

ANOMALIES SISMIQUES AU-DESSUS DE CAVITES

par

Isabelle HALLEUX¹, Paul NAA² & Jean-François THIMUS³

(7 figures)

RESUME. - Grâce à l'utilisation conjointe de source de haute énergie et d'un système d'acquisition de données analogique-digital, on a pu mettre en évidence des phénomènes sismiques associés à la présence de cavités dans le sous-sol. Ces anomalies couvrent différents types de phénomènes sismiques tels diffraction, réflexion et écho, ainsi que des anomalies dans l'organisation des fréquences et amplitudes des signaux. Des traitements appropriés sur base de la décomposition par séries de Fourier ont permis de quantifier et de discerner ces différentes anomalies.

ABSTRACT. - Seismic anomalies above underground cavities.

Seismic phenomena related to underground karstic voids were discovered by a high-energy source associated to an analogical-digital system. The seismic signals include diffraction, reflection, echo, and anomalies in the frequencies and amplitudes of signals. Suitable evaluation using the Fourier series allowed the checking and the quantifying of these anomalies.

I. - INTRODUCTION

Depuis quelques temps, des travaux sont menés afin de localiser et dimensionner des cavités par sismique réflexion. Dans la majeure partie des cas déjà traités, il est fait mention de phénomènes anormaux observables sur les enregistrements sismiques en présence de cavités, à savoir réflexion, diffraction, variation d'amplitude et de fréquence (Frappa, *et al.*, 1977).

L'observation directe des enregistrements montre souvent sur chacune des traces une surimposition des anomalies sismiques recherchées avec des phénomènes de propagation de surface, de réfraction, . . .

La figure 1 montre cette surimposition pour les géophones proches de la source et pour des temps d'enregistrement petits.

La transformation de Fourier par l'application de FFT (Fast Fourier Transforms) permet de séparer certains événements confondus dans le domaine du temps et qui, lorsqu'on passe dans le domaine fréquentiel, se différencient (voir la figure 2 qui correspond dans le domaine fréquentiel à la figure 1).

Dans les publications précédentes (Frappa *et al.*, 1977), les cavités sont décelées par la présence de variations d'amplitude et par des fréquences différentes observées sur des enregistrements sismiques. Dans cette optique, l'étude décrite ci-dessous montre l'analyse du spectre d'énergie de différents tracés sismiques. Dans ces mêmes publications, on a insisté sur la mise en oeuvre de sources ponctuelles énergétiques à signa-

ture pure afin de mettre en évidence les phénomènes de réflexion ou de diffraction proches de la surface. Nos essais ont été effectués sur des objectifs karstiques, miniers ou de génie civil.

Le traitement type par analyse du spectre d'énergie ouvre la porte à des opérations complémentaires de filtrage qui, après transformation dans le domaine inverse (domaine du temps), permettront une interprétation aisée voire quantitative de cavités à faible profondeur.

II. - DISPOSITIF ET MISE EN OEUVRE

SOURCE

- haute énergie;
- consiste en un canon de cimenterie, calibre 8, disposé verticalement et muni d'un support sur pneu à axe excentré (fig. 3);
- le canon tire dans le sol un projectile (100 gr de plomb) avec une vitesse de sortie du canon d'environ 600 m/sec.;

