



HAL
open science

Développement et application de méthodes d'imagerie sismique pour la détection des cavités souterraines en milieu urbain

Cyrille Balland, Arkadiusz Kosecki, Bogdan Piwakowski

► **To cite this version:**

Cyrille Balland, Arkadiusz Kosecki, Bogdan Piwakowski. Développement et application de méthodes d'imagerie sismique pour la détection des cavités souterraines en milieu urbain. 11. Journées Scientifiques AGAP-Qualité, Nov 2010, Saint-Brieuc, France. pp.75-78. ineris-00973596

HAL Id: ineris-00973596

<https://ineris.hal.science/ineris-00973596>

Submitted on 4 Apr 2014

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.

Développement et application de méthodes d'imagerie sismique pour la détection des cavités souterraines en milieu urbain

Cyrille Balland¹, Arkadiusz Kosecki¹, Bogdan Piwakowski²

(1) Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), Ecole des Mines de Nancy, Parc de Saurupt, 54042 Nancy cedex, France,

arkadiusz.kosecki@ineris.fr, cyrille.balland@ineris.fr

(2) Ecole Centrale de Lille, BP 48, Cité Scientifique, 59651 Villeneuve d'Ascq, Bogdan.Piwakowski@ec-lille.fr

Contexte et objectifs

L'existence dans le sous-sol de cavités souterraines d'origine anthropique et abandonnées ou naturelles représente un risque potentiel d'effondrement particulièrement sensible en milieu urbain. Dans le cas où la position de ces cavités est connue, la prévention consiste avant tout à cartographier le risque sur un plan d'urbanisation, via un Plan de Prévention des Risques Naturels. Dans le cas contraire, la cartographie des zones d'aléas peut être établie en utilisant des méthodes de reconnaissance. C'est précisément dans ce cas qu'il apparaît essentiel de mettre en œuvre des moyens de reconnaissance du sous-sol appliqués aux cavités souterraines. Leur détection et leur localisation constituent un enjeu technique et scientifique capital dans le processus de gestion du risque.

Dans la plupart des cas, la recherche de cavités s'effectue à l'aide de méthodes destructives, typiquement des réseaux de sondages pour les galeries ou des décapages de surface pour les puits. Le décapage est cependant impossible à appliquer avec un tissu urbain trop important ou avec des remblais trop épais. Par ailleurs, lorsque les cavités sont plus profondes, remblayées ou de petite taille, un maillage de sondages, même dense, ne garantit plus leur détection. Ces différentes conditions défavorables se retrouvent logiquement dans les zones urbanisées où les enjeux et les risques sont les plus élevés. Des travaux de recherche ont donc été conduits pour choisir et affiner des méthodes géophysiques capables de détecter les cavités plus profondes ou sous bâti.

Des travaux récents ont montré qu'en dehors de l'application « classique » pour l'imagerie de la stratigraphie des couches peu profondes, la Sismique Réflexion Haute Résolution est utilisée avec succès pour la détection et la localisation des cavités souterraines (Kosecki et al., 2010, Driad et Piwakowski, 2002; Piwakowski et Leonard, 2000). Cependant, le retour d'expérience de ces nombreuses applications a montré certaines limites. Les sources sismiques haute fréquence excitent fortement les couches proches de la surface, générant différents types d'ondes caractérisées par de fortes amplitudes (ondes de surface, ondes réfractées, ondes aériennes...). Ces signaux constituent un bruit perturbateur de l'analyse des ondes réfléchies (exploitées en sismique réflexion) dont les amplitudes sont en général plus faibles. La source doit donc être à la fois puissante génératrice de hautes fréquences, idéalement légère, maniable et répétitive. Les sources capables de répondre à certaines de ces conditions sont essentiellement destructives, par conséquent, elles ne peuvent être utilisées en milieu urbain. L'analyse de l'état de l'art sur l'évolution récente de la SHR indique clairement que le « type » et les paramètres de la source sismique constituent le facteur principal de progrès dans ce domaine (Piwakowski, 2004b, Portolano et Odin, 2004).

