

La sismique réflexion haute résolution, un outil pour la reconnaissance des couches superficielles

B. PIWAKOWSKI

Groupe acoustique-
électronique
École centrale de Lille
(IEMN DOAE UMR 8520
CNRS) BP48
59651 Villeneuve-d'Ascq
Cedex
Bogdan.Piwakowski@ec-
lille.fr

C. LÉONARD

Laboratoire central
des ponts et chaussées
MSRGI, 58, bd Lefebvre
75732 Paris Cedex 15
leonard@lcpc.fr

I. SHAHROUR

Laboratoire de mécanique
de Lille (URA CNRS 1441)
EUDIL, Cité scientifique
59655 Villeneuve-d'Ascq
Cedex
Isam.Shahrou@eudil.fr

Résumé

Cet article présente une application réussie de l'imagerie sismique réflexion haute résolution (SHR) pour la reconnaissance de couches superficielles. Des progrès récents dans ce domaine ont été accomplis en ce qui concerne les systèmes de mesure, le traitement des signaux et les techniques d'interprétation. Les exemples présentés couvrent différentes applications de génie civil, comme la stratigraphie des couches peu profondes, la détection et la localisation des vides souterrains et la détection de zones effondrées ou remblayées. On montre aussi que la SHR peut être employée avec succès pour l'évaluation du risque d'effondrement des cavités, aussi bien que pour la vérification de la qualité du remplissage d'une cavité effondrée.

Mots-clés : imagerie sismique et acoustique haute résolution, vides, détection, stratigraphie peu profonde, défauts, cavités.

High resolution seismic reflexion, a tool for the shallow subsurface survey

Abstract

The paper presents the successful application of the high resolution seismic reflection imaging (HRS) to survey of the shallow subsurface environment. Recent progress in this domain has been made both as regards to measurement systems, signal processing and interpretation techniques. It is shown that HRS may be considered as a particular CND technique, adapted to detection in ground. The enclosed field examples cover different civil engineering applications, such as stratigraphy of the shallow subsurface, detection and location of underground voids and detection of collapsed and filled-in voids. It is shown that HRS may be successfully used for the evaluation of risk of cavity collapse, as well as for verifying the quality of filling of collapsing cavity with cement mixture.

Key words : high resolution seismic, acoustic imaging, voids, detection, shallow stratigraphy, faults, cavities, non destructive testing.

Introduction

La méthode de sismique réflexion, puissante technique d'exploration géophysique, largement utilisée dans l'industrie pétrolière depuis plus de 60 ans (Dobrin, 1983), est également employée depuis 30 ans pour localiser des cibles situées aux profondeurs relativement faibles (de quelques mètres à quelques centaines de mètres). Les progrès en microélectronique ont permis la construction de sismographes et de micro-ordinateurs performants et peu chers réduisant ainsi le coût d'acquisition et de traitement des données. La sismique réflexion haute résolution (SHR) – adaptée à l'imagerie des couches peu profondes – est devenue rentable grâce à ces progrès et s'est ainsi développée.

Il semble intéressant de souligner que la SHR constitue en effet un dispositif de l'imagerie acoustique dont le fonctionnement s'appuie sur les mêmes principes que celles d'un sonar ou d'un dispositif ultrasonore utilisé pour le contrôle non destructif (CND) et l'imagerie médicale. Le fonctionnement de ces dernières est illustré sur les figures 1a et 1b. Une antenne acoustique émet une onde impulsionnelle, puis enregistre le signal reçu propagé dans le milieu sondé et réfléchi sur les cibles (Fig. 1a). L'ensemble des traces présentées en fonction de la position x de l'antenne donne l'image finale. Cette sonde est caractérisée par une résolution angulaire :

$$\delta = \lambda/D, \quad (1a)$$

où λ est la longueur d'onde acoustique et D la dimension de l'antenne.

De tels systèmes peuvent être considérés comme une « boîte noire » fournissant directement une image, sans qu'un traitement des données complexe soit nécessaire. Cependant, la procédure de restitution de l'image sismique est plus compliquée. L'absorption élevée du sol, qui augmente fortement avec la fréquence, exige l'utilisation de fréquences très basses. Le spectre exploité varie, en pratique, de quelques dizaines de

hertz pour une profondeur d'investigation de plusieurs centaines de mètres, à plusieurs centaines de hertz (imagerie haute résolution et profondeur d'investigation d'une dizaine de mètres). Cela implique l'utilisation de géophones comme récepteurs (capteurs acoustiques de vitesse) (Knapp et Steeples, 1986) et de sources sismiques spécifiques puissantes (explosifs, chute de poids, vibrateurs) (Miller *et al.*, 1986) dont la dimension vis-à-vis de la longueur d'onde est toujours très faible ($\delta/D_s < 1$). En conséquence, la résolution initiale de l'image est très faible et le recours aux méthodes d'antennes synthétiques, pour l'amélioration de la résolution, est nécessaire. Ceci nécessite une géométrie d'acquisition des données spécifique dont la plus souvent utilisée en SHR est la géométrie « tir en bout », illustrée dans la figure 1c. Le champ acoustique est enregistré le long du profil par une rangée de N capteurs espacés de Δx , pour une position initiale de source sismique en $S1$. La source et la rangée de capteurs sont déplacées de Δx et l'acquisition est répétée k fois. La distance entre le géophone le plus proche et la source est connue comme le déport minimal dep_{min} (le terme « offset minimal » est aussi utilisé).

Les enregistrements obtenus sont alors traités en laboratoire. Le résultat du traitement est similaire à celui d'une sonde acoustique ponctuelle d'ouverture D_s , se déplaçant le long du profil, focalisée à une profondeur donnée, à une position connue sous le nom de point CMP appelé « point miroir » (*Common Middle Point*, CMP). La résolution d'une telle sonde est donnée par une formule identique que celle d'un système de CND :

$$\delta = \lambda/D_s, \quad (1b)$$

sauf que l'antenne synthétique (Fig. 1d) est créée virtuellement dans le traitement (le nombre de récepteurs constituant l'antenne synthétique est connu dans le milieu géophysique sous le terme de « couverture multiple »). L'ensemble des traces présentées en fonction de la position du CMP donne l'image finale dans laquelle l'échelle verticale indique le temps de trajet aller-retour surface-point de réflexion (t_0 sur la figure 1).

