

# Imagerie du proche sous-sol par la sismique réflexion haute résolution Application à la détection des cavités

**Bogdan PIWAKOWSKI**  
Maître de conférence

**Isam SHAHROUR**  
Professeur

Laboratoire de Physique des vibrations et d'acoustique  
(IEMN DOAE UMR 9929 CNRS)  
École Centrale de Lille

## Présentation

**Richard LAGABRIELLE**  
Directeur de recherche  
Chef de la division Reconnaissance  
et mécanique des sols  
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

*La détection de cavités souterraines d'origine humaine ou artificielle à l'aplomb d'un ouvrage a toujours été un défi pour les ingénieurs chargés de la reconnaissance des sites de construction.*

*En 1994, je publiais une note d'information technique, dans le Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées [1], dans laquelle je décrivais une méthodologie pour résoudre ce problème. Elle faisait appel à un ensemble de techniques qui vont de la consultation d'archives écrites et orales au forage en passant par l'étude géologique détaillée et le recours aux méthodes géophysiques. Cette démarche est naturellement toujours valable. Mais parmi les méthodes géophysiques de surface, je ne citais même pas de méthode sismique, et pour ce qui est de la géophysique de forage j'excluais explicitement la sismique. La raison de cet ostracisme pour les méthodes sismiques était que celles-ci sont traditionnellement proposées en recherchant des retards dans les temps de trajets des ondes mécaniques. Les retards sont dus au fait que la présence d'une cavité souterraine se traduit par une anomalie « lente » des vitesses sismiques. Or un simple calcul d'erreur montre que les anomalies de temps de trajet sont généralement du même ordre de grandeur que l'erreur sur la mesure des temps (voir par exemple [2]).*

*Dans leur article, Bogdan Piwakowski et Isam Shahrour décrivent une méthode de détection des cavités souterraines par sismique réflexion haute résolution. Ils montrent qu'ils ont pu détecter des cavités souterraines dont les caractéristiques de dimension et de profondeur sont telles que seule, parmi les méthodes géophysiques, la microgravimétrie pouvait permettre la détection.*

## RÉSUMÉ

Dans cet article, on présente des applications de la méthode sismique réflexion haute résolution à la reconnaissance du proche sous-sol et plus particulièrement à la détection des cavités peu profondes. Après une description du principe de cette méthode et du dispositif de mesure utilisé, on présente des applications réalisées dans trois sites. Les deux premières concernent des sites comportant des cavités résultant de l'exploitation de la craie, la dernière application porte sur un site minier à structure géologique très hétérogène avec de nombreuses microfailles. Ces exemples illustrent les progrès enregistrés avec cette méthode tant au niveau du dispositif de mesure que des méthodes d'interprétation qui la rendent très compétitive pour la reconnaissance du proche sous-sol dans des sites peu urbanisés.

**MOTS CLÉS** : 41 - Détection - Cavité - Souterrain - Sismique - Méthode - Appareil de mesure - Prospection - Géophysique - Sous-sol - Réflexion - Craie - Mine (gisem.) - Interprétation - Imagerie sismique.

*La méthode sismique décrite ici est efficace parce que d'autres anomalies que celles de temps de trajet sont prises en compte : atténuation du signal due au phénomène de masquage de la cavité qui se trouve sur le trajet des rayons sismiques, modification du contenu fréquentiel des signaux sismiques...*

*Cette méthode qui est rapide et efficace doit être mise en œuvre par des spécialistes de la sismique réflexion, bien au fait des techniques de traitement des signaux et des phénomènes physiques qui influent sur la propagation des ondes mécaniques, et qui savent communiquer efficacement avec les géologues.*

*Les auteurs indiquent bien les limites de leur méthode : les zones très urbanisées doivent être exclues, et il doit exister au-dessous du niveau des cavités des réflecteurs horizontaux dont le rôle est de renvoyer vers la surface du sol l'énergie sismique qui a traversé la couche contenant les cavités avant de les atteindre.*

*Même si ces conditions ne sont pas toujours réalisées, elles le sont souvent. Il convient donc d'ajouter au catalogue des méthodes géophysiques auxquelles on peut faire appel pour détecter les cavités souterraines la sismique réflexion haute résolution telle qu'elle est décrite par Bogdan Piwakowski et Isam Shahrouh.*

- [1] LAGABRIELLE R. (1994), La détection des cavités souterraines, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **191**, mai-juin pp. 91-92.
- [2] LAGABRIELLE R., CÔTE Ph., LECOQ-LEVENT N. (1995), *Comparaison de quelques méthodes géophysiques de forage pour détecter les cavités souterraines*, Journées GEO (CNRS), Aussois, 11-15 décembre.

## Introduction

La reconnaissance du proche sous-sol s'impose dans les projets d'aménagement des sites présentant des risques d'effondrement tels que les sites miniers ou de carrières souterraines. Elle est également primordiale pour des problèmes d'environnement où la présence des cavités ou des microfailles peut affecter l'hydrosystème avec des risques de contamination des réserves d'eau.

Cette reconnaissance pose un problème aigu aux géophysiciens. En effet, à cause des activités humaines ou pour des raisons naturelles, le sol peu profond est généralement caractérisé par des fortes hétérogénéités (stratification, altération, présence d'objets durs tels que les anciennes fondations ou des matériaux de décharge, présence de cavités remplies ou vides, fluctuation du niveau de la nappe). Ces hétérogénéités compliquent la tâche du géophysicien qui est appelé à

donner une estimation avec une bonne résolution des objets de diverses natures (durs ou molles), de différentes tailles (de l'ordre de quelques mètres pour les cavités à quelques décimètres pour les conduites) et situés à des profondeurs variées allant de quelques mètres à quelques centaines de mètres dans des sols qui peuvent être le siège d'importantes fluctuations de la nappe.

Ces dernières années, des développements importants ont été enregistrés dans l'utilisation de la sismique haute résolution dans la reconnaissance du sous-sol. Cette technique présente certains avantages pour des applications en génie civil, notamment un faible coût d'utilisation, une possibilité d'utilisation dans la plupart des sols et pour des profondeurs allant de l'ordre de quelques mètres à une centaine de mètres. Afin d'illustrer les possibilités offertes par cette technique, on présente son application à la reconnaissance des sites situés dans le Nord de la France, qui sont caractérisés par la présence de cavités résultant de l'exploitation de la craie ou du charbon.

## Principe de la méthode sismique et dispositif utilisé

Cette section a pour but de présenter brièvement le dispositif de mesure et la méthode de traitement utilisés dans les applications présentées ci-après. Pour davantage de renseignements, on peut se référer à la littérature spécialisée (voir, par exemple, Dobrin, 1983 ; Yilmaz, 1987 ; Knapp et Steeples, 1986 ; Mari et al., 1997a ).