1 Boursier IRSIA, Géologie appliquée, Université de l'Etat à Liège.

2 Géologie appliquée, Université de l'Etat, 45 avenue des Tilleuls, 4000 Liège.

3 Unité Construction, Université Catholique de Louvain, place du Levant, 1, 1348 Louvain-la-Neuve.

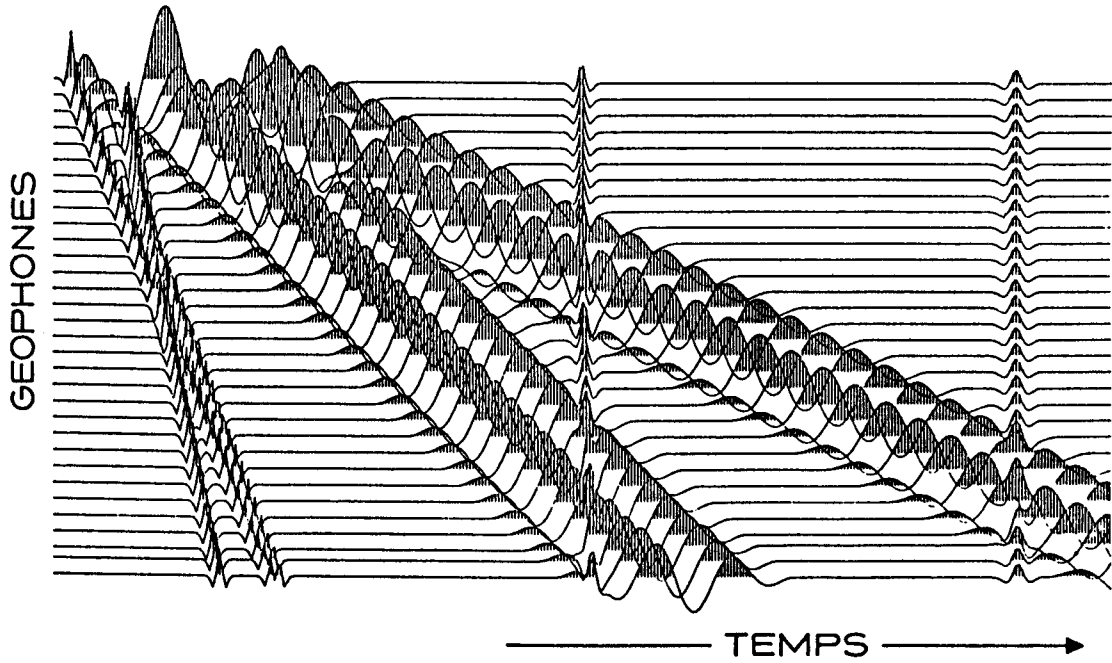


Figure 1

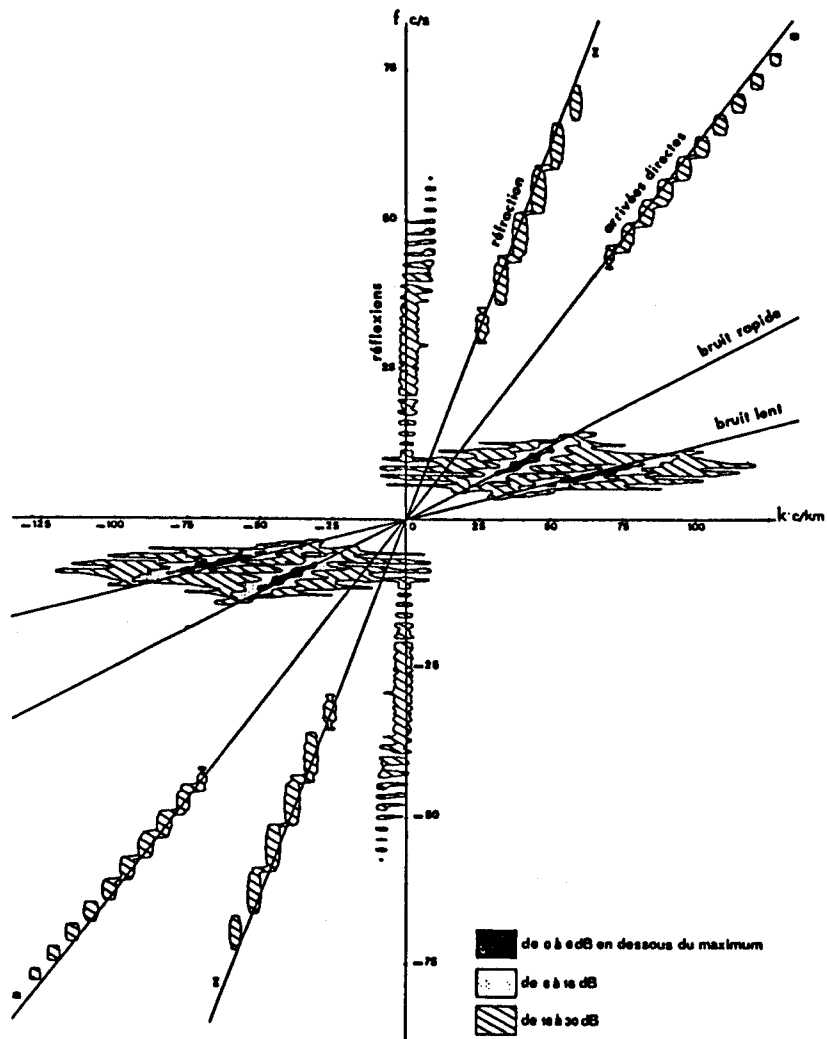


Figure 2

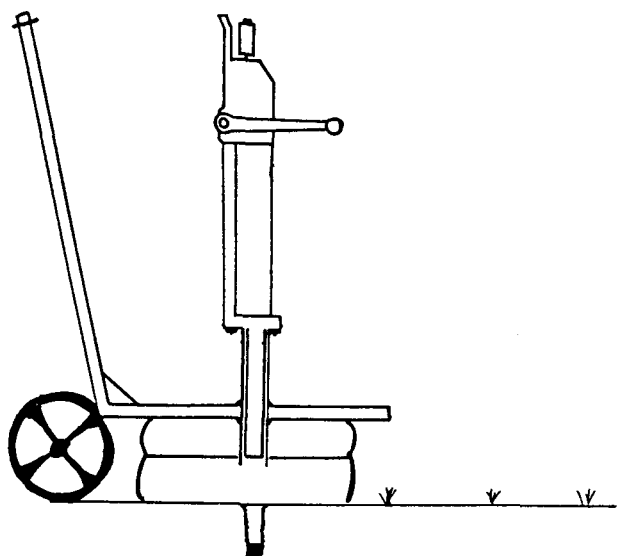


Figure 3

- sur le terrain, l'affût est tiré par un mini-tracteur. La mise à feu s'effectue par le déclenchement électromagnétique du percuteur synchronisé avec le début de l'enregistrement.

GEOPHONES

- fréquence de résonance de 3 Hz;
- géophones multidirectionnels à axe vertical;
- équidistance entre géophones : 2 m;
- disposition en ligne avec tir au milieu ou en extrémité.

PRISE DE MESURE

- Séismographe 12 traces Geometrics ES-1200;
- Enregistreur magnétique Geometrics G-724 S.

III. - TRAITEMENT DE LA REPONSE SISMIQUE