La caractérisation du sous-sol par tomographie sismique est étudiée depuis 1971 (Bois et Coll.). La première arrivée des ondes P est la plus souvent utilisée dans l'inversion tomographique, mais d'autres paramètres du train d'onde peuvent être utilisés pour augmenter la résolution (Khalil et al., 1993). Plus récemment, la tomographie sismique a été appliquée à la recherche de cavités. Louis et al (2005) ont utilisé la tomographie sismique pour détecter des vides peu profonds sous les ruines d'un site archéologique. Il s'avère cependant que la méthode est peu efficace lorsque les cavités sont trop petites par rapport à la taille du dispositif, la fréquence des ondes ou la couverture des rais. Il faut aussi que le contraste entre la cavité et l'encaissant puisse perturber l'image tomographique plus fortement que les autres hétérogénéités du sous-sol. Enfin, au même titre que la SHR, la tomographie sismique est souvent lourde et coûteuse de par sa mise en place ou son traitement long et complexe.

Le travail de recherche présenté ici avait donc pour objectif d'améliorer la performance de ces deux méthodes d'imagerie sismique. Pour la SHR, il s'agissait de concevoir, piloter et appliquer une source non destructive et puissante, capable de générer des ondes de haute fréquence pour optimiser la résolution et la qualité de l'image sismique. Pour la tomographie sismique, il fallait d'abord concevoir

un dispositif capable de détecter sous bâti des puits verticaux de petite section et remblayés depuis le XVII^{ème} siècle. Ils ne présentent plus qu'une faible anomalie sismique demandant alors une sensibilité et une résolution suffisamment élevée. L'enjeu de ces travaux était aussi de réduire le temps d'acquisition et de traitement de ces deux méthodes pour les rendre plus simples d'utilisation et ainsi plus performantes en terme de coût bénéfice.

Résultats

Sismique réflexion Haute Résolution

Une nouvelle source a été conçue sur la base d'un vibreur électromagnétique industriel. Un système de pilotage de la source vibratoire comprenant un logiciel permettant d'optimiser le signal source a été élaboré, testé et validé (Kosecki, 2009). Cette nouvelle source a été appliquée en aveugle sur une marnière (Fauville en Caux, Normandie). L'analyse de deux profils SHR a permis de constater que la source produit un signal de bonne qualité (rapport signal/bruit élevé) en comparaison avec le signal produit par une chute de poids (masse). Les deux sismogrammes (

Figure 14) mettent en évidence des ondes de surface très fortes, propres au contexte géologique rencontré en Haute-Normandie. Le contenu fréquentiel des signaux obtenus avec le vibreur est plus élevé, avec des fréquences dominantes dépassant 100 Hz.

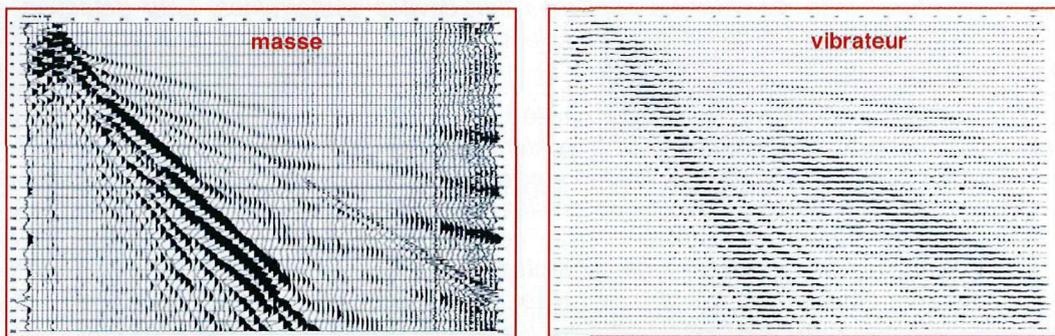


Figure 14 : Exemple de sismogrammes bruts obtenus avec la masse et avec le vibreur.