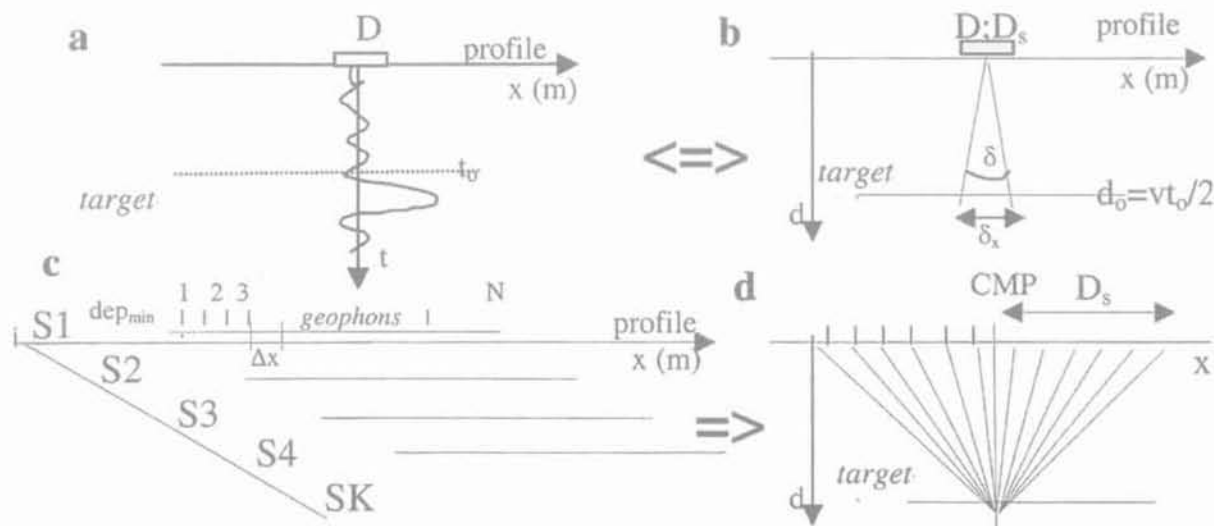


FIG. 1

Fonctionnement d'un dispositif de l'imagerie ultrasonore et de l'imagerie sismique haute résolution : (a) signal d'une trace ; (b) les deux systèmes sont équivalents à une sonde ponctuelle, caractérisée par la résolution angulaire δ ; (c) géométrie d'acquisition en imagerie sismique ; (d) ouverture synthétique de dimension D_s focalisée à la profondeur d .

Operation of an ultrasonic imaging device and high resolution seismic imaging : (a) single trace output signal ; (b) both systems are equivalent to a point probe, characterised by angular resolution δ ; (c) geometry of the acquisition in seismic imaging ; (d) synthetic aperture of dimension D_s focused at depth d .

La profondeur de ce point peut être trouvée à partir de la relation :

$$d_0 = 0,5t_0 v \quad (2)$$

où v indique la vitesse de propagation et t_0 est le temps de propagation aller-retour entre la surface et la cible.

Ainsi, la SHR peut également être considérée comme un sonar ou une sonde ultrasonique de CND, adaptée pour la détection dans les sols. La distance entre les traces (Δ CMP) est fonction de la géométrie d'acquisition et elle est souvent égale à $\Delta x/2$.

La résolution angulaire δ peut être assimilée à une résolution latérale δ_x qui exprime la capacité à distinguer deux objets placés à la profondeur d . La résolution latérale correspond alors à :

$$\delta_x = \lambda d = \lambda d/D_s \quad (3)$$

On admet donc que les deux cibles sont séparées sur l'image, si elles sont espacées de δ_x . Notons que certains auteurs admettent que la résolution latérale est égale au rayon de Fresnel R_f :

$$\delta_x = R_f = (d\lambda/2)^{0,5} \quad (4)$$

Cette hypothèse néglige la directivité de l'antenne synthétique, mais elle donne quand même une approximation de la résolution latérale (vérifiée uniquement dans le cas particulier où l'antenne synthétique comprend uniquement un géophone ($N = 1$)).

Généralement, pour une structure multicouche comprenant les interfaces géologiques aux profondeurs d_1, d_2, \dots, d_i , un signal sismique contient les signaux réfléchis sur toutes les interfaces. Une réflexion provenant de la i -ème couche est alors caractérisée par sa vitesse moyenne de propagation v_{rmsi} (moyenne quadratique). Pour une structure composée de plusieurs couches horizontales, v_{rmsi} est donnée par la formule suivante (Mari *et al.*, 1998) :

$$v_{rmsi}^2 = \left(\sum_i v_i^2 \Delta t_i \right) / \sum_i \Delta t_i \quad (5)$$

Les symboles v_i et Δt_i indiquent respectivement la vitesse de propagation dans la i -ème couche (vitesse intervalle) et le temps de propagation vertical aller-retour à travers la i -ème couche. Par analogie avec le cas monocouche (2), les profondeurs des interfaces peuvent être trouvées à partir de la relation $d_i = 0,5t_i v_{rmsi}$ avec t_i le temps de propagation aller-retour correspondant ($t_i = \sum \Delta t_i$). Les paires ($t_i ; v_{rmsi}$) nécessaires pour la détermination des profondeurs d_i (donc pour la conversion du sismogramme en échelle de profondeur) sont obtenues au cours du traitement et à partir de l'interprétation du sismogramme.

Enfin, la résolution en profondeur δ_p (la résolution radiale) exprime la capacité à distinguer deux couches consécutives (ce qui revient à définir l'épaisseur de la plus petite couche que l'on peut distinguer). Elle est du même ordre de grandeur que le quart de la longueur d'onde λ (Mari, 1998) :

$$\delta_p = \lambda/4 \quad (6)$$

Cette définition est plutôt approximative. En effet, la capacité de détection d'une couche fine dépend aussi du signe des coefficients de réflexion sur les deux interfaces qui déterminent cette couche.

Les formules (2), (3), (4) et (5) indiquent clairement que l'obtention d'une bonne résolution de l'image sismique (c'est-à-dire δ_x et δ_p faibles) nécessite l'exploitation d'ondes les plus courtes possibles, c'est-à-dire l'exploita-

tion de fréquences f élevées ($\lambda = v/f$). Mais l'absorption du milieu augmente avec la fréquence ce qui limite la grandeur de la fréquence exploitable f_e . Selon les principes universels, la maximalisation de cette fréquence nécessite l'utilisation de sources sismiques puissantes et larges bandes, donc capables de générer des impulsions très brèves (Miller *et al.*, 1986). Ces exigences sont parfois contradictoires. Finalement, en SHR, chaque cas de terrain nécessite le choix adéquat du type de source et de sa puissance. Mais, même si ce choix est optimal, la résolution obtenue reste souvent « imposée » par les conditions d'absorption du terrain (à travers la limitation de f_e).

Les exemples présentés ci-après montrent l'utilisation de la SHR dans le génie civil, pour la détection de la stratigraphie des sols, des défauts et des vides.

2

Acquisition et traitement

2.1

Acquisition de données

Les distances entre géophones Δx , les dépôts minimaux et maximaux dep_{min} , dep_{max} et le pas d'avancement de la source Δs sont déterminés en fonction de la géométrie du site, de la profondeur d'investigation et de la résolution désirée. Le choix correct de ces paramètres constitue une tâche relativement complexe qui conditionne la réussite de l'application de la SHR.