Chaque mesure sismique et, à fortiori, une série de mesures assemblées et convenablement présentées peut être directement interprétable pourvu que la nature des terrains traversés par les ondes s'y prête (contraste de vitesses, technique d'enregistrement adéquate, ...). Cependant, même dans des conditions favorables, le sismogramme n'enregistrera qu'une suite d'ondes sinusoïdales où s'enchevêtrent les réflexions, réfractions et le bruit. Les différentes composantes du signal sont souvent indiscernables visuellement.

Un traitement mathématique approprié du sismogramme permet de distinguer la contribution de la réponse impulsionnelle du sous-sol (suite de coefficients de réflexion et de réfraction) de celle du bruit et du signal générateur du phénomène.

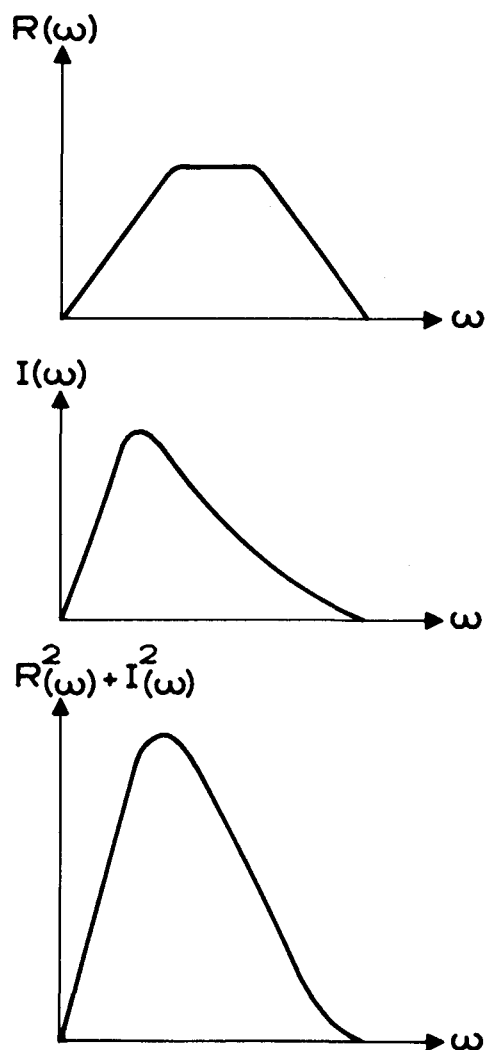


Figure 4

On sait qu'un sismogramme $f(t)$, fonction réelle du temps, résulte de la convolution de la réponse impulsionnelle du sous-sol $r(t)$ par un certain signal $s(t)$