La méthode sismique consiste à provoquer un ébranlement mécanique en surface à partir d'une source impulsionnelle et à observer, à l'aide des récepteurs (géophones), les ondes sismiques réfléchies ou réfractées provenant des surfaces séparant des milieux d'impédances acoustiques différentes. Une campagne sismique comporte deux phases, à savoir l'acquisition de données et leur traitement (fig. 1a).

■ Pour l'acquisition de données, on utilise habituellement un dispositif dans lequel les géophones sont régulièrement espacés le long du profil sondé. Un sismographe, synchronisé avec la source, effectue l'enregistrement simultané des signaux provenant des géophones actifs. Après chaque tir, la source est déplacée le long du profil d'une distance  $\Delta s$  de telle sorte que les distances source-géophones actifs restent constantes (fig. 1b). Les distances entre géophones ( $\Delta x$ ) et entre le géophone le plus proche et la source ( $\Delta s_g$ ) sont déterminées en fonction de la géométrie du site et de la profondeur d'investigation visée. Le choix de ces paramètres constitue une tâche complexe. En effet, il s'agit de définir la fenêtre d'observation optimale (optimum offset window ; Cook, 1965) dans

laquelle les réflexions provenant des cibles à détecter sont séparées des signaux constituant le bruit. Dans certains cas, la définition de cette fenêtre exige des mesures préliminaires. Généralement, la distance  $\Delta s_g$  est prise au moins égale à la moitié de la profondeur de cible alors que le géophone le plus éloigné est placé à une distance de la source  $[\Delta s_g + (n-1)\Delta x]$  au moins égale au double de cette profondeur. Dans le cas où la campagne de mesure vise plusieurs profondeurs, le choix de ces paramètres représente un compromis. La distance  $\Delta x$  doit théoriquement assurer un échantillonnage spatial adéquat de la fenêtre d'observation. Dans la pratique, elle est choisie en fonction de la distance inter-traces de la section finale et du nombre des voix d'acquisition du sismographe (généralement vingt-quatre ou quarante-huit mètres). En sismique haute résolution,  $\Delta s_g$  (respectivement  $\Delta x$ ) varie de quelques mètres à une vingtaine de mètres (respectivement de 0,5 m à 5 mètres).

Comme la résolution en profondeur du sondage (épaisseur de la plus petite couche que l'on peut distinguer) est du même ordre que la longueur d'onde sismique  $\lambda$ , la sismique réflexion haute résolution est fondée sur l'exploitation des ondes courtes provenant des fréquences élevées. Ceci nécessite l'utilisation de sources puissantes et capables de générer des impulsions très brèves (Miller *et al.*, 1986). Le laboratoire utilise, en fonction de la profondeur d'investigation souhaitée et du type de terrains, deux types de sources, à savoir un fusil (betsy) ou un mini-canon (shotgun). L'acquisition de données est effectuée à l'aide de géophones type 100 Hz et d'un sismographe EGG2401 effectuant l'enregistrement simultané des signaux provenant des vingt-quatre géophones actifs.

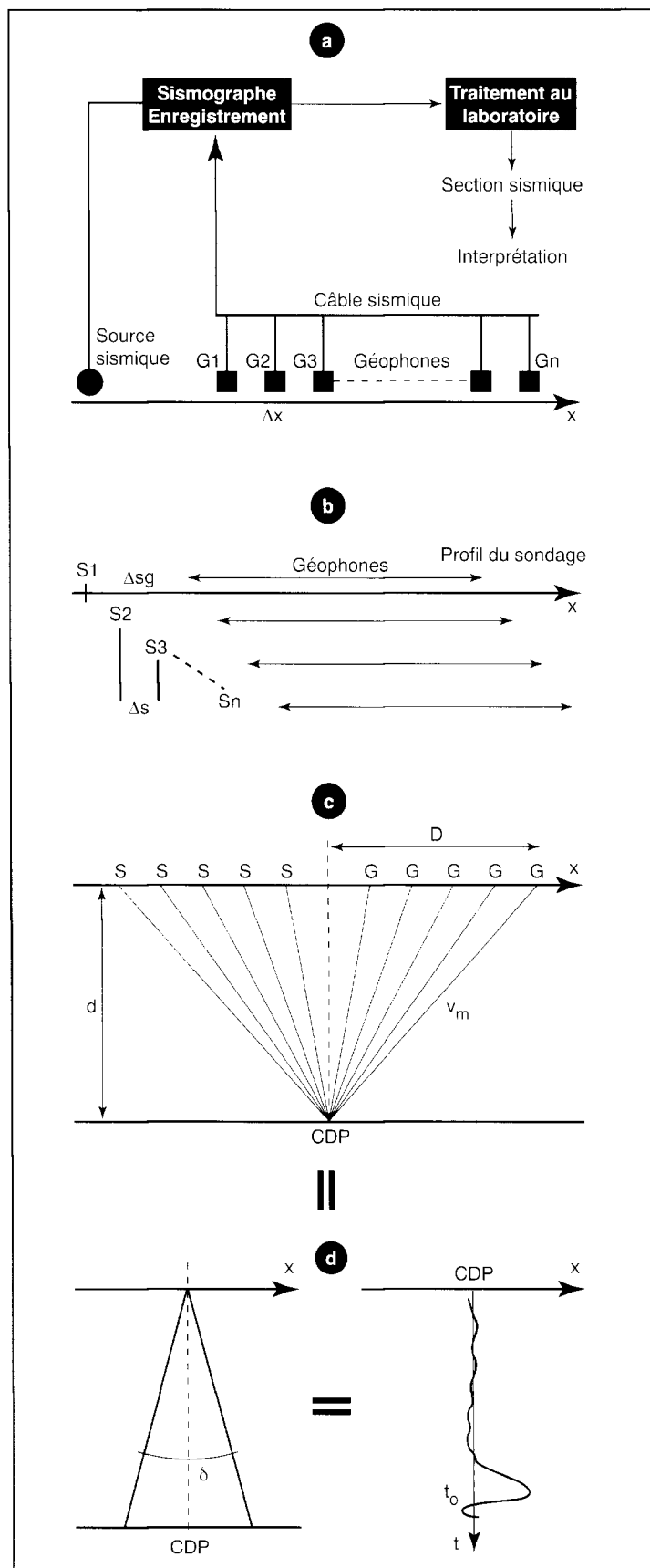
■ **Le traitement de données** (voir, par exemple, Yilmaz, 1987 ; Mari *et al.*, 1997b) comporte différentes phases.

➤ Dans un premier temps, on traite les enregistrements afin d'améliorer leur qualité. La procédure de base comprend le nettoyage des enregistrements (pour éliminer les traces défectueuses), le filtrage passe-bande (pour éliminer les signaux situés hors la bande fréquentielle d'intérêt), le filtrage bidimensionnel (pour supprimer des ondes parasites) et la correction de gain (pour compenser la perte d'amplitude due aux atténuations géométrique et intrinsèque).