Après comparaison des anomalies sismiques détectées avec les caractéristiques de la marnière inconnue jusque là, il s'avère que la méthode SHR est capable de détecter clairement des galeries de moins de 15 m de largeur situées à 29 m de profondeur. A contrario, la méthode dans ce contexte n'a pas permis d'identifier les vides de 5 m de large situées à la même profondeur. Par exemple, la zone E de la section sismique illustrée Figure 15 correspond à une galerie de 15 m de large, les réflecteurs supérieurs sont distinctement affectés d'une forte atténuation tandis que les réflecteurs de la zone F ne semblent pas affectés par des galeries de plus petite taille. La non-détection dans la zone F est aussi probablement liée à des variations de couverture instrumentale due à la limitation de la taille des profils. Cette expérimentation a aussi permis de mettre en évidence la différence de signature des cavités. En effet, la zone G montre une perturbation de tous les réflecteurs auscultés. Cette zone correspond à une partie effondrée de la marnière, à comparer avec la galerie vide de la zone E. L'autre section a montré deux anomalies sismiques dont une à la verticale d'une galerie de grande taille et l'autre en dehors de la marnière connue. Des sondages de reconnaissance réalisés par le CETE de Rouen ont découvert à cet endroit des vides correspondant sans doute à une autre marnière.

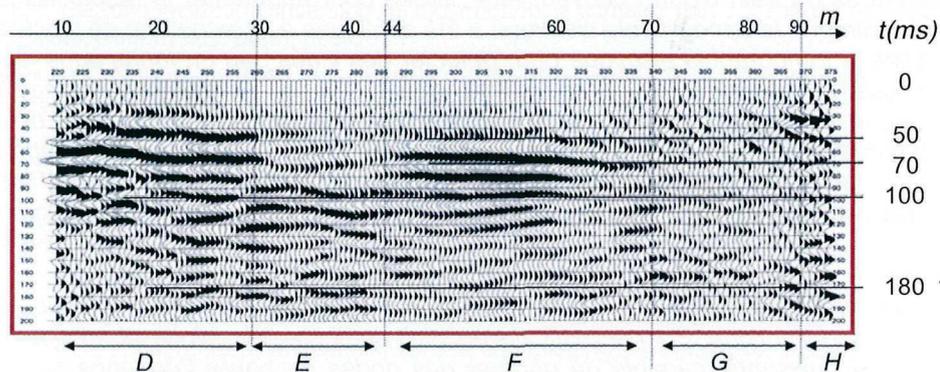


Figure 15 : Section sismique obtenue avec le vibreur.

Tomographie sismique

La résolution de la tomographie sismique est largement dépendante de la précision avec laquelle le temps de parcours des ondes est déterminé. L'estimation de ce temps par simple observation du signal est subjective, imprécise et nécessite une longue analyse, d'autant plus longue que le nombre de rais sismiques utilisés est élevé. C'est pourquoi il est crucial d'améliorer cette précision ainsi que le temps de traitement des données. Lorsque les signaux enregistrés proviennent de la même source et s'ils traversent (approximativement) le même matériau, il est possible d'estimer le temps d'arrivée en utilisant l'opération de corrélation croisée. Un programme informatique sous l'environnement LabView™ a été développé spécifiquement pour réaliser les pointés par corrélation, simplifiant et améliorant ainsi le traitement (Figure 16). La corrélation comprend trois étapes : le choix du signal de référence pour la corrélation, le pointage manuel du signal de référence et la corrélation croisée de tous les signaux avec le signal de référence. Ce traitement habituellement fastidieux permet de diminuer le bruit de mesure et de mettre en évidence les variations de temps d'arrivée les plus ténues. Cette technique augmente ainsi les chances de détection des anomalies de vitesse du milieu. Cette méthode a été utilisée sur le site de Fresnes-sur-Escaut (Nord). Un plan de tomographie traversait une zone suspectée d'abriter un vieux puits remblayé. L'inclinaison du dispositif était de 45° pour augmenter les chances de sectionner le puits et obtenir le meilleur contraste de vitesse possible. Le dispositif était composé de 48 hydrophones espacés de 0,5 m dans un sondage avec une série de 45 tirs (détonateur unique) dans un autre forage parallèle situé à 13 m du premier (Figure 17). La densité de rais importante et l'utilisation de la corrélation croisée ont permis de reconstituer une image avec une résolution inférieure à 0,4 m. Le dispositif était donc capable ainsi de mettre en évidence des anomalies sismiques de très faible contraste (Figure 17). Après vérification à la pelle mécanique, il s'avère cependant que l'anomalie détectée ne correspondait pas à un puits de mine, mais à un chemin préférentiel de dissolution provoqué par une cuvette en surface. Cela illustre bien la difficulté qu'ont les méthodes d'imagerie sismique à déterminer la présence de cavités avec un degré de confiance en adéquation avec les impératifs de gestion du risque.