Le choix des dépôts minimaux et maximaux dep_{min} et dep_{max} doit assurer la fenêtre d'observation optimale *optimum offset window* (Cook, 1965 ; Léonard, 2000) dans laquelle les réflexions provenant des « cibles » à détecter sont au mieux séparées des signaux constituant le bruit. Dans certains cas, la définition de cette fenêtre exige des mesures préliminaires. Empiriquement, le dépôt minimal peut être estimé au moins égal à la moitié de la profondeur minimale d_{min} du réflecteur visé alors que le géophone le plus éloigné est placé à une distance au moins égale au double de la profondeur maximale d_{max} . Nous avons donc :

$$dep_{min} = d_{min}/2 \text{ et } dep_{max} = 2d_{min} \quad (7)$$

Dans le cas où la campagne viserait plusieurs profondeurs, le choix de ces dépôts et de l'espace entre les positions des tirs Δs représente un compromis. Parfois ce compromis n'est pas possible, et, dans une telle situation, le profil devrait être réalisé plusieurs fois, avec des dépôts différents. Toutefois, grâce au développement de l'informatique, les sismographes possèdent de plus en plus de voies d'acquisition. Ce fenêtrage peut alors être effectué ultérieurement, lors du traitement.

La distance Δx doit théoriquement assurer un échantillonnage spatial adéquat de la fenêtre d'observation. Pour cela, il est nécessaire d'appliquer les règles d'échantillonnage :

$$\Delta x < 1/2 \lambda_{min} = 1/2 V_{min}/f_{max} \quad (8)$$

où λ_{min} est la longueur d'onde apparente minimale, V_{min} est la vitesse apparente minimale susceptible d'être mesurée et f_{max} la fréquence maximale désirée (Mari, 1998). Le deuxième critère de choix de Δx a pour objectif l'atténuation des ondes de surface, très gênantes en sismique réflexion. Pour cela, la distance Δx peut être choisie égale à une demi-longueur d'onde apparente de l'onde de surface. En SHR, ce dernier critère est souvent

en contradiction avec l'équation (8). Si le filtrage bidimensionnel (filtrage FK) est utilisé dans le traitement, l'équation (8) concerne les paramètres du signal susceptible d'être traité.

2.2

Traitement des données – reconstruction de l'image sismique

Le traitement des données (voir par exemple Yilmaz, 1987 ; Mari *et al.*, 1997b) comporte différentes phases. Dans un premier temps, on traite les enregistrements (« tirs ») afin d'améliorer leur qualité, extraire les réflexions provenant des interfaces géologiques et supprimer les signaux non désirés. Les points-clés dans la SHR et le choix judicieux de la fenêtre optimale (qui peut varier d'un réflecteur à l'autre) et d'une bande fréquentielle optimale qui assure le meilleur compromis résolution/rapport signal sur bruit, dans la direction horizontale et verticale. Cette étape, généralement très longue, comprend la réalisation de nombreux tests et nécessite une bonne expérience dans l'interprétation et le traitement des signaux. L'adoption d'une mauvaise stratégie dans cette étape peut mener vers des résultats complètement erronés. L'étape suivante, qui constitue la reconstruction de l'image acoustique, consiste en la création de la « couverture multiple ». Comme cela est illustré sur la figure 1d, cette opération permet de constituer une source et un récepteur synthétique, de dimension D_s , focalisés sur les points CMP. L'image obtenue à l'issue de cette étape correspond à l'image « brute » (*stacked section*). Sa qualité peut être encore améliorée par l'application de traitements supplémentaires dont le choix dépend souvent des objectifs du sondage (détection des cavités, des couches, des remblais).

Pour tous les exemples présentés dans cet article, l'acquisition des données sismiques a été effectuée en utilisant un sismographe 24 ou 48 canaux et des géophones ayant une fréquence de coupure de 100 hertz (filtrage passe-haut des données sismiques). La géométrie « tir en bout » (comme illustrée dans la figure 1c) a été appliquée, faisant varier le déport dep_{min} de 1 à 20 m, selon la position de la fenêtre d'observation optimale (Leonard, 2000), utilisée pour le traitement haute résolution. L'espacement entre géophones Δx a été choisi afin de remplir les conditions d'échantillonnage spatial et, pour les cas présentés, il varie entre 0,5 et 2 m.

Un fusil de chasse « betsy-gun » (conçu dans notre laboratoire), tirant des cartouches de type gros gibier de calibre 12, semblable à celui présenté par Miller *et al.* (1986) a été employé comme source. Il est utilisé pour des profondeurs d'investigation inférieures à 50 m et peut être actionné directement depuis la surface, évitant la réalisation de forages.

3

Exemples pratiques

3.1

Stratigraphie peu profonde

L'objectif de l'étude, présentée dans cette section, est l'imagerie de la lithostratigraphie d'une falaise. Les

mesures ont été entreprises sur la côte de la mer du Nord dans le Nord de la France, le long de deux profils A et B [9]. La photo de la falaise, indiquant les marqueurs géologiques, est montrée sur la figure 2a. Un enregistrement de terrain avant traitement, sur lequel chaque marqueur se manifeste par une réflexion qui forme une ligne hyperbolique, est montré dans la figure 2b. Les images sismiques obtenues et leur interprétation sont montrées dans les figures 2c et d. La figure 2e présente la succession lithostratigraphique de ce site et la comparaison avec les résultats sismiques obtenus.

Le profil A est parallèle à la falaise, situé à une altitude de 7 m au-dessus du banc de phosphate (P2). Le profil B est perpendiculaire à la falaise, localisé à une altitude d'environ 20 m au-dessus de P2. Le tableau I indique les paramètres d'acquisition appliqués pour ce sondage.

D'après la figure 2, les deux sections sismiques, constituées des marqueurs notés A, B-C, D, F-G, H, révèlent la structure géologique attendue (pratiquement toutes les strates sont détectées). De plus, on note que la résolution en profondeur δ_r peut être estimée à 3 m pour cet exemple.

Le profil A est situé entre deux bunkers de la Seconde Guerre mondiale. Étant donné qu'une zone remblayée provoque une absorption élevée des ondes sismiques et perturbe leur corrélation spatiale, les effets induits par les bunkers limitent la profondeur d'investigation de l'imagerie sismique. En effet, des marqueurs F, G, H entre les CMP (180-195) et (290-305) sont perturbés par la présence d'un des deux bunkers.

Il est aussi intéressant de noter que la profondeur d'investigation obtenue pour le profil B est presque deux fois plus grande que celle du profil A, bien que la puissance de la source sismique soit identique. Cette différence est liée au critère (6) et provient du fait que les dépôts appliqués sont différents (Tableau I). En effet, dans la zone centrale du profil B, la fenêtre optimale obtenue favorise l'imagerie des couches plus profondes (marqueur K-L).

