



**HAL**  
open science

# Reconnaissance du sous-sol par méthodes géophysiques appliquées à la détection des cavités souterraines

Lynda Driad-Lebeau, Arkadiusz Kosecki

► **To cite this version:**

Lynda Driad-Lebeau, Arkadiusz Kosecki. Reconnaissance du sous-sol par méthodes géophysiques appliquées à la détection des cavités souterraines. Rapport Scientifique INERIS, 2008, 2007-2008, pp.105-108. ineris-01869209

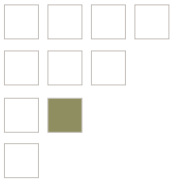
**HAL Id: ineris-01869209**

**<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-01869209>**

Submitted on 6 Sep 2018

**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.



# Reconnaissance du sous-sol par méthodes géophysiques appliquées à la détection des cavités souterraines

> **LYNDA DRIAD-LEBEAU, ARKADIUSZ KOSECKI**

Les recherches scientifiques portant sur les techniques géophysiques visant à détecter, localiser et caractériser les cavités souterraines situées à des profondeurs comprises entre une dizaine de mètres et quelques centaines de mètres (~ 300 m) demeurent plus que jamais d'actualité. En effet, pour cette gamme de profondeur, la plupart de ces techniques présentent des limites de résolution et demandent à être adaptées au domaine d'application visé, à savoir la délimitation et la caractérisation des ouvrages souterrains abandonnés et leur recouvrement. En outre, des compromis entre la résolution de l'imagerie géophysique et les profondeurs d'investigation<sup>(1)</sup> et de détection<sup>(2)</sup> doivent être judicieusement établis selon la technique choisie et la cible recherchée. Par ailleurs, les techniques les plus utilisées pour la détection des cavités, telles que la microgravimétrie, la sismique et la résistivité électrique rencontrent souvent des limitations liées à l'environnement des mesures, en particulier dans les secteurs urbains où l'activité humaine et les conditions de couplage avec le sol diminuent l'efficacité de ces techniques (faible rapport signal/bruit).

Néanmoins, certaines de ces techniques se révèlent prometteuses à condition d'en développer et d'en affiner les outils d'investigation et d'interprétation mis en œuvre aujourd'hui. Focalisé sur cet objectif, ce programme de recherche a consisté à élaborer des outils d'acquisition et de traitement permettant d'augmenter l'efficacité et la résolution de l'imagerie de la technique Sismique Haute Résolution (SHR). Des mesures *in situ*, basées sur trois techniques (microgravimétrie, SHR et résistivité électrique), ont été réalisées afin d'expérimenter ces outils et d'en comparer les performances dans deux contextes distincts (marnières, cavités de dissolution dans le sel).

(1) Profondeur pour laquelle la mesure du champ physique est exploitable. C'est une grandeur théorique qui dépend de la nature du champ et des propriétés des terrains.

(2) Profondeur pour laquelle un objet (cavité souterraine) de dimensions finies produit un champ mesurable en surface. Ce champ dépend du contraste entre les caractéristiques de la cavité et celles de l'encaissant.

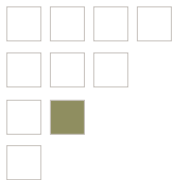
(3) Source de surface non destructive à balayage fréquentiel (Sweep) permettant le choix des fréquences du signal source ou signal pilote. À l'opposé des sources vibratoires, le signal des sources impulsionnelles i.e. destructives, n'est pas connu et les fréquences ne sont pas modulables.

## **PROBLÉMATIQUE SCIENTIFIQUE DE LA DÉTECTION DES CAVITÉS PAR DES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES**

Depuis ces vingt dernières années, de nombreuses applications publiées retracent le potentiel des techniques SHR, la microgravimétrie et la résistivité électrique, à détecter et à localiser des cavités peu profondes ( $H < 100$  m) dans des contextes géologiques et miniers divers. Bien que certaines de ces applications aient été concluantes, notamment les mesures SHR dans le contexte du charbon, du gypse et de la craie<sup>[1,2]</sup>, le problème de détection des cavités par une signature géophysique reste complexe. Ces difficultés d'imagerie sont essentiellement liées aux hétérogénéités géologiques et aux dimensions généralement réduites des cavités par rapport à la profondeur d'investigation.