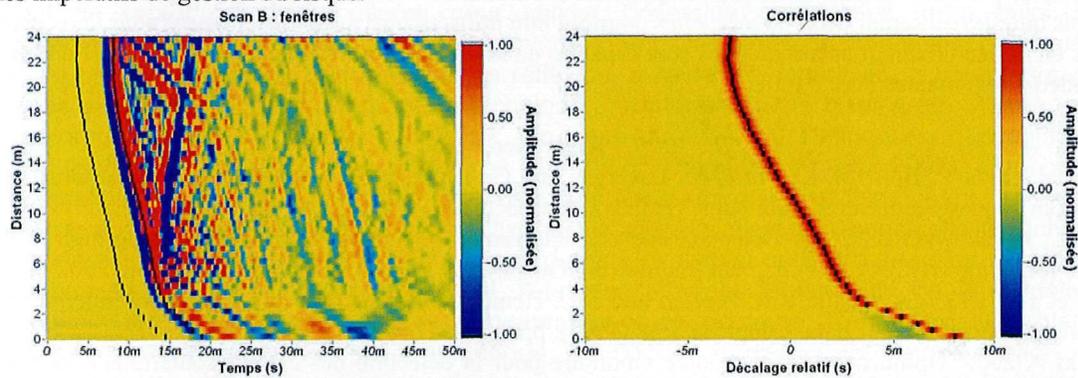


Figure 16 : A gauche ; signaux avec l'indication de positions des fenêtres de corrélation; à droite ; corrélations croisées de tous les signaux avec le signal de référence.

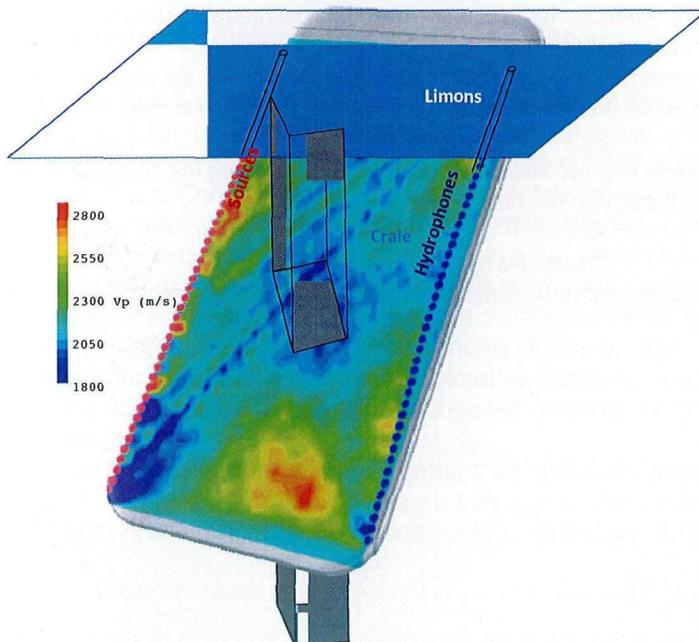


Figure 17 : Image tomographique corrélée avec les indices supposés de puits en surface.