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} r(t) s(t-\tau) d\tau$$

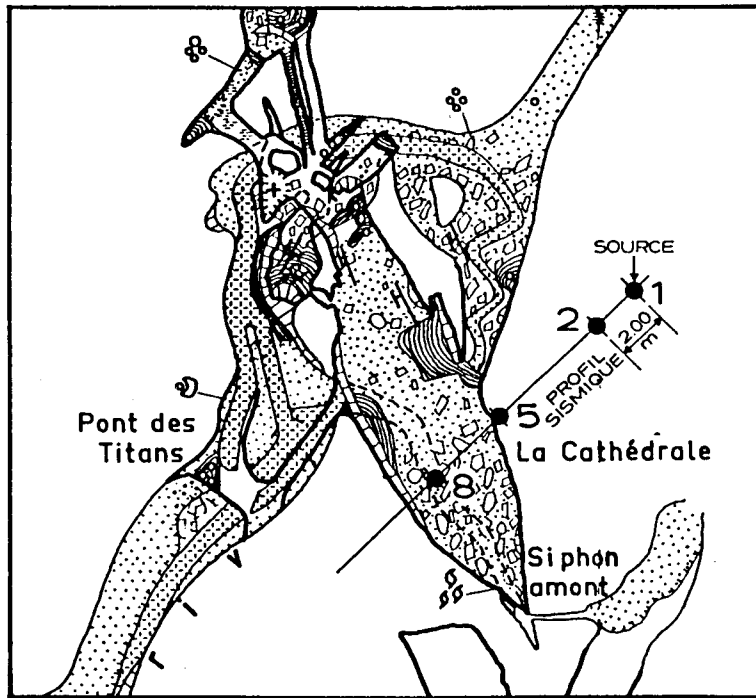
$$= r(t) * s(t)$$

où $r(t)$ dépend de la nature du sous-sol,
 $s(t)$ dépend de la source d'énergie, du couplage des géophones et des conditions d'enregistrement, ...

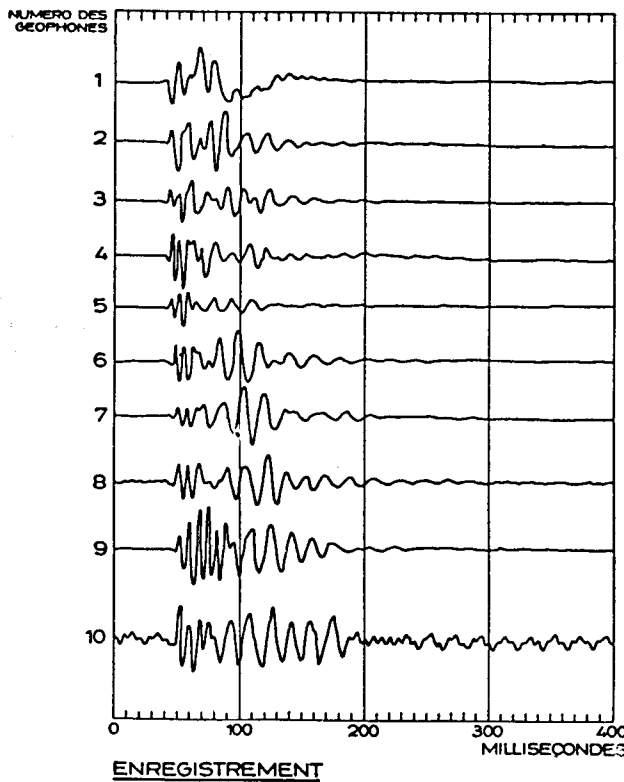
La technique couramment employée pour analyser les sismogrammes consiste à effectuer des transformations convolutives en utilisant la forme simple, multiplicative, que prennent les opérations de convolution dans la transformation par séries de Fourier