3.2

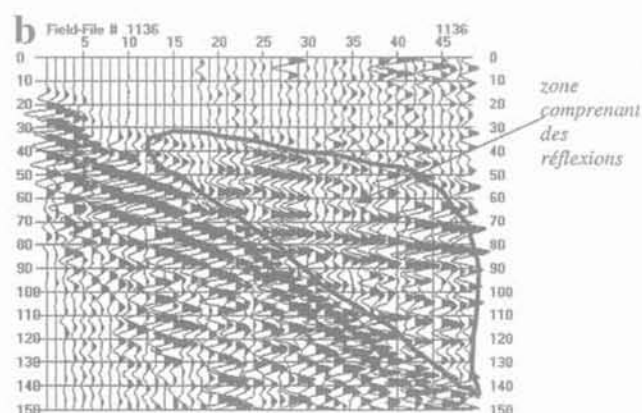
Localisation de carrières de craie abandonnées

Cette section présente l'application réussie la SHR pour la localisation et la détection indirecte de carrières de craie abandonnées, dans le Nord de la France. Ces carrières forment un véritable réseau de tunnels dont les positions ne sont pas toujours connues, ce qui représente un réel danger pour les populations et les activités humaines. Les vides sont localisés dans la craie à une profondeur comprise entre 8 et 15 m, au-dessus de la nappe phréatique (Fig. 3d). Cette détection est effectuée de manière indirecte : la présence d'une cavité induit une perturbation des marqueurs sismiques de la structure géologique (Piwakowski *et al.*, 1997 ; Piwakowski et Shahrour, 1998). La recherche de vides doit alors être précédée d'une reconnaissance de la lithostratigraphie du site, afin de révéler les marqueurs. Le procédé de détection inclut donc deux étapes :

- 1) la réalisation du profil sismique, en respectant les principes de base de cette technique. Cette étape indique deux principaux marqueurs : la nappe phréatique (B) et l'interface entre la craie et la marne (C) ;



FIG. 2. (Voir légende page suivante).



2) l'interprétation et la classification des signes directs et indirects de la présence de cavités.

En fait, les réflecteurs B et C, qui représentent des événements quasi stationnaires et bien corrélés, peuvent être utilisés comme signaux de référence pour l'observation de signes indirects « anormaux ». De nombreuses expériences, entreprises sur des secteurs où la localisation des cavités est connue, nous ont permis de construire une liste de « symptômes de cavités » reprenant tous les signes corrélés avec la présence d'un vide. Ces symptômes sont exhaustivement la perturbation du marqueur B, la baisse d'amplitude du signal du marqueur B pour une section sismique haute fréquence, la baisse de corrélation spatiale de B, les modifications spectrales de B, le masquage du réflecteur C (Fig. 3c), la baisse de corrélation spatiale de C. Dans la plupart des situations, le masquage du réflecteur C est suffisamment important pour être directement interprété comme la présence de cavités (comme cela est illustré dans la figure 3b).

Pour d'autres cas, ces signes sont moins marqués. Ils doivent alors être interprétés ensemble afin d'améliorer la fiabilité de la détection. Pour faciliter le dépouillement des résultats, tous ces symptômes peuvent être exprimés dans une échelle binaire (0-1) et leur somme pondérée correspond alors au risque de présence de cavité (CR). Cette somme peut être tracée directement en fonction du CMP, ce qui rend aisée la présentation des résultats et facilite l'interprétation.

L'application réussie de cette procédure est exposée dans la figure 4 qui présente les critères CR obtenus

pour quatre profils. Ce travail a été réalisé sans une connaissance *a priori* de la position des cavités. Les résultats obtenus ont été vérifiés par forage. La figure montre que les forages confirment 80 % des détections (étant donné que les cavités n'occupent jamais plus de 75 % de la surface de terrain, ces résultats peuvent être considérés comme très favorables). De plus, la précision de l'évaluation de la profondeur des vides est supérieure à 15 %.

3.3

Imagerie de structures effondrées et/ou de zones remblayées

Étant donné qu'un terrain déconsolidé induit une absorption élevée des ondes sismiques et perturbe la corrélation spatiale des signaux, les zones effondrées et les secteurs remblayés génèrent, dans une section sismique, des signaux de faible amplitude et mal corrélés. Lorsqu'ils sont localisés à faibles profondeurs, à cause de cette absorption qui induit une mauvaise qualité des données sismiques, ils empêchent l'imagerie des marqueurs plus profonds (problème mentionné dans la figure 2b). Cependant, comme cela est montré dans cette section, ce dispositif peut également être utile pour la détection de zones effondrées.

La figure 5 présente l'expérience menée (Piwowski *et al.*, 1997). Un affaissement de terrain est observé à la surface. Il est localisé au début du profil (CMP < 250). L'étude vise alors à vérifier si cet affaissement provient d'un tunnel souterrain effondré (localisé à proximité) ou s'il s'agit de la forme naturelle du terrain. L'observation de l'image obtenue indique la présence d'une structure géologique intacte entre les CMP 250 et 273 (présence de marqueurs sismiques dans cette zone). Un affaiblissement du signal pour les CMP inférieurs à 250 confirme l'hypothèse d'un effondrement dans cette partie. On observe également une zone supplémentaire d'affaiblissement des signaux pour les CMP supérieurs à 274. Puisque cette zone n'est associée à aucune structure effondrée connue, elle est interprétée comme étant liée à une construction ayant nécessité un remblaiement.