Conclusion

Ces deux expérimentations d'imagerie sismique montrent combien il est important d'améliorer à la fois la couverture spatiale des rais sismiques et la précision temporelle de l'acquisition afin d'optimiser la qualité des images sismiques. Pour la SHR, une source vibratoire portable s'avère pouvant être facilement adaptée à chaque type de terrain et de cavité. Pour cela, il faut pouvoir piloter la source avec un signal optimisé pour le contexte donné et contrôler la réponse du sous-sol en temps réel. Par ce biais, les capacités de la SHR sont améliorées et permettent de détecter les cavités dans un plus grand nombre de cas à des profondeurs que peu de méthodes peuvent atteindre. L'expérimentation de Fauville-en-Caux en aveugle a permis de déterminer plus précisément les limites de la caractérisation des cavités par la SHR, à la fois de par leur nature (vide, remblayée, bordée de piliers) ou par leur taille. Elle a mis en évidence la qualité supérieure des sismogrammes obtenus avec la source vibratoire portable par rapport à une source impulsionnelle classique non-destructive.

Pour la tomographie sismique, le simple fait d'incliner le dispositif à 45° a amélioré géométriquement les chances de détecter des puits de mines verticaux. En parallèle, les développements pour la corrélation des signaux permettent d'augmenter à la fois le volume d'informations et la précision des mesures tomographiques. Par ces moyens, il est alors envisageable d'effectuer une imagerie sismique en « quasi temps réel » (sur site) pour apporter une réponse rapide pour la détermination du risque et éventuellement pour son traitement avec les moyens déjà déployés. Cependant, quelle que soit la résolution de la méthode, la présence d'une anomalie sismique n'est pas la garantie de la présence de l'objet recherché. Les résultats de l'imagerie sismique ne peuvent donc pas affirmer à coup sûr la présence ou l'absence d'une cavité souterraine. Les prochains travaux de recherches, notamment sur la problématique des puits abandonnés, auront pour objectif de développer des outils de traitement capables d'estimer plus précisément cette probabilité dans un contexte donné.

L'amélioration du temps d'acquisition et du traitement de la tomographie sismique comme de la SHR se traduit logiquement par une diminution du coût d'application qui constitue le principal inconvénient de ces méthodes. Une fois qu'elles en seront débarrassées, elles pourront être utilisées plus systématiquement pour la recherche de cavités en milieu urbain, d'autant qu'elles sont capables de les détecter directement sous bâti pour l'une ou à des profondeurs importantes pour l'autre.

Références

- Bois et al., 1971 P. Bois, M. La Porte, M. Lavergne and G. Thomas, Essai de détermination automatique des vitesses sismiques par mesures entre puits, Geophys. Prospect. 19 (1971), pp. 42–83
- Driad L., Piwakowski B., 2002: Detection and characterisation of underground cavities using high resolution seismic reflection (HRSR). Environment Engineering Geophysics, Aveiro (Portugal), Septembre 2002
- Khalil et al., 1993 A.A. Khalil, R.R. Stewart and D.C. Henley, Full-waveform processing and interpretation of kilohertz crosswell seismic data, Geophysics 58 (1993), pp. 1248–1256
- Kosecki A 2009. Optimisation d'une source vibratoire pour la détection des cavités souterraines par sismique réflexion haute résolution. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille.
- Kosecki A. Piwakowski B. Driad-Lebeau L., 2010, High resolution seismic investigation in salt mining context. Acta Geophysica 58(1), 15-33.
- Louis F. I., Clark R. A., , Louis I. F., and Makropoulos C. C., Nondestructive imaging of small size voids at Akrotiri archaeological site, Thera Island, Greece, by seismic inversion techniques, Journal of Applied Geophysics, Volume 57, Issue 4, July 2005, Pages 306-326
- Piwakowski B., Leonard C., 2000: High resolution seismic imaging as a NDT tool for the shallow subsurface survey, Vth Meeting of International Symposium on Nondestructive Testing Civil Engineering, NDT CE 2000, Japan
- Portolano, P., Odin D.: Application of a new seismic source to shallow surface imaging, Extended abstracts (4pp), EAGE 66th conference & exhibition, Paris, France, June 2004

Mots clés

cavités souterraines, tomographie sismique, sismique réflexion, haute résolution, vibreur, corrélation croisée