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

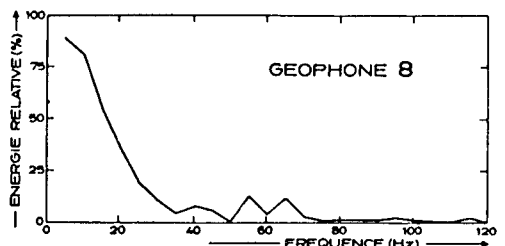
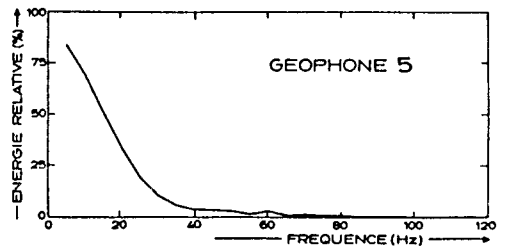
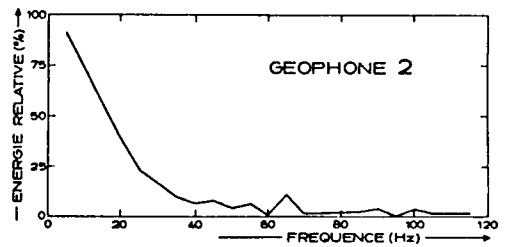
SITE KARSTIQUE : REMOUCHAMPS



SCHEMA



ENREGISTREMENT



SPECTRE D'ENERGIE

Figure 5. - Site karstique : Remouchamps

$$\text{et } f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

La première équation exprime le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel par transformée de Fourier directe, la suite des valeurs complexes $F(\omega) = R(\omega) + iI(\omega)$ représentant les coefficients complexes de Fourier. La seconde équation exprime la transformation de Fourier inverse, passage du domaine fréquentiel au domaine temporel (Halleux, I. & Uyttendaele, M., 1983; Naa, P. & Uyttendaele, M., 1983).

La similitude des deux formules permet l'utilisation du même programme d'ordinateur dont la mise en oeuvre est grandement facilitée par l'existence d'un algorithme de transformation de Fourier rapide : la FFT (Singleton, 1969).

La réalisation pratique de l'analyse du sismogramme comporte les étapes suivantes :

1. digitalisation du sismogramme : échantillonnage de la trace suivant un pas régulier, correctement choisi afin d'éviter le phénomène d'aliasing (Aki, K. & Richards, P.G., 1980).
2. transformation par séries de Fourier des données discrètes : le phénomène est connu seulement dans un champ limité et à travers l'échantillonnage discret. L'intervalle est donc borné, la période la plus grande T est la longueur de l'intervalle et les intégrales de Fourier sont remplacées par des sommes de valeurs discrètes

$$F(\omega) = \sum_{t=0}^{T-1} f(t) e^{-i \frac{2\pi}{T} t\omega}$$

$$= R(\omega) + iI(\omega).$$

Le spectre d'énergie de Fourier, $E^2(\omega) = R^2(\omega) + I^2(\omega)$, analysé en conjonction avec les diagrammes $(\omega, R(\omega))$ et $(\omega, I(\omega))$ est l'élément indispensable à l'interprétation des sismogrammes (analyse spectrale).

3. filtrage : l'application de filtres fréquentiels permettra de discerner la contribution des différentes composantes du sismogramme : un filtre passe-bas éliminera le bruit généralement localisé dans les hautes fréquences; un filtre passe-haut ou passe-bande distinguera les phénomènes de réfraction des phénomènes de réflexion.
4. transformation de Fourier inverse : le retour au domaine temporel mettra en évidence les phénomènes de réfraction ou de réflexion (suivant que la mise en évidence de l'un ou l'autre est recherchée) nettoyés du bruit. Des corrélations entre sismogrammes ainsi "blanchis" pourront être réalisées et conduiront à la caractérisation du sous-sol.

IV. - ESSAIS REALISES

1. SITE KARSTIQUE : REMOUCHAMPS (fig. 5)

- Situation du profil sismique réalisé
 - La vue en plan de la grotte de Remouchamps à la figure 5 donne la situation du profil sismique,
 - la source est à hauteur du géophone 1,
 - le géophone 8 est à la verticale de la grotte,
 - le géophone 5 est sur l'éponte.
- Sur le film de l'enregistrement, on a retenu les traces 2, 5 et 8 pour les décomposer et calculer leur spectre d'énergie. Sur chacune des traces, aucun phénomène particulier n'est directement observable.
- L'analyse des spectres montre pour le géophone 5 la diminution type de l'énergie déjà mentionnée au paragraphe précédent. Le géophone 8, situé à l'aplomb de la cavité, montre une anomalie nette autour des fréquences de 60 Hz. Ce même type d'anomalie se retrouve au géophone 2, mais a une importance relative plus petite malgré que ce géophone soit situé plus près de la source. Serait-ce la présence d'un phénomène non encore découvert ?