La Sismique réflexion Haute Résolution est la seule méthode géophysique qui permet de fournir une image continue de la succession des terrains et de leur agencement structural. Le point fort de cette technique tient aux performances, à la fois du dispositif de mesure employé et des moyens d'analyse et de traitement des données disponibles aujourd'hui. Des travaux récents ont montré qu'en dehors de l'application « classique », la SHR est utilisée avec succès pour la détection et la localisation des cavités souterraines et pour la détection des zones effondrées ou remblayées. Cependant, le retour d'expérience de nombreuses études a mis en évidence certaines limites de résolution de l'imagerie dans un contexte géologique particulièrement hétérogène et accidenté. Le traitement des signaux est, en effet, très complexe. Des ondes d'interférence de forte amplitude (ondes de surface, ondes réfractées, ondes aériennes...) masquent la signature utile (ondes réfléchies).

D'autre part, le choix de la source émettrice n'est pas simple ; elle doit être à la fois puissante, génératrice de hautes fréquences et idéalement légère, maniable et répétitive. Les sources capables de répondre à certaines de ces conditions sont essentiellement



> Sources vibratoires en ondes P (VibroPA, VibroPP) et S (VibroS). Le sens de vibration est indiqué par les flèches blanches.

#1

destructives. Elles ne peuvent donc être utilisées en milieu urbain et ne sont pas conformes aux règles de sécurité. Par ailleurs, de nombreuses recherches sur l'évolution récente de la SHR indiquent clairement que le « type » et les paramètres de la source constituent le facteur principal de progrès dans ce domaine.

**OPTIMISATION DE LA RÉOLUTION SHR**

**CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT DE SOURCES VIBRATOIRES**

L'obtention d'une bonne résolution de l'image sismique nécessite l'exploitation d'ondes courtes, c'est-à-dire des fréquences élevées. Compte tenu du fait que l'absorption du milieu augmente avec la fréquence, la fréquence exploitable est naturellement limitée. Selon les principes universels, la maximalisation de la fréquence nécessite l'utilisation de sources sismiques puissantes et/ou large-bandes, capables de générer des impulsions très brèves. Les sources de type vibratoire<sup>(3)</sup> utilisées avec succès dans la sismique pétrolière « classique » peuvent contribuer fortement à l'optimisation de la résolution. En effet, le développement de mini-vibrateurs adaptés à la spécificité de la SHR s'est avéré nécessaire, compte tenu de leur nombre limité en Europe. Un vibreur adapté à la SHR devrait posséder des caractéristiques spécifiques en vue de satisfaire aux objectifs de haute résolution et de concevoir son utilisation en milieu urbain. La première étape de ce programme de recherche a conduit à la mise au point de sources vibratoires portables en ondes P (ondes longitudinales) et S (ondes transversales) et de leur système de pilotage. Pour répondre aux objectifs de haute résolution, des composants mécaniques et électroniques ont été intégrés permettant l'émission d'un signal optimal destiné à l'initiation de la propagation dans le sous-sol (figure 1). Le principe général de fonctionnement est basé sur une émission acoustique par le biais

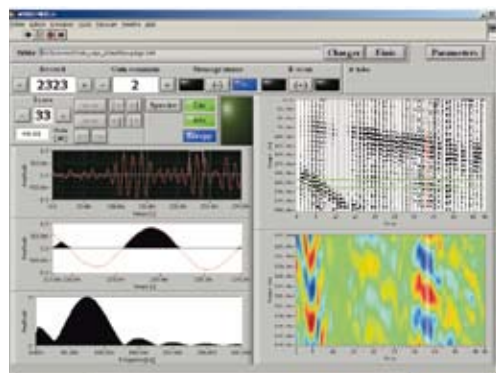
de haut-parleurs d'une puissance maximale de 1500 watts qui restituent des fréquences effectives allant de 20 à 500 Hz. Les vibrations transmises par les haut-parleurs constituent le signal émis dans le sous-sol par couplage acoustique et mécanique. La combinaison de deux types de couplage permet, en effet, d'adapter la source vibratoire aux conditions du site (relief, terrain plat...) et d'augmenter ainsi la résolution des hautes fréquences.

