes. 53 points de tir ont ainsi été générés, chacun avec 96 récepteurs.

Les perturbations de temps de trajet

Nous utilisons une séquence de traitement, basé sur la correction de la propagation des ondes de surface à partir d'un diagramme de dispersion référence (Dynamic Linear Moveout en anglais, DLMO), ce qui permet d'horizontaliser les évènements d'un tir sismique et de déterminer la valeur des perturbations des temps de trajet dues à la présence de cavité. Cette opération est réalisée pour différentes fréquences entre 10 et 40 Hz tous les 5 Hz à l'aide d'un filtre passe-bande, de manière à établir une tomographie pour chaque de ces fréquences. Les sismogrammes ne sont pas bruités, ce qui facilite le pointé et donc la qualité de l'estimation des temps de première arrivée.

Algorithme d'inversion

L'illustration 3 reprend les principales étapes algorithmiques aboutissant à la détermination de la perturbation de lenteur δs_n pour une itération de la méthode de Gauss-Newton. A partir d'un modèle de lenteur courant s_n , la résolution du problème direct pour N points de tirs fournit les cartes des temps de trajet en tous points de la grille. Pour toutes les positions {source - récepteur}, un tracé des volumes de Fresnel a posteriori permet la construction de la matrice de couverture de rai. Cette matrice et les résidus calculés à partir des temps observés à la surface sont ensuite utilisés pour la résolution itérative du système linéaire tomographique. Cette résolution permet de déterminer la perturbation de lenteur δs_n à appliquer au modèle courant. Lors du processus itératif de résolution du système linéaire tomographique, la valeur de la racine carrée de la moyenne des carrés des résidus des temps de trajets, aussi appelée erreur Root Mean Square (RMS) a été calculée. Cette valeur indique, à chaque itérations, si la perturbation de lenteur appliquée au modèle courant permet de mieux expliquer les données observées ou non. Pour cette étude, les temps de trajet ont été remplacés par les perturbations de temps de trajets mesurées au paragraphe 3. 4. 2. Les résultats de l'algorithme de tomographie seront donc des modèles de perturbation de lenteur (ou de vitesse).

L'algorithme de tomographie des perturbations de temps de trajet décrit précédemment a donc été appliqué sur les cartes de perturbation de temps de trajets observées pour des fréquences allant de 10 à 40 Hz tous les 5 Hz. Les résultats consistent en des cartes de perturbation de vitesse pour chacune de ces fréquences (Illustration. 2). De manière à reconstruire un modèle 3D de perturbation de vitesse engendré par la présence de cavités, toutes les cartes de perturbation de vitesse obtenues à l'aide de l'algorithme tomographique ont été interpolées. Pour ce faire, une conversion fréquence profondeur a été préalablement réalisée à l'aide d'une relation empirique. Les résultats obtenus montrent que les anomalies de perturbations de vitesse sont relativement cohérentes avec la profondeur et la forme réelles des cavités des modèles synthétiques. Dans le cas de la cavité complexe, la forme de cette cavité est moins bien reconstruite du fait d'un manque d'information en profondeur.

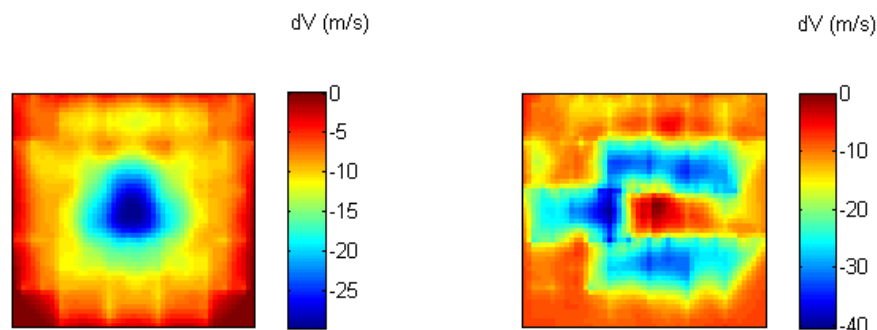


Illustration 2 : Cartes de perturbation de vitesses pour la fréquence 20 Hz dans le cas de la cavité simple (gauche) et complexe (droite).