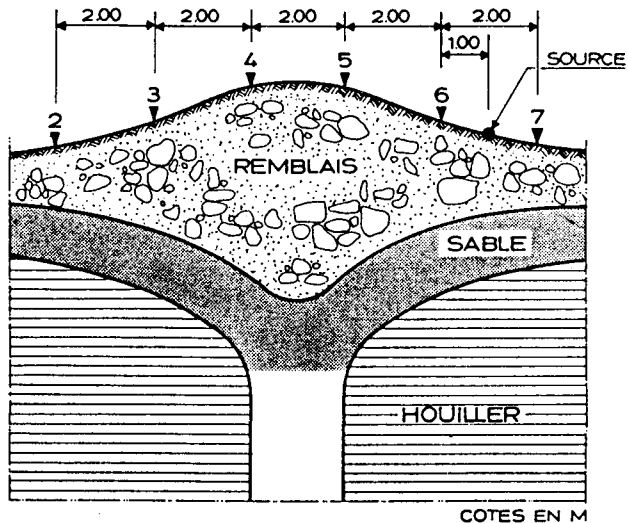
2. SITE MINIER : ROTON (fig. 6)

- Situation du profil sismique réalisé
 - Ce profil est réalisé dans une zone où se trouvent d'anciens puits de mine partiellement comblés (voir schéma),
 - Le dispositif utilisé est un dispositif en ligne avec tir entre les géophones 6 et 7.
- Sur le film d'enregistrement, seules les traces 1, 5 et 8 ont donné lieu à une décomposition et à une analyse de spectre d'énergie. A première vue, l'observation de ces différentes traces laisse supposer aux géophones 1 et 5 la présence d'une anomalie provoquée par un phénomène de cavité.
- L'analyse du spectre montre bien pour le géophone 5 la présence d'une large anomalie autour de 50 Hz tandis qu'aucune anomalie importante n'est décelée sur le spectre du géophone 1.

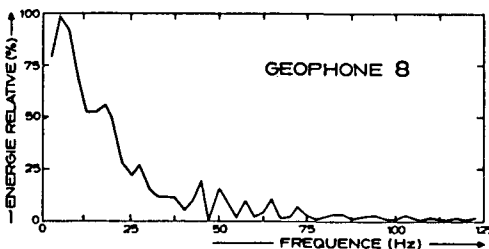
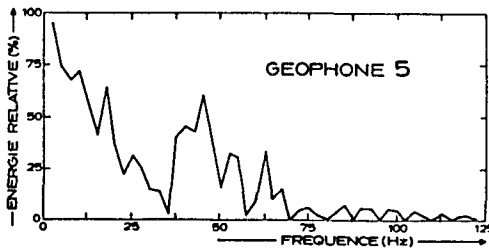
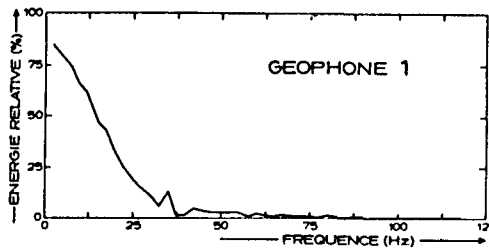
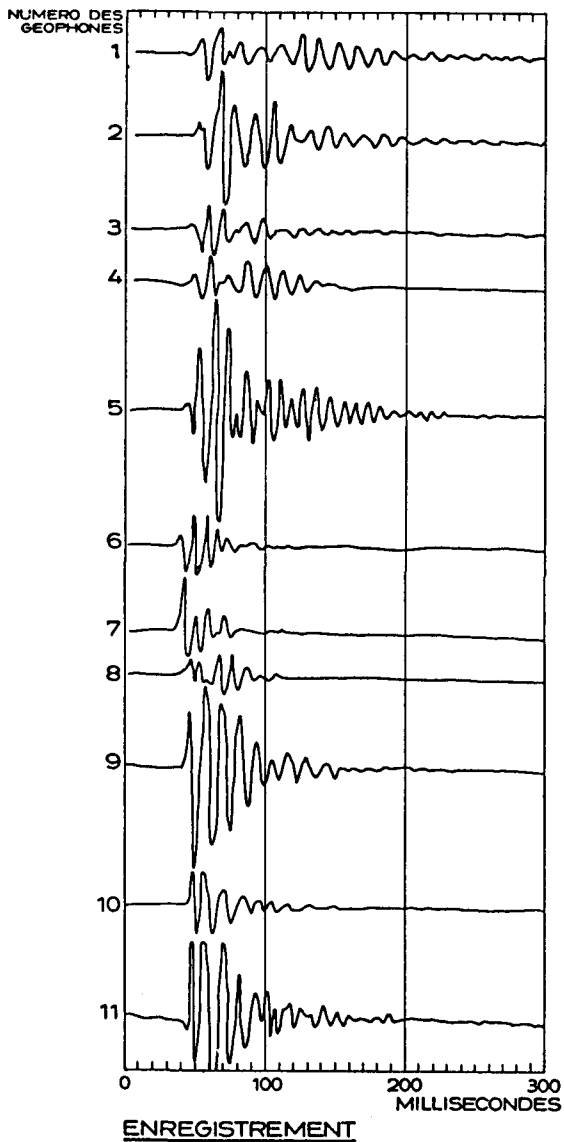
3. SITE DE GENIE CIVIL : LUXEMBOURG (fig. 7)