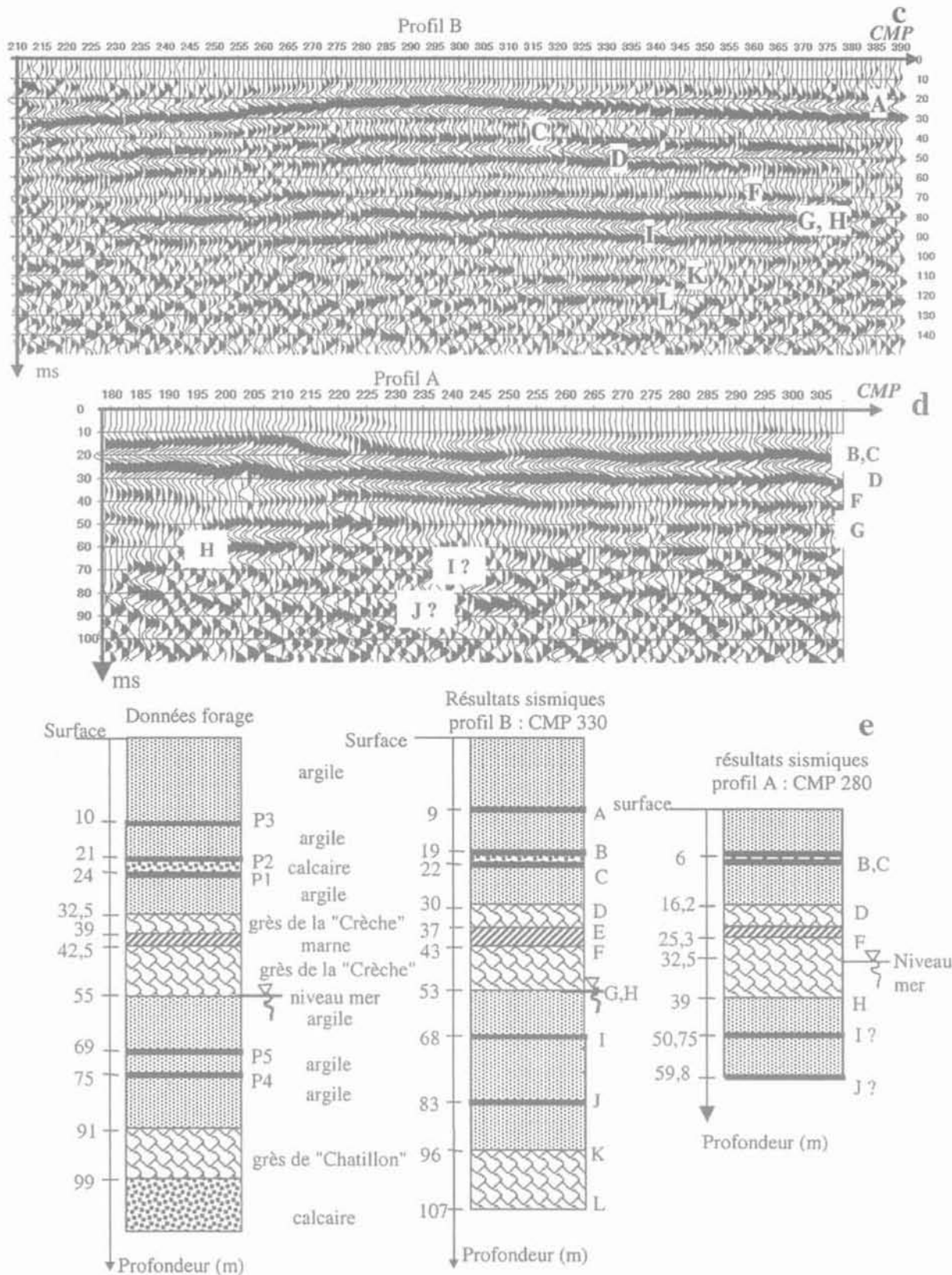


FIG. 2 Lithostratigraphie sismique de la falaise (Δ CMP = 0,5 m) : (a) photo de la falaise montrant les couches géologiques ; (b) exemple d'un enregistrement de terrain filtré passe-bande permettant de visualiser les réflexions ; (c) profil A ; (d) profil B ; (e) log lithologique et interprétation des sections (c) et (d).
 Seismic stratigraphy of the structure of cliff (Δ CMP = 0.5 m) : (a) photograph of cliff showing geological layers ; (b) band-pass filtered field record example showing the set of the reflections ; (c) profile A ; (d) profile B ; (e) well logging data and the interpretation of the results from sections (c) and (d).

TABLEAU 1 Paramètres d'acquisition appliqués aux profils A et B.

	Distance entre les géophones Δx (m)	Longueur du profil (m)	Nombre des tirs N	Déport min/max (m)	Résolution en CMP (m)
Profil A	1	50	60	1/50	0,5
Profil B	1	120	90	11-17/65	0,5

Le deuxième exemple, présenté sur la figure 6a, montre l'image sismique d'une cavité souterraine, une de celles détectées lors des expériences illustrées dans la figure 4. La section, qui indique le marqueur B (Fig. 3d), présente clairement une discontinuité d'une largeur de 40 m, dominée par un bruit cohérent. Bien que les vides soient existants sur toute la zone testée (Fig. 6a), seule une partie du profil présente une telle discontinuité. En fait, comme cela a été expliqué par les habitants, cette discontinuité représente l'image d'un impact de bombe de la Seconde Guerre mondiale, vide remblayé par la suite. Il est à noter que les vides non remblayés, qui entourent l'impact remblayé, n'induisent pas de tels effets (en effet, le masquage ne peut être observé que sur un réflecteur situé au-dessous du vide, ce qui n'est pas le cas du marqueur B, présenté sur la figure 6a).

Le troisième exemple (Fig. 6b) montre une section sismique traversant une ancienne décharge, non exploitée pendant plus de cent ans. Pour cet exemple, la SHR a été employée afin de localiser les limites de la décharge. Selon les interprétations précédentes, ces limites ($x < 100$ m) sont trouvées en recherchant la présence de signaux non corrélés. L'image obtenue montre également que cet endroit a été choisi suite à la présence d'une pente naturelle des terrains.

3.4

Évaluation du risque d'effondrement d'une cavité souterraine

Lorsque le toit d'une cavité souterraine se dégrade (sous l'action de l'eau, d'une surcharge pondérale...), au point de s'effondrer, cela peut provoquer la montée d'un fontis, c'est-à-dire que l'éboulement débouche en surface créant un entonnoir de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres. Une évaluation de la profondeur réelle du vide et son extension latérale permettent alors d'évaluer ce risque.

La figure 7a montre l'image sismique obtenue le long d'un profil traversant des carrières souterraines de craie. Le but de cette étude était de définir les limites latérales des vides et de vérifier les risques d'effondrement. La lithostratigraphie de ce site est montrée dans la figure 7d. Les vides se situent dans la craie, surmontée de tuffeau dans lequel se situe la nappe phréatique.

Le profil (Fig. 7a) révèle une forte discontinuité du marqueur C (interface entre le tuffeau et la craie), dans la zone comprise entre 60 et 103 m. Étant donné qu'il ne peut s'agir d'un masquage (le marqueur C étant