➤ L'étape suivante consiste en la création de la couverture multiple. Dans cette opération (fig. 1c), on regroupe les signaux provenant des géophones ayant avec la source le même point milieu appelé « point miroir » (Common Depth Point « CDP »). Cette procédure permet de constituer une source et un récepteur synthétique, de dimension  $D$  (fig. 1d).

Fig. 1 - Mise en œuvre de la méthode sismique haute résolution

a. Système d'acquisition - b. Implantation du dispositif de mesure - c. Création de la couverture multiple autour du point miroir CDP - d. Système de sondage vertical équivalent.



Après un traitement approprié, le signal obtenu peut être assimilé au résultat d'un sondage sismique vertical, réalisé sur le point miroir par une sonde hypothétique. Cette sonde, caractérisée par la résolution angulaire  $\delta$  (proportionnelle au rapport  $\lambda/D$ ), est focalisée sur le point miroir. La distance inter-traces de la section sismique (qui détermine le pas de l'échantillonnage spatial) est généralement égale à la moitié de la distance inter-géophones. L'ensemble des traces obtenues pour le profil sondé donne la section sismique finale (ou coupe-temps) dans laquelle l'échelle verticale indique le temps de trajet (aller/retour) surface-point de réflexion ( $t_0$  sur la figure 1d). La profondeur de ce point peut être trouvée à partir de la relation  $d = 2t_0v_m$  où  $v_m$  indique la vitesse moyenne de propagation (moyenne quadratique) qu'on détermine à partir du traitement.

Finalement, les anomalies présentes sur la section sismique sont interprétées physiquement en fonction des données géologiques du site considéré (stratification, niveau de la nappe, connaissance préalable de certaines cavités, etc.).

### **Problèmes liés à la détection des cavités**

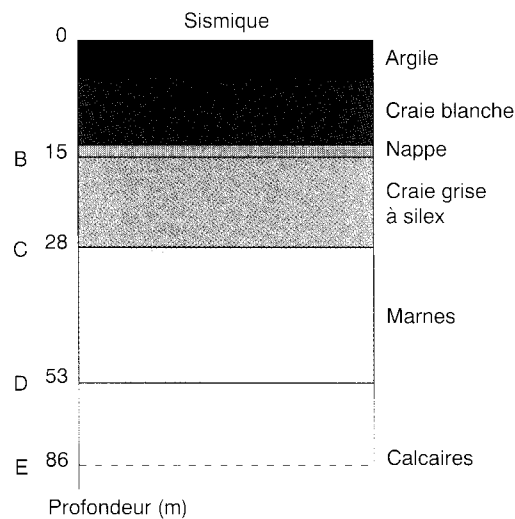
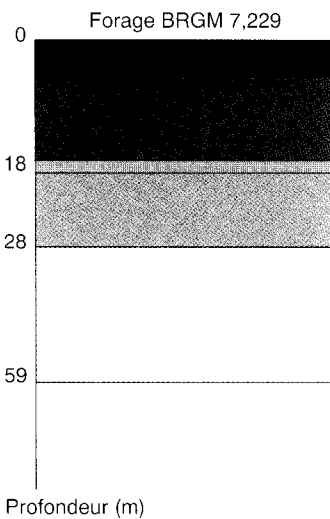
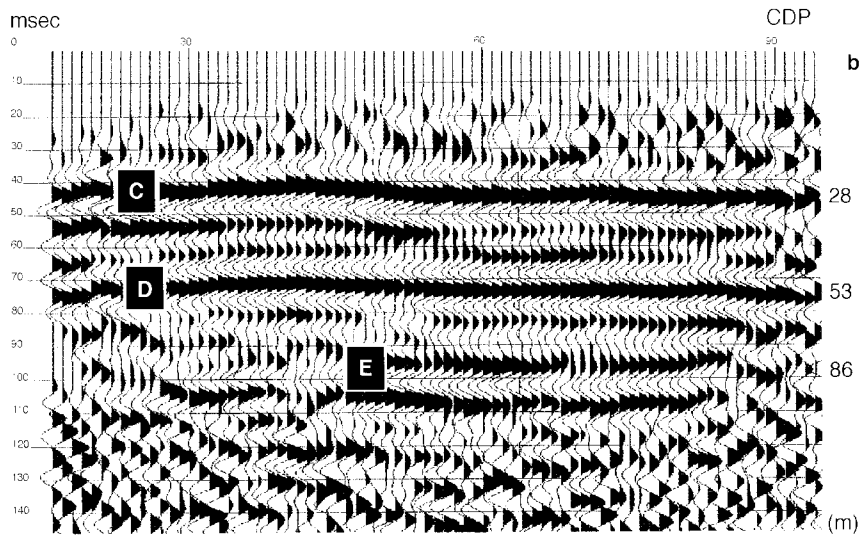
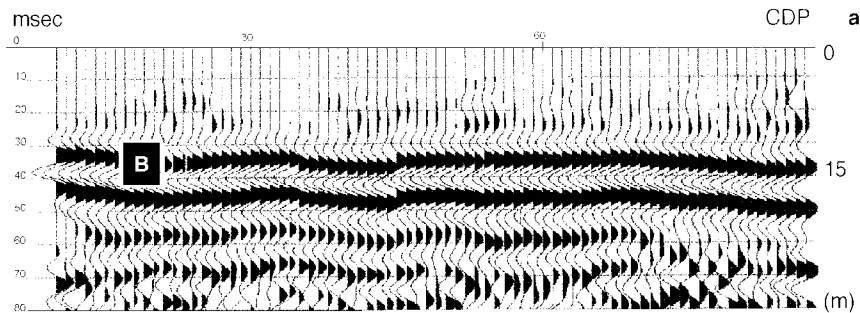
L'application de la sismique haute résolution à la détection des cavités souterraines reste encore limitée aux études à caractère de recherche. Les toits des cavités donnent lieu à des réflexions de différents types. Ces réflexions, qui constituent les signes directs de la présence des cavités, interfèrent avec les signaux provenant des couches régulières et induisent l'apparition d'anomalies dans la section sismique, telles que l'affaiblissement ou l'augmentation des niveaux des signaux, l'affaiblissement de la corrélation mutuelle, la modification du contenu spectral, l'apparition de nouveaux signaux et éventuellement l'excitation des modes propres « phénomène de résonance ». Des études de terrains (Piwakowski, 1989) ainsi que des travaux de modélisation physique (Pernod et al., 1988) et numérique par éléments finis (Eiselt et Shahrour, 1992 ; Moreaux et al., 1996) ont montré que les réflexions directes sur la cavité ont des niveaux relativement faibles ou, du moins, comparables à ceux des signaux représentant la structure géologique du profil exempt de cavité. Par conséquent, les niveaux des symptômes directs liés à la présence des cavités restent relativement faibles. Si l'on admet la nature peu (ou pas) régulière de tous ces symptômes, la détection d'une cavité à partir des signes directs devient très difficile. Compte tenu de cette complexité, on trouve très peu de tentatives de détection réussies à l'aide de cette approche. À titre d'exemple, on peut citer les travaux de Steeples et Miller (1988), qui rendent compte de la détection des réflexions d'un tunnel routier de 6 m de diamètre situé à 19 m de profondeur et de diffractions provenant d'une cavité située à 80 m de profondeur.