- Situation du profil sismique réalisé
 - Ce profil est réalisé à côté d'anciennes fortifications avec passages souterrains dans les éboulis en bordure de la vallée. Sur le schéma, la localisation des souterrains est indicatrice du type de cavité susceptible d'être rencontrée.
 - La mise en oeuvre présente de grosses difficultés du fait de la pente du terrain. De ce fait les tirs sont effectués sur un axe déporté parallèle à celui

SITE MINIER : ROTON



SCHEMA



SPECTRE D'ENERGIE

Figure 6. - Site minier : Roton

SITE DE GENIE CIVIL : LUXEMBOURG

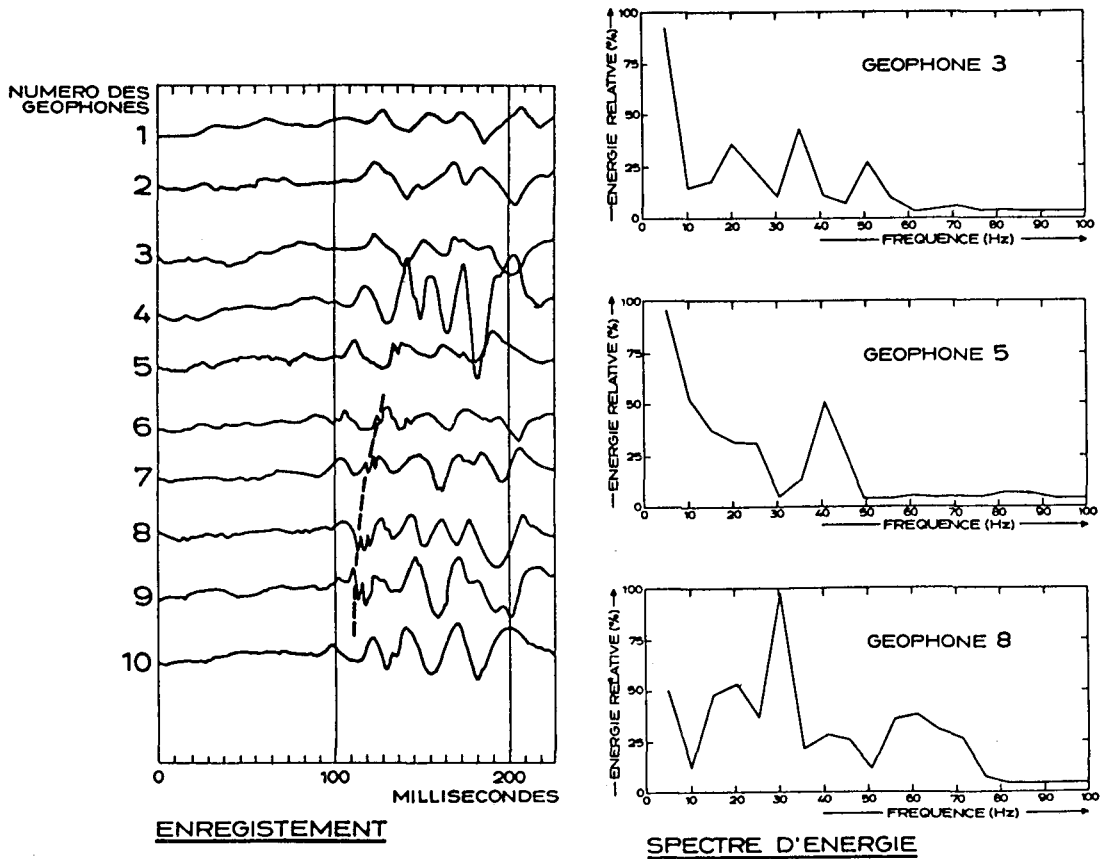
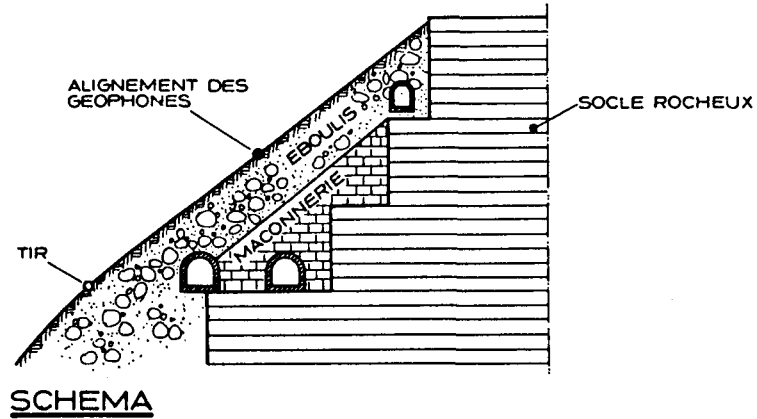