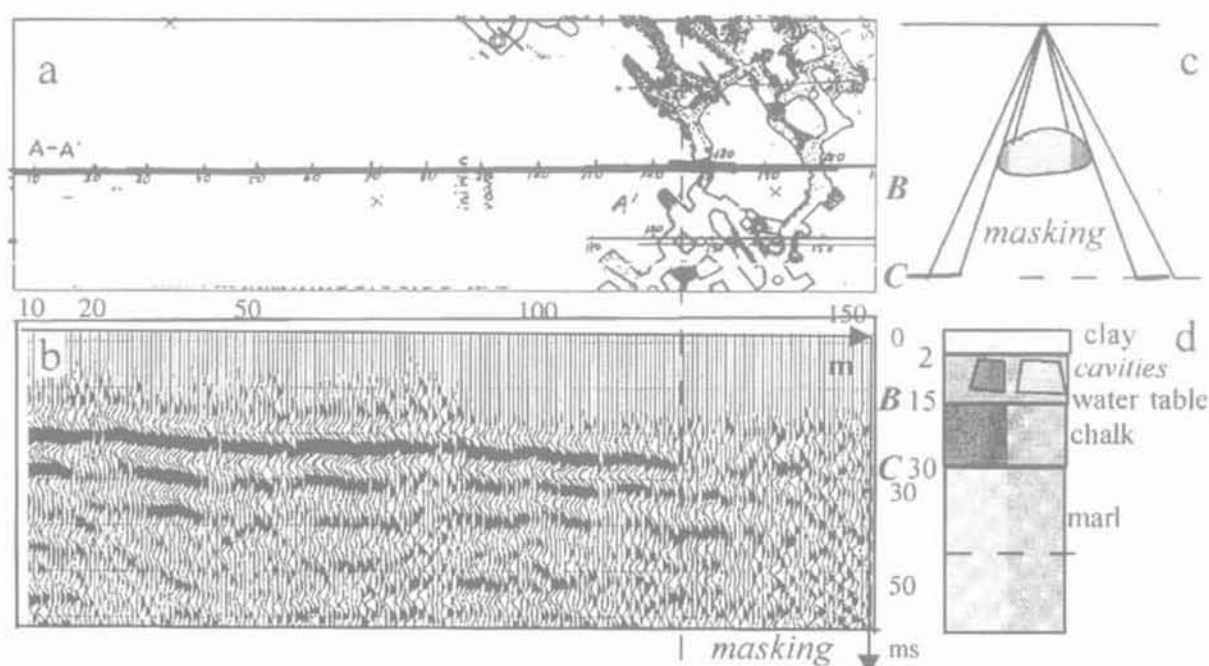


FIG. 3 Détection de vides par effet de « masquage » : (a) carte des vides et localisation du profil sismique ; (b) image sismique de l'interface entre la craie et la marne (marqueur C, $\Delta\text{CMP} = 0,5$ m) : on peut observer que le masquage de ce marqueur est corrélé avec la position des vides ; (c) illustration symbolique de l'effet de « masquage » ; (d) log lithologique du site étudié.

Tunnel detection by means of « masking effect » : (a) tunnel map and location of the prospected profile ; (b) seismic image of chalk/marl interface (marker C, $\Delta\text{CMP} = 0,5$ m) : masking of this marker, well correlated with the tunnel position, is observed ; (c) symbolic illustration of the « masking » effect ; (d) geological well logging data in the region of experiments.



FIG. 4 Test de la fiabilité de la méthode pour un site où la présence des cavités est *a priori* inconnue (même structure lithologique que pour la figure 3). Le critère de risque de présence de cavités (CR) est superposé à la carte des vides répertoriés. Les résultats obtenus par sismique ont été vérifiés par forage. Les flèches indiquent la position des profils sismiques.

Detection of underground voids (geological conditions as in figure 3a). Test for the method reliability performed at the site where the presence of tunnels was *a priori* unknown. The obtained Cavity Risk criterion is superimposed over the map of the known tunnels. The results obtained by seismic was tested by drilling.

situé au-dessus des vides), une seule explication, concernant l'origine physique de la perturbation du marqueur C, est l'interférence destructive des réflexions sur l'interface tuffeau/craie (marqueur C) avec celles sur les vides (le coefficient de réflexion sur le vide étant négatif, le signal réfléchi change de polarité). Ainsi, la zone comprise entre 60 et 103 m peut être interprétée comme un symptôme de présence de cavités. De plus, l'absence du marqueur E (interprété comme étant la nappe phréatique) dans la zone comprise entre 70 et 90 m indique que, dans ce secteur, les cavités perturbent aussi les réflexions sur la nappe. Ceci prouve que le fontis monte et atteint (ou a déjà dépassé) la profondeur de 18 m. Ainsi, la zone comprise entre 70 et 90 m est classée comme un secteur à risque (Piwakowski et Moreaux, 1995).

Le profil indique également une bonne continuité des marqueurs E et C (signaux non perturbés) pour les zones supérieures à 105 m et inférieures à 60 m. L'absence de vide est alors supposée dans ces intervalles (tout ceci est récapitulé dans la figure 7c).

Pour empêcher tout effondrement, les vides ont été remplis avec un mélange de sable, de ciment et d'eau. Afin de vérifier la qualité de cette opération, une campagne sismique a été conduite le long du même profil (Fig. 7b). La comparaison avec les résultats précédents indique la présence d'un nouveau marqueur R. Il est cependant difficile d'interpréter son origine, mais sa présence peut être interprétée comme une confirmation de la propagation des ondes acoustiques dans les cavités, indiquant que leur remplissage est complet.

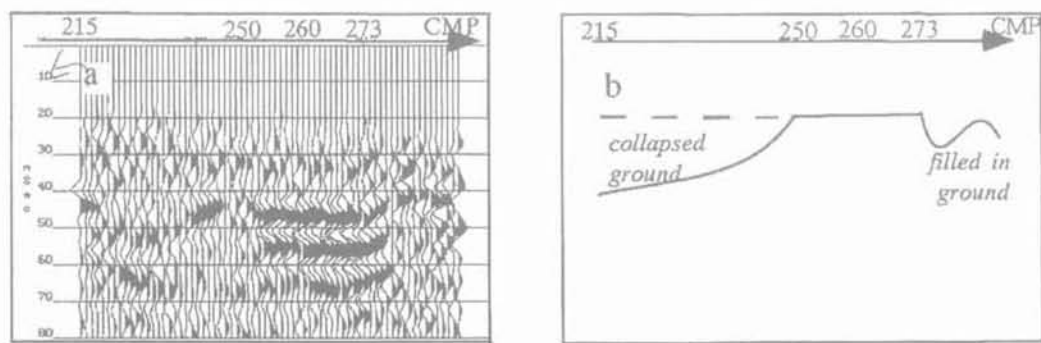


FIG. 5 Exemples de détection de zones d'effondrement et de remblaiement : (a) image sismique obtenue ; (b) position du profil par rapport à la zone effondrée. Examples of detection of the collapsed and filled in ground : (a) seismic image obtained ; (b) position of the profile in relation to the collapsed zone.