Par ailleurs, la présence de cavités constitue un obstacle à la propagation des ondes sismiques dans le sol. Les couches géologiques situées en dessous de ces cavités se trouvent alors dans l'ombre de ces dernières. Les réflexions provenant de ces couches sont donc perturbées, voire masquées (effet de masquage), et peuvent subir des retards additionnels. Ces effets représentent les symptômes indirects caractéristiques de la présence des cavités (Cook, 1965). Actuellement, la détection des cavités à l'aide de la sismique haute résolution est essentiellement fondée sur cette approche. À titre d'exemple, on peut citer les travaux de Branham et Steeples (1988), qui ont détecté avec une bonne résolution des cavités dans une veine de charbon, les travaux de Miller et al. (1988), qui ont localisé une grande cavité à une profondeur de 100 m à partir de l'absence des réflexions provenant des couches plus profondes, ceux d'Allemand (1996), qui a détecté un tunnel routier à une profondeur de 20 m, et enfin les travaux de Kourkafas et Goultly (1996), qui ont localisé d'anciennes mines de gypse à une profondeur de 60 m en observant les anomalies des signaux provenant de la couche de gypse.

Dans cet article, on présente des exemples d'application de cette méthode en utilisant l'approche indirecte. À travers des applications dans différents types de sites, on cherche à étudier la possibilité de détection des cavités peu profondes en fonction de l'hétérogénéité des terrains et de leur urbanisation.

### **Application à la détection des cavités résultant de l'exploitation de la craie dans le Nord de la France**

La région Nord de la France est très affectée par la présence de carrières de craie abandonnées (Leplat, 1973). Ces carrières forment un réseau de cavités souterraines et présentent un danger sans cesse croissant au regard de l'urbanisation. L'exploitation de la craie dans cette région était effectuée à partir de puits d'accès dans la couche de couverture (argile ou limon) avec un élargissement progressif dans la couche de craie (exploitation en forme de bouteille de 7 à 15 m de hauteur) ou par des galeries de 1,5 à 5 m de largeur et de 2,5 à 3,5 m de hauteur. La couverture de ces cavités est généralement faible. Dans certaines exploitations, elle n'est que de quelques mètres. Afin de tester la capacité de la méthode sismique à détecter ce type de cavités, un travail a été entrepris avec le Service d'inspection des cavités souterraines de Douai. Nous allons, ci-après, présenter les résultats obtenus dans deux sites qui sont respectivement situés à Villeneuve d'Ascq, près de Lille et à Anzin, près de Valenciennes. Les deux campagnes de mesure ont été réalisées avec une source type « betsy-gun ».



**Fig. 2 -**  
Application à un site exempt de cavité (Cité Scientifique à Villeneuve d'Ascq).

a. Section sismique révélant le réflecteur noté B (distance entre points miroirs communs : 1 m).

b. Section sismique révélant les trois réflecteurs notés B, C et D.

c. Coupe géologique du terrain d'après les résultats de forage (source BRGM).

d. Coupe géologique d'après l'interprétation de la section sismique.

### Site de Villeneuve d'Ascq

Comme la méthode utilisée dans ce travail est fondée sur l'approche indirecte, il est nécessaire avant l'interprétation des résultats de mesure de connaître la signature sismique des terrains explorés en l'absence de cavités. Afin de disposer de cette signature, des mesures ont été faites le long d'un profil exempt de cavité situé sur le campus universitaire de Villeneuve d'Ascq au voisinage du site étudié. Cette campagne a été réalisée avec une distance entre géophones ( $\Delta x$ )

de 2 m et une distance entre le géophone le plus proche et la source ( $\Delta s_g$ ) de 20 m. La figure 2 présente la section sismique obtenue le long de ce profil. Sur cette section, on peut identifier les principaux réflecteurs géologiques, qui sont notés B, C, D et E. À partir des forages réalisés par le BRGM au voisinage de ce site (fig. 2c) et des vitesses de propagation dans les différentes couches obtenues par traitement, ces réflecteurs sont respectivement interprétés comme la nappe aquifère, l'interface craie/marnes, marnes/calcaire et une sous-couche dans le calcaire (fig. 2d).

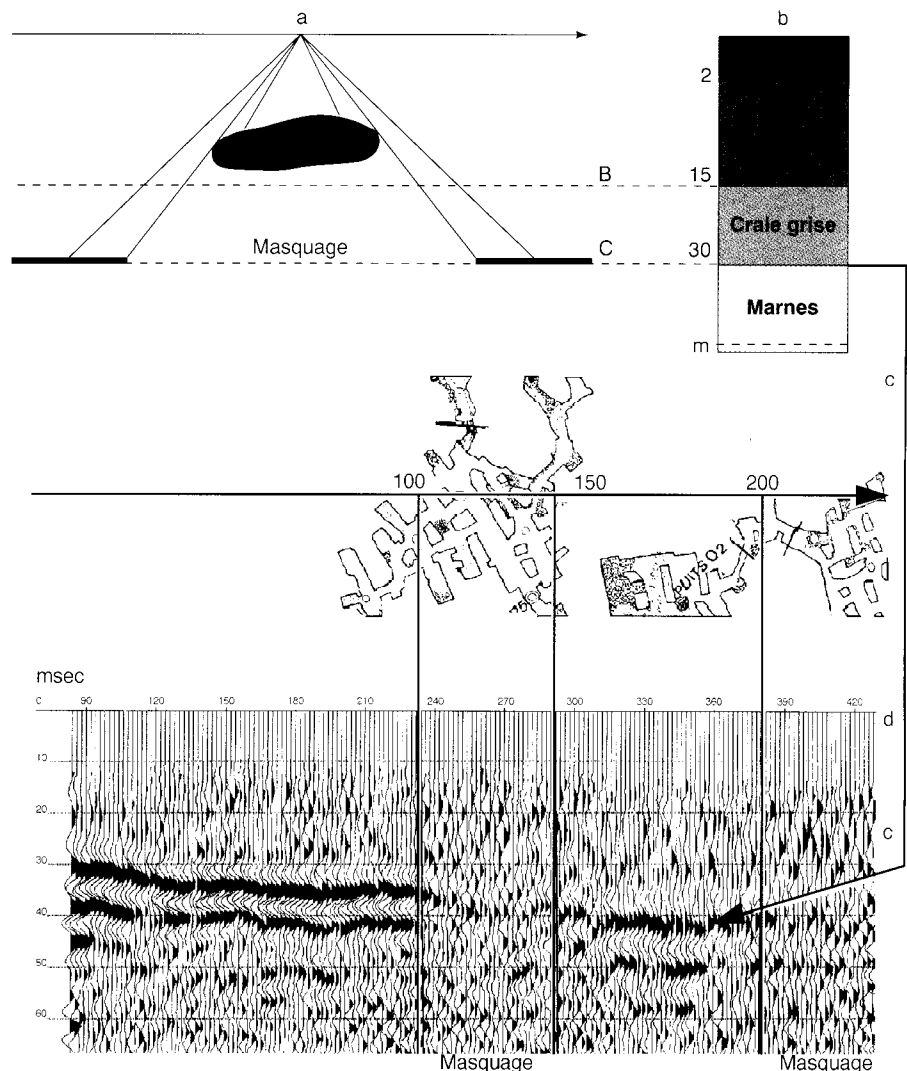
**Fig. 3 -**  
Application à un site comportant des cavités connues (Villeneuve d'Ascq).