**DÉVELOPPEMENT D'UNE PROCÉDURE DE GÉNÉRATION ET D'OPTIMISATION D'UN SWEEP**

Afin d'assurer le contrôle et la maîtrise du signal émetteur modulable en fréquence (dit « Sweep »), une Procédure de Génération et d'Optimisation de Sweep (PGOS) a été élaborée, dans une optique d'utilisation universelle. Ce travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de doctorat d'Arkadiusz Kosecki, menée en partenariat avec l'École Centrale de Lille et avec l'appui technique et financier de RFF. Il a également abouti au développement d'un programme d'analyse paramétrique et de simulation numérique dans le but d'optimiser la conception des mesures (géométrie) et la résolution « attendue », en fonction des conditions du site et des objectifs. Ces nouveaux développements, réunis en un parc matériel et logiciels, ont fait l'objet de tests de validation sur site. Il s'agissait notamment de comparer leurs performances avec les solutions de référence existantes (mini-vibrateurs disponibles en Europe et les sources impulsionnelles traditionnelles). Les résultats des analyses exhaustives et comparatives confirment la pertinence des solutions techniques retenues et de la méthodologie adoptée pour l'obtention d'une meilleure résolution de l'imagerie SHR<sup>(4)</sup>. Grâce à ces développements innovants, notamment la PGOS et les sources vibratoires non destructives, il est désormais possible d'adapter chaque élément de la chaîne d'acquisition et de conception des mesures aux conditions géologiques de la zone d'intérêt. Par ailleurs, le programme « SABAL », qui intègre le

#2

> Le programme « SABAL ». Émission d'un sweep selon la PGOS (à gauche) et l'analyse interactive des enregistrements (à droite).

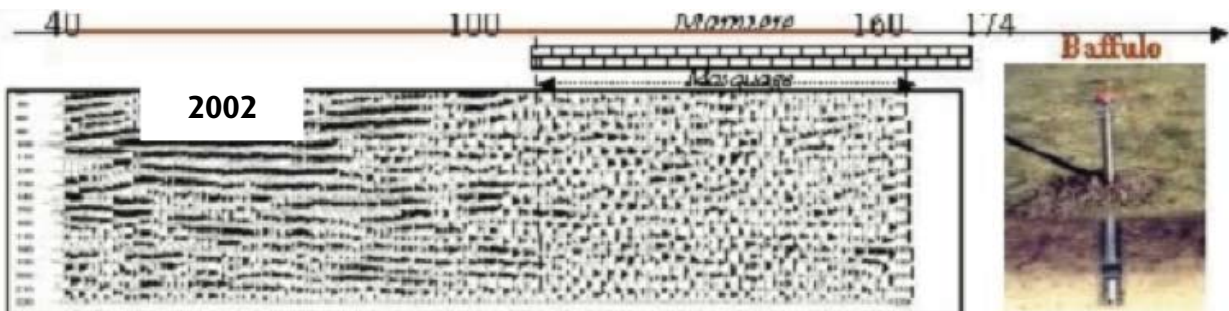
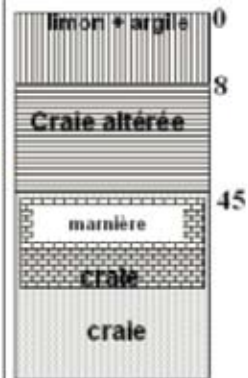
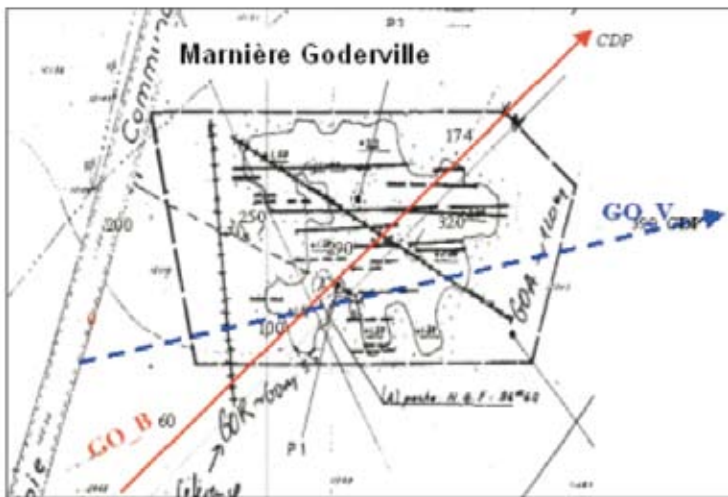