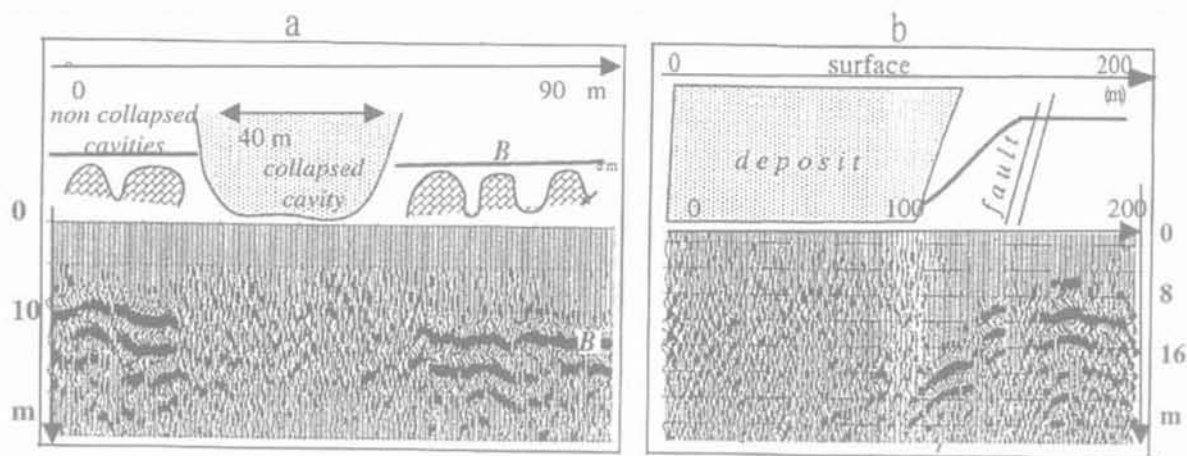


FIG. 6 Exemples de détection de zones d'effondrement et de remblaiement ; (a) section sismique du profil Q2 (Figs. 3a et 4) montrant le marqueur B et son interprétation : la forte discontinuité observée dans la zone $150 < \text{CMP} < 170$ représente une cavité effondrée puis remblayée ; (b) image sismique obtenue le long d'un profil traversant une ancienne décharge et son interprétation.
 Examples of detection of collapsed and filled-in ground ; (a) seismic section of profile Q2 (Figs. 3a and 4) showing marker B and its interpretation: the strong discontinuity observed within zone $150 < \text{CMP} < 170$ represents the collapsed filled-in cavity ; (b) seismic image obtained along the profile crossing the old waste deposit and its interpretation.

3.5

Recherche archéologique

Cet exemple concerne l'utilisation de la SHR dans le domaine archéologique (Leonard, 2000). Les objectifs de cette étude étaient de localiser un tunnel souterrain liant un château du XV^e siècle à une tour du XII^e siècle, construite à 500 m de distance (la présence de ce tunnel n'est pas certifiée). Les résultats de la

recherche sont récapitulés dans la figure 8. On suppose que le tunnel se situe dans la couche de sable, au-dessus de l'interface argile/sable (marqueur A), à moins de 4 m de profondeur. Selon les discussions précédentes, le seul symptôme attendu indiquant la présence du tunnel est le masquage du marqueur A. Ce problème serait plus approprié à une application du GPR, mais à cause du niveau élevé d'humidité de la terre, le radar ne pourrait pas être appliqué sur ce site.

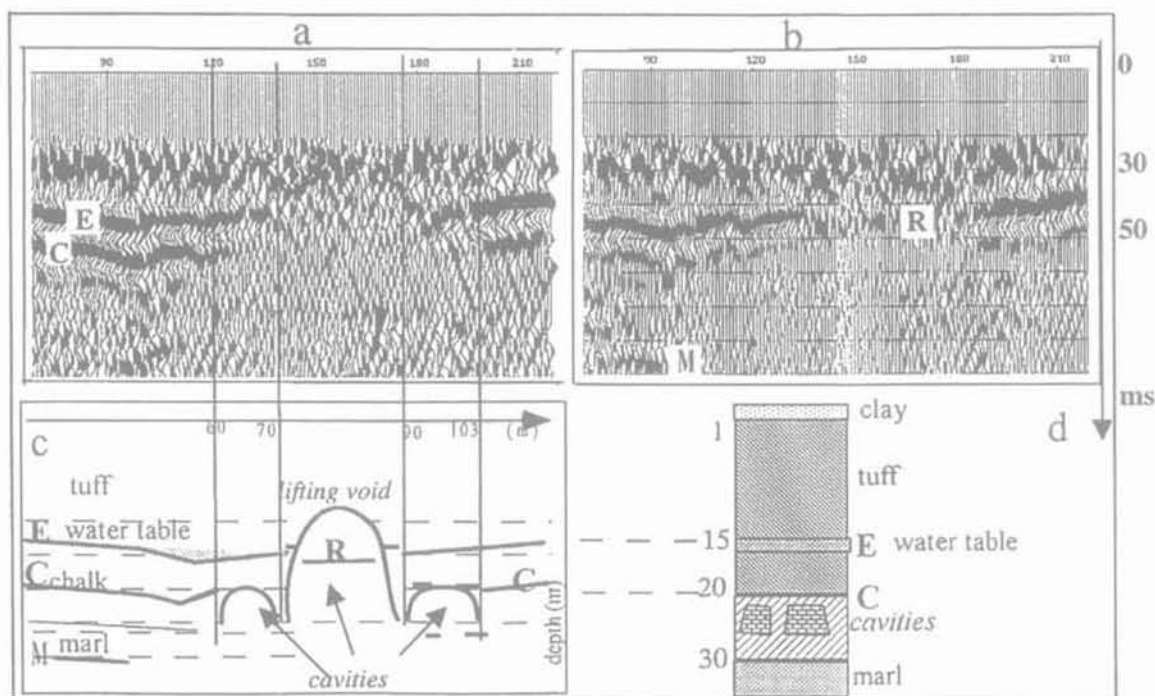


FIG. 7 Évaluation du risque d'effondrement d'une cavité souterraine : (a) image sismique montrant les deux principaux marqueurs E et C, respectivement interprétés comme étant la nappe phréatique et l'interface entre le tuffeau et la craie ($\Delta \text{CMP} = 0,5 \text{ m}$) ; (b) image sismique après remplissage des cavités ; (c) interprétation de la section (a) : l'interruption du marqueur E est interprétée comme une montée de fontis ; (d) log lithologique du site.
 Evaluation of the risk of collapse of underground void : (a) seismic image showing two main markers E and C ; $\Delta \text{CMP} = 0,5 \text{ m}$; (b) same as (a) but after filling-in the cavities ; (c) interpretation of section (a) : the interruption of E is interpreted as a « lifting void » phenomena ; (d) well-logging data.