**a.** Illustration symbolique de l'effet de masquage.

**b.** Coupe géologique du terrain au voisinage du site.

**c.** Extrait d'une carte de relevé des carrières souterraines du site (dû à l'obligeance du Centre d'Inspection des carrières souterraines de Douai).

**d.** Profil sismique révélant le masquage du réflecteur C induit par les cavités (distance entre points miroirs communs : 0,5 m).



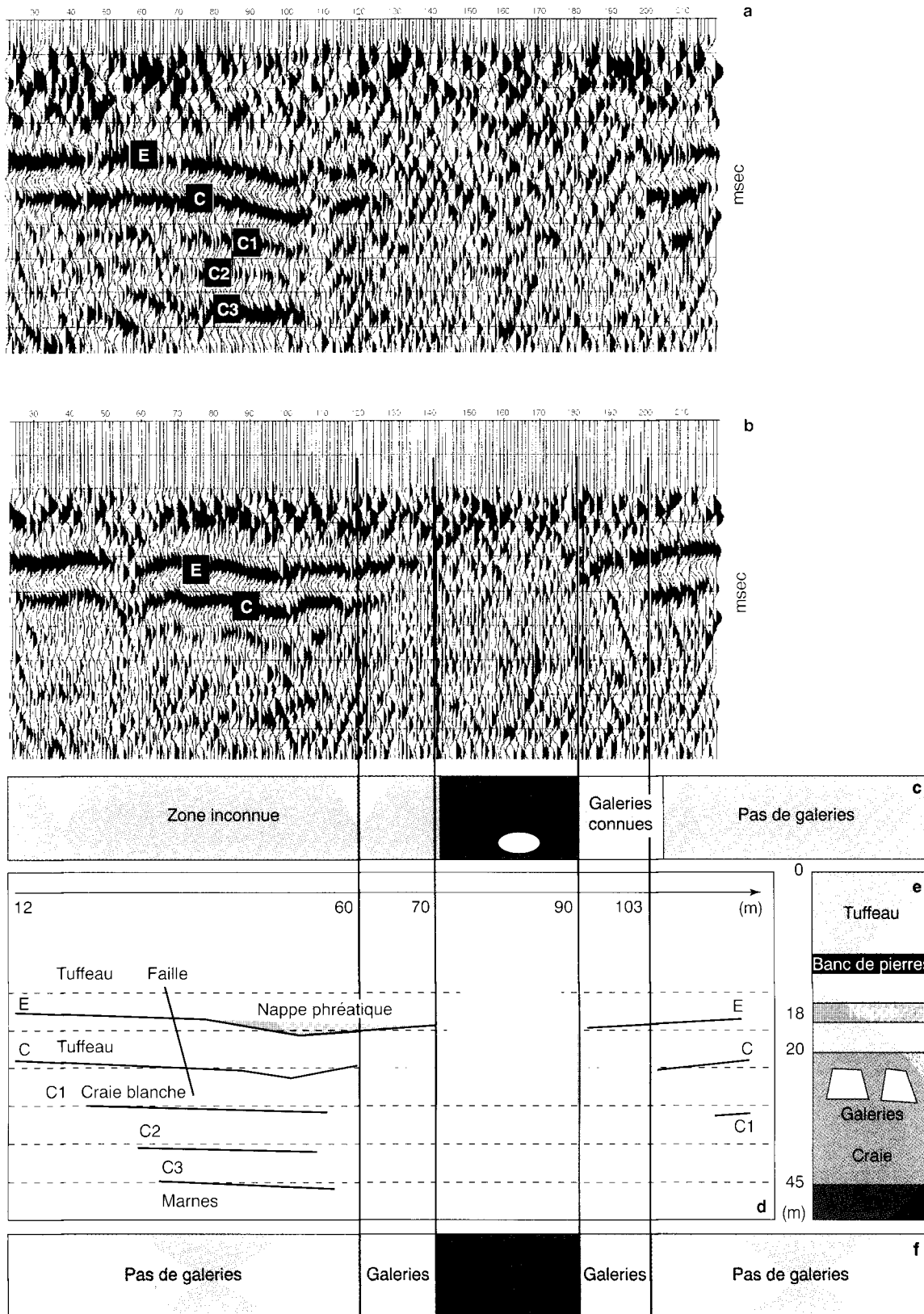
La figure 3 donne les résultats obtenus dans un site comportant des cavités connues. Dans ce cas, la densité des points de sondage a été affinée par rapport au cas précédent : la distance entre géophones a été fixée à  $\Delta x = 1$  m, ce qui donne une distance inter-traces de 0,5 m. En utilisant les notations de la figure 2, on peut constater que les anciennes carrières de craie se trouvent au-dessus des interfaces B et C. La section sismique mettant en évidence l'interface C est présentée sur la figure 3d. Sur cette figure, on peut observer des zones de disparition des signaux provenant des réflexions. Ceci correspond à l'effet de masquage de l'interface craie/marnes induit par des cavités. Une confrontation de ces résultats avec la position des cavités connues (fig. 3c) permet de vérifier le dispositif de mesure utilisé et la méthode d'interprétation adoptée. L'application de cette approche (Piwakowski et al., 1994 ; Piwakowski et al., 1997) a permis de détecter toutes les cavités répertoriées sur des profils de plus de 1 000 m. Ces expériences ont été réalisées sans connaissance préalable des positions des cavités.

### Site d'Anzin

La deuxième campagne de prospection géophysique a été réalisée à Anzin près de Valenciennes (Piwakowski et Moreaux, 1995). À la suite de problèmes d'affaissement, ce site a fait l'objet d'une prospection par forage qui a permis de situer partiellement les galeries existantes. La campagne de prospection sismique avait pour but de situer l'étendue des zones comportant des galeries et d'étudier le risque d'effondrement dans ces zones. Ce risque est défini en fonction de la nature des terrains couvrant les galeries. La figure 4e montre la structure géologique de ce site. Les galeries se trouvent dans la couche de craie à une profondeur de l'ordre de 22 m. Nous présentons ci-après les résultats des mesures (paramètres d'acquisition :  $\Delta x = 1$  m,  $\Delta s_g = 13$  m) effectuées le long de deux profils parallèles notés AS et AP. Sur la figure 4c, nous avons reporté les données mises à notre disposition avant la campagne de mesure.