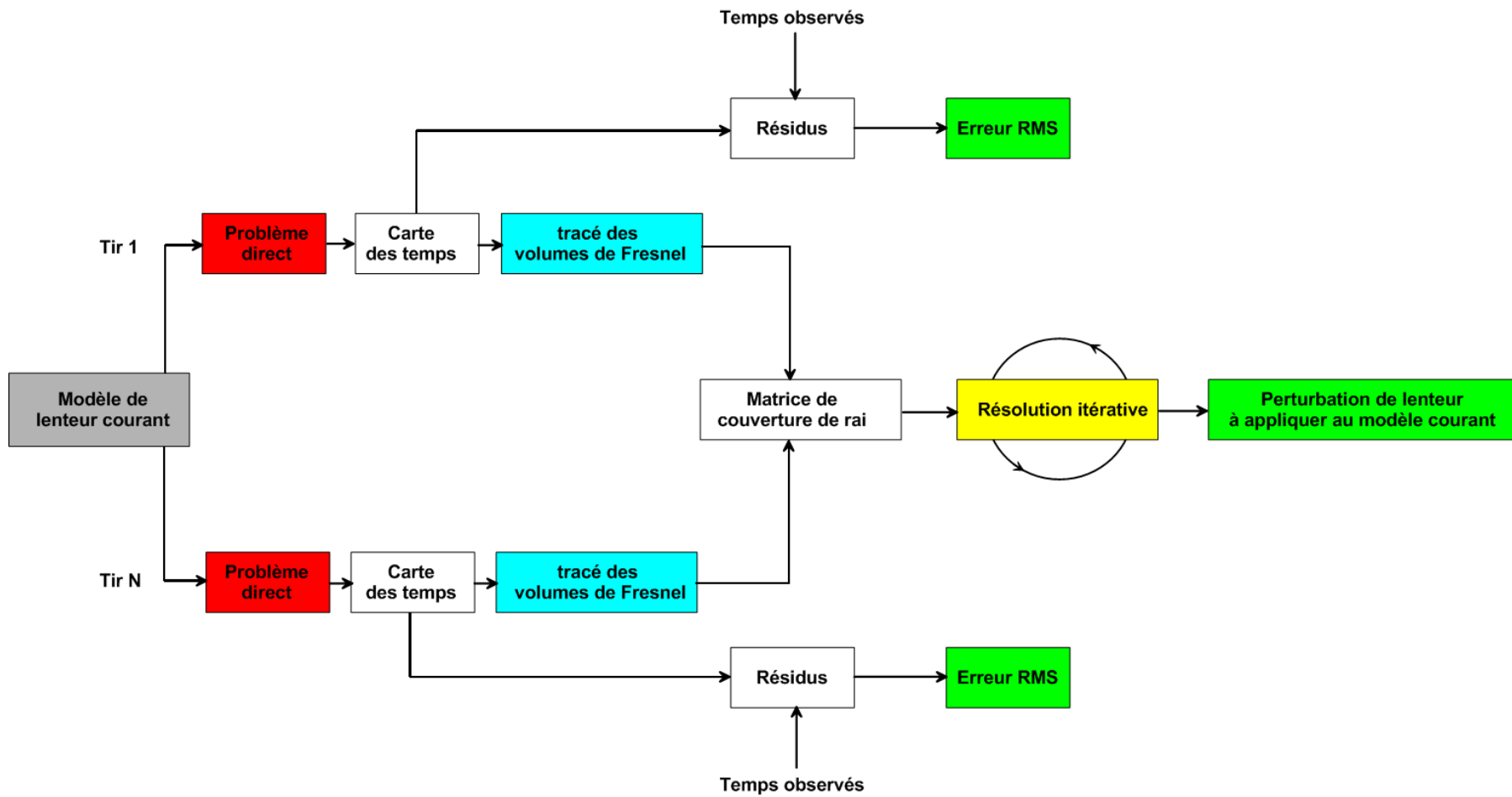


Illustration 3 : Diagramme illustrant les principales étapes de l'algorithme de tomographie de perturbation de temps de trajet à partir de la méthode de Gauss-Newton.