#3

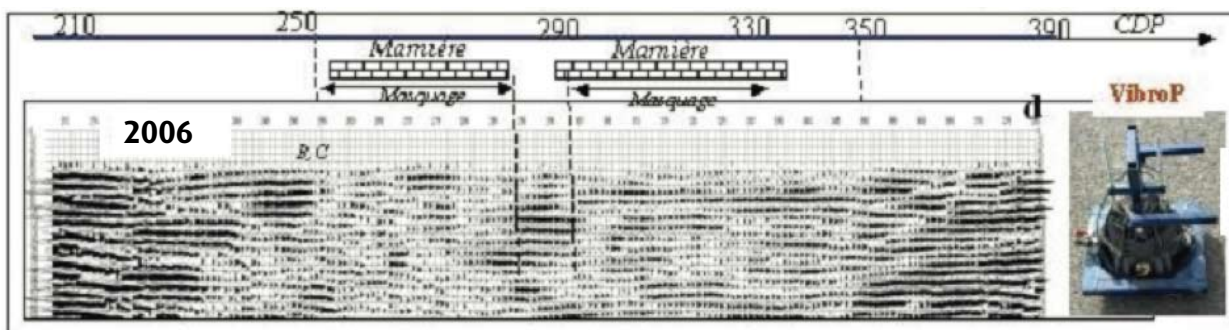


> Imagerie SHR de la marnière de Goderville (H = 45 m). Apport de la source vibratoire à la résolution de l'imagerie (profil bleu).

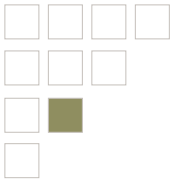
Site expérimental de Goderville  
Mesures SHR dans une zone pavillonnaire.



Source impulsionnelle destructive.



Source vibratoire non destructive.



**[ RÉFÉRENCES**

**[1]** Driad L., Piwakowski B., 2002. *Detection and characterisation of underground cavities using high resolution seismic reflection (HRSR)*. Environment Engineering Geophysics, Aveiro (Portugal), septembre 2002.

**[2]** Piwakowski B., Watelet J.M. and Moreaux D., 1997. *High resolution seismic prospecting of old gypsum mines – evaluation of detection possibilities*. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics 2 (2).

**[3]** Kosecki A., Piwakowski B., Driad-Lebeau L., 2008b. *High resolution seismic investigation in salt mining context: PART II: Comparison of seismic sections*. Near Surface Geophysics, submitted.

**[4]** Driad-Lebeau L., Piwakowski B., Styles P., Bourgeois B., Lataste JF., Contrucci I. *Geophysical detection of underground cavities*. Post-mining, February 6-8 Nancy, France 2008.

**[5]** Piwakowski B., Driad-Lebeau L., Kosecki A., "Detection of underground Marpit mine using High resolution Seismic". 69<sup>th</sup> EAGE Conference & Exhibition, London, UK, June 2007 Expanded abstracts, p113.

**[6]** Kosecki A., Piwakowski B., Driad-Lebeau L., Safinowski P., 2008a. *High resolution seismic investigation in salt mining context: PART I: Comparison of seismic sources*. Near Surface Geophysics, submitted.

pilotage des sources vibratoires, la PGOS, l'analyse paramétrique et l'étude de conception, est opérationnel et répond aux exigences d'une acquisition de mesures SHR de haute qualité (figure 2).