Fig. 4 - Résultats obtenus le long du profil AS (Anzin près de Valenciennes)

- a. Section sismique du profil avec les différents réflecteurs (distance entre points miroirs communs : 0,5 m).
- b. Section sismique du profil avec les deux premiers réflecteurs (distance entre points miroirs communs : 0,5 m).
- c. Résumé des informations disponibles avant le sondage.
- d. Interprétation des résultats obtenus.
- e. Coupe géologique du terrain.
- f. Résumé de l'interprétation des mesures sismiques.



### Profil AS

Les résultats obtenus le long du profil AS sont présentés sur les figures 4a et 4b. La première figure montre la section sismique avec l'ensemble des réflecteurs détectés (notés E, C, C1, C2 et C3) alors que la seconde montre la section avec les deux premiers réflecteurs seulement (E et C). L'interprétation de cette section présentée sur la figure 4d révèle la présence des deux principales interfaces représentatives de la structure géologique du terrain examiné. La première interface (E), dont la profondeur varie entre 16 et 19 m, peut être identifiée à la nappe phréatique. La seconde interface (notée C), dont la profondeur varie entre 22 et 25 m, peut être identifiée au toit de la couche de craie. Ces interfaces sont marquées d'une manière très forte dans les zones 12-60 m et 105-110 m. Les traces des interfaces plus profondes (C1, C2 et C3) sont également visibles dans ces zones.

En ce qui concerne les anomalies, on constate la disparition totale des interfaces C et C1 dans la zone 60-103 m. Ceci peut être interprété comme la présence des galeries qui masquent l'interface C1 et gênent la réflexion à partir de l'interface C. La disparition de l'interface E indique que le toit des galeries se trouve au-dessus du niveau de la nappe et proche de la couche appelée « banc de pierres », dont la rigidité assure la stabilité des galeries. Cette zone peut être considérée comme une zone à risque d'effondrement. Notons une très bonne correspondance des limites de cette zone avec la zone

d'affaissement observé en surface (fig. 4c). L'interface C réapparaît sur la position 100 m, ce qui correspond à la fin de la zone des galeries connues (position 103 m). Cette coïncidence confirme le principe de notre interprétation. En appliquant le même raisonnement, la présence des galeries peut être exclue dans les zones 13-60 m et 105-110 m (pas de perturbation des réflecteurs). Il est à noter que les anomalies notées au voisinage de la section située à 28 m peuvent être interprétées comme une faille. Une synthèse de l'interprétation est présentée sur la figure 4f.

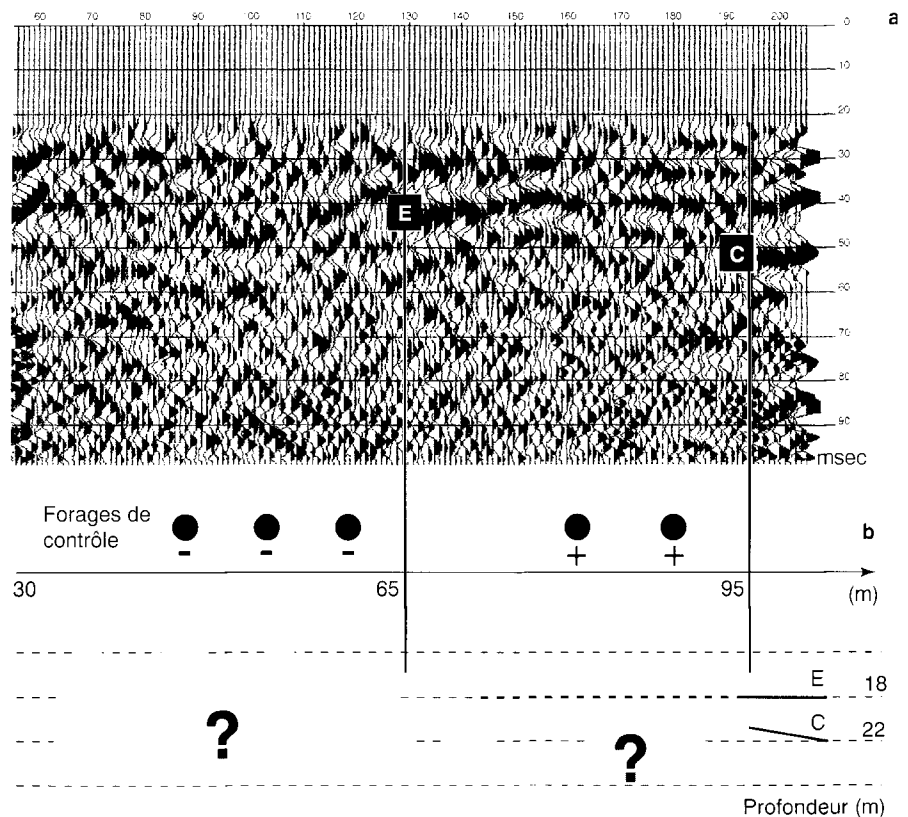
### Profil AP

Le profil AP est situé dans une zone qui a fait l'objet des travaux de construction (remblai, chaussées, canalisation, etc.). Dans ce cas, l'utilisation des méthodes sismiques est très délicate car, d'une part, le terrain déconsolidé ou remblayé constitue un obstacle à la propagation des ondes sismiques, et, d'autre part, les structures enterrées (canalisations, fondations, etc.) peuvent donner lieu à des réflexions susceptibles de masquer les « vrais » signaux.

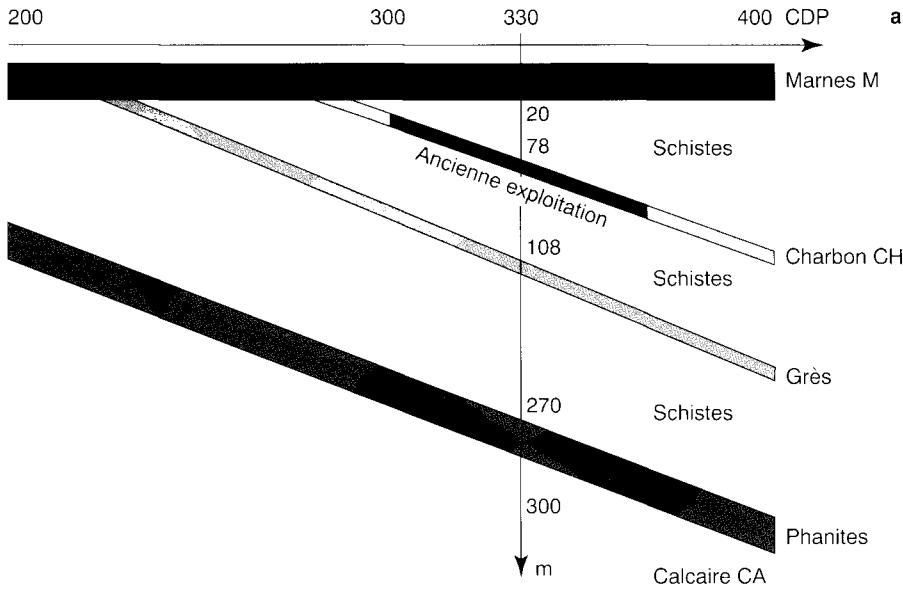
La figure 5a montre la section sismique obtenue le long de ce profil. En appliquant le principe adopté pour l'interprétation du profil AS, on note (i) la disparition de l'interface C dans la zone 30-95 m, qui peut être interprétée comme signe de présence des galeries et (ii) la disparition du réflecteur E dans la zone 30-65 m, qui peut être interprétée comme signe de présence de galeries avec un toit atteignant la nappe phréatique.