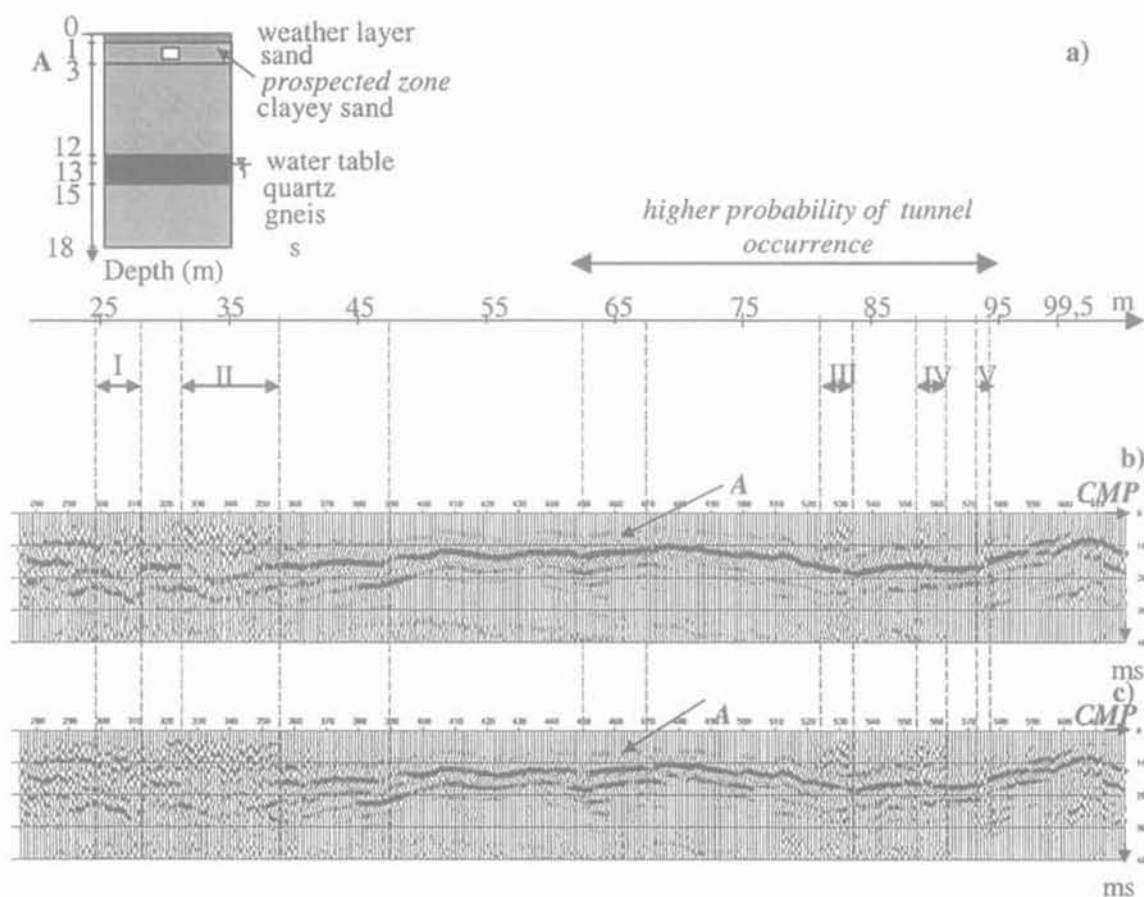


FIG. 8 Exemple de l'utilisation de la SHR dans le domaine archéologique : (a) log lithologique et zone possibles de présence d'un tunnel (d'après les positions du château et de la tour) ; (b) images sismiques du marqueur A suite à deux traitements différents. $\Delta\text{CMP} = 0,25\text{ m}$. Les zones I, II, III, IV et V, interprétées d'après les profils sismiques, indiquent la présence potentielle du tunnel. Example of HRS for archaeological purpose : (a) geological structure and the most suspected are of tunnel occurrence ; (b) seismic images of marker A for two different signal processing. Zones I, II, III, IV and V have been selected as possible positions of the tunnel.

Afin d'augmenter la fiabilité de la détection, plusieurs procédures de traitement sont employées dont les deux versions sont présentées sur la figure. La première met en valeur le marqueur A. Même si le signal est relativement faible, cette version permet de suivre la continuité du marqueur. Le second traitement montre plutôt les anomalies sur le signal. Les détails des différences de traitement sont donnés dans le tableau II.

Les résultats obtenus indiquent que la profondeur de l'interface argile/sable varie entre 3 et 6 m. Cinq zones

de perturbation (notées de I à V), pouvant être interprétées comme des symptômes de présence de tunnel, ont été sélectionnées, d'après les règles définies ci-avant. Cependant, les zones I et II sont plutôt assimilées à une zone remblayée (Figs. 5 et 6) liée à la construction d'une maison (située à plusieurs mètres du profil). Mais il n'est pas exclu que ces effets masquent l'existence d'un tunnel. Les zones III, IV et V coïncident avec la zone dans laquelle l'emplacement du tunnel paraît le plus probable (alignement château-tunnel-tour).

TABLEAU II Détails du traitement appliqué aux profils de la figure 8.

	Filtrage « pré-stack » (Hz)	Filtrage « post-stack » (Hz)	Fenêtre optimale (m)	Couverture multiple	Déconvolution	1 ^{re} égalisation dynamique	2 ^e égalisation dynamique
Fig. 8b	200-500	150-400	6-11	7	non	oui	oui
Fig. 8c	300-600	250-400	6-11	10	oui	oui	non

Conclusion

L'imagerie sismique s'est avérée efficace, en particulier, pour retrouver la lithostratigraphie des couches superficielles, pour la détection et la localisation de vides souterrains et pour la détection de zones effondrées ou remblayées. Elle a été employée avec succès pour l'évaluation du risque d'effondrement de carrières

souterraines ainsi que pour la vérification de qualité du remplissage des cavités.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Service d'inspection des carrières souterraines de Douai pour son aide et son assistance dans les recherches présentées concernant l'utilisation de la SHR pour la détection des cavités souterraines.

Certaines études présentées ont été réalisées grâce à l'équipement financé par la Région Nord-Pas-de-Calais et le Fonds européen FEDER, à travers le Programme de recherches concertées.

Bibliographie

- Dobrin M.B. – *Introduction to Geophysical Prospecting*. McGraw Hill, New York, 1983.
- Cook J.C. – « Seismic mapping of underground cavities using reflection amplitude ». *Geophysics*, 1985, 30, p. 527-538.
- Knapp R.W., Steeples D.W. – « High resolution common-depth-point seismic reflection profiling: field acquisition parameter design ». *Geophysics*, 1986, 51, p. 283-294.
- Leonard C. – *Détection de cavités souterraines par sismique haute résolution et par impact-écho*. Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, n° 2694, janvier 2000.
- Miller R.D., Pullan S.E., Waldne, J.S., Haeni, F.P. – « Field comparison of seismic sources ». *Geophysics*, 1986, 51, p. 2067-2080.
- Mari J.L., Arens G., Gaudiani P., Chapellier D. – *Méthodes de géophysique de gisement appliquées au génie civil*. Publications de l'Institut français du pétrole, éditions Technip, Paris, 1998.
- Mari J.L., Glangeaud, F., Coppens F. – *Traitement du signal pour géologues et géophysiciens*. Publications de l'Institut français du pétrole, éditions Technip, Paris, 1997b.
- Yilmaz O. – *Seismic Signal Processing*. Society of Exploration Geophysicists, 1987.
- Piwakowski B., Tricot J.C., Leonard C., Ouarradi N., Delannoy B. – « Underground tunnels detection and localisation by high resolution seismic reflection ». *Proceedings of 3rd Congress of Environmental & Engineering Geophysical Society*, Arthus, Denmark, 1997.
- Piwakowski B., Watelet J.M., Moreaux D. – « High resolution seismic prospecting of old gypsum mines: evaluation of detection possibilities ». *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 1997, 2 (2), p. 109-120.
- Piwakowski B., Moreaux D. – « Détection de cavités souterraines par sismique haute résolution: exemples de terrain ». *Actes de la 2^e Rencontre du Réseau de laboratoires GEO*, Aussois, France, 1995.
- Piwakowski B., Shahrour I. – « Imagerie du proche sous-sol par sismique haute résolution: application à la détection des cavités ». *Bull. de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, 1998, 214, p. 19-29.
- Ward S.H. – *Geotechnical and Environmental Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, 1990.