Figure 7. - Site de génie civil : Luxembourg

de l'alignement des géophones (suivant les courbes de niveau du terrain). L'écartement entre géophones est de 2 m.

- L'observation du film d'enregistrement montre :
 - a) un bruit très important dû à l'activité humaine proche (travaux et circulation); en outre la propagation de l'onde sismique s'effectue au travers d'éboulis.
 - b) un alignement remarquable d'un phénomène de diffraction présent sur les géophones 6, 7, 8 et 9 (trait en pointillé à la figure 7).
- L'analyse du spectre d'énergie a porté sur les géophones 3, 5 et 8. Dans ce cas, le bruitage intense des enregistrements sismiques se traduit par une allure incohérente des spectres d'énergie où on reconnaît à peine la décroissance à laquelle on peut s'attendre. Néanmoins, pour des fréquences avoisinant 60 Hz, le spectre du géophone 8 présente une anomalie de grande amplitude. Après filtrage rejetant les informations relatives aux fréquences inférieures à 45 Hz, cette anomalie a été assimilée à l'observation d'arrivées diffractées sur le film initial.

V. - CONCLUSION

Les conclusions nous paraissent être au nombre de trois :

- a) l'utilisation conjointe d'une source de haute énergie et d'une chaîne d'acquisition digitale à haute performance peut seule permettre la réalisation de tels essais.
- b) La mise en oeuvre de FFT ouvre de nouveaux horizons pour la localisation de cavités souterraines.
- c) Des développements complémentaires et l'utilisation du filtrage devraient permettre d'affiner cette méthode.

BIBLIOGRAPHIE

- AKI, K. & RICHARDS, P.G., 1980. Quantitative Seismology. Theory and methods. Freeman and Co, San Francisco.
- FRAPPA, HORN, MURAOU & PARAGALLO, 1977. Contribution à la détection par sismique réflexion des cavités souterraines de faible profondeur. Bull. Liaison Labo. P. et Ch. 92, nov.-déc. 1977.
- HALLEUX, I. & UYTENDAELE, M., 1983. Traitement informatisé de données géologiques : exemple d'une prospection pédogéochimique dans la Fenêtre de Theux. Ann. Soc. géol. Belg., 106 : 285-297.
- NAA, P. & UYTENDAELE, M., 1983. Le traitement des données en géologie minière et son application dans le domaine spectrale. Ann. des Mines de Belgique, 3-4 : 129-133.
- SINGLETON, 1969. An algorithm for computing the mixed radix Fast Fourier Transform. IEEE Transactions, Juin 1969.