**Fig. 5 -**  
Illustration des résultats obtenus le long du profil AP (site d'Anzin).

- a. Section sismique du profil sondé (distance entre points miroirs communs : 0,5 m).
- b. Interprétation des résultats obtenus.





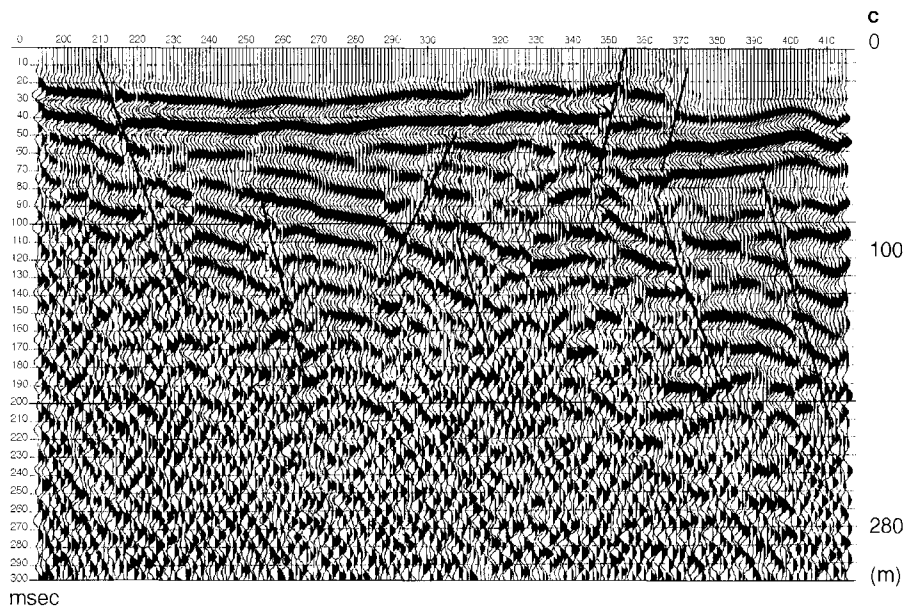
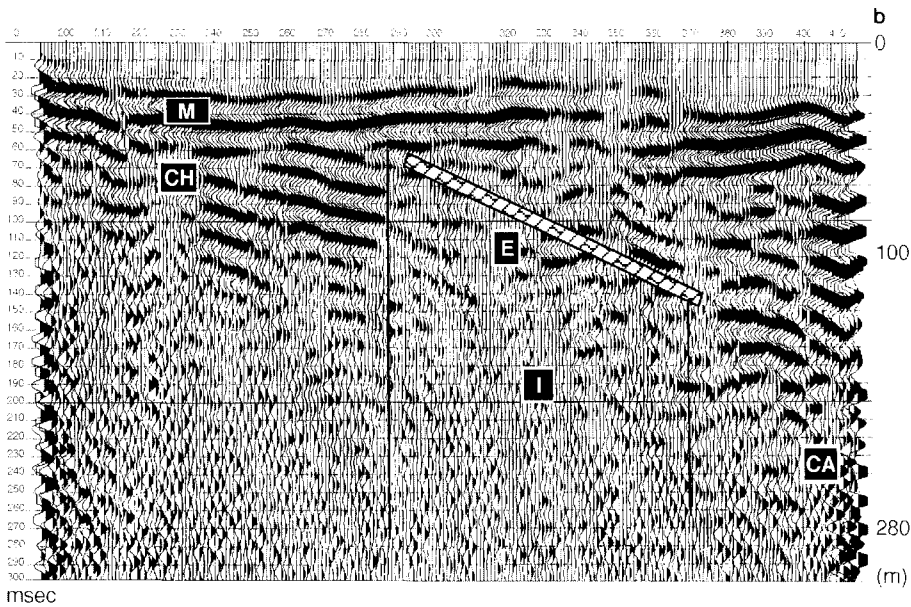


**Fig. 6 -**  
Application à un site minier  
(Condé sur l'Escaut).

*a. Coupe géologique du site d'après Meilliez et al. (1995).*

*b. Section sismique obtenue (distance entre points miroirs communs : 1,5 m) et son interprétation : M-marne, CH-veine de charbon, CA calcaire, E- position de l'exploitation de charbon.*

*c. Section sismique de la section b. corrigée en amplitude afin de visualiser les faibles réflecteurs. Les failles géologiques sont interprétées par les traits continus.*



La figure 5b donne une synthèse de l'interprétation de ce sismogramme. Les forages effectués après les sondages sismiques ont montré la présence des galeries dans la zone 65-75 m mais l'absence de ces galeries dans la zone 30-60 m. Cet exemple montre que la méthode sismique est mal adaptée à la reconnaissance dans les terrains remués, remblayés ou fortement urbanisés.

### **Application à un site minier (Condé-sur-Escaut)**

Ce travail s'inscrit dans le cadre du Programme de recherches concertés (PRC) soutenu par le Conseil régional du Nord. Il a pour objectif la détermination par imagerie sismique de la structure géologique d'un site minier, en particulier le réseau des failles. Le travail concernait une profondeur de l'ordre de 300 m. La structure géologique de ce site a été donnée par Meilliez et Lamand (1995). Elle est montrée sur la figure 6a. On note la présence d'une couche horizontale de marnes, une couche de schistes, une bande de grès et des veines de charbon.

Compte tenu de la profondeur du sondage, les paramètres d'acquisition ont été fixés à ( $\Delta x = 3$  m,  $\Delta s_g = 21$  m) et une source puissante de type « shot-gun » a été utilisée. Dans cette campagne, nous avons utilisé quarante-huit géophones placés symétriquement par rapport à la source, afin d'augmenter la résolution du sondage et le rapport signal/bruit.

Les résultats de la campagne sismique sont présentés sur la figure 6b. La section sismique reflète la structure géologique attendue, en particulier la couche horizontale de marnes. Sur

cette figure, on note bien les perturbations induites par les veines de charbon (les vides et/ou le sol déconsolidé) sur les formes des signaux sismiques. La zone de masquage (zone 1 sur la figure 6b) est facilement repérable sur cette section grâce à l'affaiblissement très marqué des signaux. Les limites de cette zone sont bien corrélées avec les limites de l'exploitation, ce qui confirme la possibilité de localisation des « objets » de ce type par la méthode sismique. Par ailleurs, les sismogrammes obtenus mettent en évidence la présence de nombreuses microfailles, dont l'interprétation est présentée sur la figure 6c.