**DÉTECTION DES CAVITÉS PAR DES TECHNIQUES GÉOPHYSIQUES**

Des expérimentations géophysiques se sont déroulées dans deux contextes géologiques et miniers : marnières (anciennes exploitations de craie tendre) de Haute-Normandie, et exploitation de sel du bassin salifère lorrain.

Bien que les sources vibratoires soient encore au stade de « prototype », la possibilité de détecter des cavités salines à plus de 100 m de profondeur a pu être démontrée. D'autre part, dans le contexte géologique défavorable des marnières, les investigations SHR se sont révélées très encourageantes en termes de détection. C'est notamment le cas des interprétations menées sur la marnière de Goderville pour laquelle l'utilisation d'une source vibratoire non destructive a permis d'aboutir à une imagerie complète avec un pouvoir de résolution à la hauteur des objectifs du programme (figure 3)<sup>[1]</sup>. En comparant ce résultat avec celui obtenu précédemment à partir d'une source impulsionnelle<sup>[4]</sup>, l'imagerie SHR, résultant de la nouvelle source vibratoire (VibroPP, figure 1), s'est avérée nettement plus convaincante.

Ainsi, il apparaît que le principe de base de la technique SHR, les performances du nouveau système d'acquisition, et la disponibilité d'un critère de détection<sup>[6]</sup> confèrent une place prometteuse à la SHR pour la détection des cavités souterraines. Par ailleurs, les techniques dites de « potentiel », qui s'appuient sur les mesures microgravimétriques et électriques, ont montré un potentiel de détection de zone d'influence de plusieurs cavités salines situées à plus de 100 m de profondeur. La détection individuelle des cavités n'a toutefois pas été possible, compte tenu de la limitation de ces techniques liées essentiellement aux dimensions des cavités, insuffisantes par rapport à la profondeur d'investigation. Dans le cas des marnières, où l'imagerie électrique n'a pu être exploitée (manque de résolution), l'anomalie liée à la présence de la marnière a bien été identifiée par imagerie microgravimétrique mais une autre anomalie semblable a été observée en dehors de l'influence de la marnière. Ce constat met en exergue la difficulté de cette technique à distinguer les zones « décomprimées » de celles associées à la présence d'une cavité anthropique quelle que soit la nature du remplissage (remblai ou vide). Contrairement à la SHR, il n'existe aujourd'hui aucun critère de détection quantitatif qui permettrait d'évaluer le potentiel de détectabilité d'une cavité.

**SUMMARY**

This document presents a report on research work carried out in the frame work of a large program entitled « Geophysical detection of underground cavities ». The principal objective is to develop tools and procedures to enhance the performance and the resolution of the geophysical imaging. The step that consists in developing technical tools and to improve scientific knowledge in the field of underground sounding applied to the cavities detection and diagnostic is upstream process of risk management. To achieve these goals, the program was elaborated on the basis of partnership research implying scientists and industrial able to associate knowledge, experience, the know-how and the expertise. A large aspect of the work carried out concerns the design and development of acquisition tools to increase the performance of the high-resolution seismic reflection, in particular, to optimise the resolution of the sub-surface imaging. Vibratory sources in P and S waves, a procedure of generation and optimisation of Sweep were developed and validated. Powerful and operational seismic acquisition package is, from now on, available for underground auscultation applied to cavities detection. In addition to SHR (Seismic High Resolution), the geophysical techniques based on the microgravity and electrical resistance measurements were investigated in salt context of Lorraine region (East France) and the marl-pits of Haute-Normandie (North France). It arises from the experiments on pilot sites a satisfactory detection of cavities in the studied contexts thanks to the new developments of HRS acquisition System. In addition, the investigation of the three selected geophysical techniques raised the interest of joint measurements of the high-resolution seismic and the microgravity in particular in the context of the marl-pits. The following report presents the works on the SHR developments, the evidential results of the field experiments carried out in the salt basin of Lorraine and marl-pits of Haute-Normandie as well as an experience feedback of the undertaken research.