### **Conclusion**

Les applications présentées dans cet article montrent que la méthode sismique réflexion haute résolution peut être appliquée à la reconnaissance du sous-sol à des profondeurs allant d'une dizaine à une centaine de mètres dans les sols consolidés et peu urbanisés. Cette méthode n'est pas limitée à l'imagerie classique de la structure géologique. Elle donne aussi de bons résultats en ce qui concerne la localisation des cavités souterraines. Dans les sites à forte urbanisation, des problèmes peuvent être rencontrés à cause des obstacles situés au voisinage de la surface du sol (chaussées, constructions, etc.), qui induisent de fortes perturbations dans la propagation des ondes sismiques. Les progrès récents apportés à cette méthode, qui concernent tant le dispositif de mesure que des techniques de traitement et d'interprétation, sont très encourageants pour son extension à des sites plus difficiles.

---

### **Remerciements**

*Nous remercions le Centre d'inspection des carrières souterraines de Douai et tout particulièrement M. Bivert pour l'aide apportée lors de l'application de la méthode sismique à la détection des cavités de craie dans la région du Nord. Le travail présenté dans la section « Application à un site minier (Condé-sur-l'Escaut) a été réalisé dans le cadre du projet « Approche géologique, géomécanique et hydrologique d'une région minière et industrielle » du Programme de recherches concertées (PRC) « Environnement et activités humaines » soutenu par la Région Nord. Ce travail a également bénéficié d'un soutien de la part du réseau de laboratoires GEO et du GdR Sols urbains.*

- ALLEMAND G. (1996), *High resolution seismic profiling applied to a heterogeneous area imaging and to cavity detection in Switzerland*, Thèse de doctorat, Université de Lausanne, Suisse.
- BRANHAM K.L., STEEPLER D.W. (1988), Cavity detection using high resolution seismic reflection methods, *Mining Engineering*, vol. 40, pp. 115-119.
- COOK J.C. (1965), Seismic mapping of underground cavities using reflection amplitude, *Geophysics*, vol. 30, pp. 527-538.
- DOBRI M.B. (1983), *Introduction to Geophysical Prospecting*, Mc Graw Hill, New York.
- EISELT F., SHAHROUR I. (1992), *Application of the finite element method to seismic detection of near underground cavities*, Proceedings of the First European Conference on Numerical Methods in Engineering, Bruxelles, pp. 351-358.
- KNAPP R.W., STEEPLER D.W. (1986), High resolution common-depth-point seismic reflection profiling: field acquisition parameter design, *Geophysics*, vol. 51, pp. 283-294.
- KOURKAFAS P., GOULTY N.R. (1996), Seismic reflection imaging of gypsum mine working at Sherburn-in-Elmet, Yorkshire, England, *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, vol. 1, pp. 53-63.
- LEPLAT L. (1973), Les cavités souterraines de la craie dans le Nord de la France, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 63, pp. 29-55.
- MARI J.-L., ARENS G., GAUDIANI P., CHAPPELLIER D. (1997a), *Méthodes de géophysique de gisement appliquées au génie civil*, Publications de l'Institut français du Pétrole, éditions TECHNIP, Paris
- MARI J.-L., GLANGEAUD F., COPPENS F. (1997b), *Traitement du signal pour géologues et géophysiciens*, Publications de l'Institut français du Pétrole, Éditions TECHNIP, Paris
- MEILLIEZ F., LAMAND D. (1995), *Paramétrage géométrique pour la modélisation géomécanique des cavités minières abandonnées*, 2<sup>e</sup> rencontre du réseau de laboratoires GEO, Aussois, France.
- MILLER R.D., PULLAN S.E., WALDNER J.S., HAENI F.P. (1986), Field comparison of seismic sources, *Geophysics*, 51, pp. 2067-2092.
- MILLER R.D., STEEPLER D.W., MYERS P., SOMANAS D. (1988), *Seismic reflection surveys at the knackstedt salt-water disposal well*, Kansas Geological Survey, Open File Report No. 88-31.
- MOREAUX D., PIWAKOWSKI B., SHAHROUR I. (1996), *Finite-element modelling of the seismic imaging of underground cavities*, Proceedings 2<sup>nd</sup> Congress of Environmental and Engineering Geophysical Society, Nantes, France.
- PERNOD Ph., PIWAKOWSKI B., TRICOT J.-C., DELANNOY B. (1988), *Detection of shallow underground tunnels: physical modelling*, 17<sup>th</sup> Symposium on Acoustical Imaging, Sendai (Japon), Acoustical Imaging, vol. 17, Plenum Press, New York.
- PIWAKOWSKI B. (1989), *Contribution à la théorie de la réponse impulsionnelle de diffraction. Exemple d'application: détection sismique de cavités souterraines*, Habilitation à diriger des recherches, Université de Valenciennes.
- PIWAKOWSKI B., TRICOT J.-C., DELANNOY B. (1994), *Underground tunnels detection and location by high resolution seismic reflection*, Proceedings of 56<sup>th</sup> International Symposium of European Association of Exploration Geophysicists, Vienna.
- PIWAKOWSKI B., MOREAUX D. (1995), *Détection de cavités souterraines par sismique haute résolution: Exemple de terrain*, 2<sup>e</sup> rencontre du réseau de laboratoires GEO, Aussois, France.
- PIWAKOWSKI B., TRICOT J.-C., LEONARD C., OUARRADI N., DELANNOY B. (1997) *Underground tunnel detection and location by high resolution seismic reflection*, Proceedings of 3<sup>rd</sup> Congress of Environmental and Engineering Geophysical Society, Arhus, Denmark.
- STEEPLER D.W., MILLER R.D. (1988) *Tunnel detection by high resolution seismic methods*, Proceeding of Third Technical Symposium on Tunnel Detection, Colorado School of Mines.
- YILMAZ O. (1987), *Seismic Signal Processing*, Society of Exploration Geophysicists.

**ABSTRACT**

**Imaging the shallow subsurface environment by high resolution seismic reflection. Detection of cavities**

**B. PIWAKOWSKI - I. SHAHROUR**

This paper presents applications of the high resolution seismic reflection technique to surveys of the shallow subsurface environment, in particular the detection of shallow cavities. The paper starts by describing the principle on which the technique is based and the test equipment involved and goes on to describe applications at three different sites. The first two sites contained cavities caused by chalk extraction and the third consisted of a mining site with an extremely varied geological structure which contained a large number of microfaults. These examples illustrate the progress which has been made both as regards the measurement system and interpretation techniques. It is now a highly competitive technique for shallow subsurface surveys in sparsely constructed zones.