

METHODES DE PROSPECTION APPLIQUEES AUX PHENOMENES KARSTIQUES

par

A. MONJOIE¹

(7 figures)

RESUME.- Les méthodes géophysiques se révèlent un outil particulièrement intéressant dans l'étude du karst. Indépendamment des procédés classiques de gravimétrie, résistivité, sismique, de nouvelles techniques ont vu le jour soit en augmentant la précision des mesures, soit en utilisant d'autres paramètres physiques des roches. On peut citer la microgravimétrie, la micro-résistivité, l'électromagnétique et les diagraphies en sondages qui permettent une investigation précise en profondeur.

ABSTRACT.- Geophysical methods are becoming very helpful in the study of karst. In addition to the classical methods of gravimetry, resistivity and seismometry, there are new techniques which increase the precision of results by using other physical parameters of rocks. Micro-resistivity, micro-gravimetry, electromagnetic and diagraphic sounding means permit detailed investigations of conditions at depth below the surface.

La prospection des phénomènes karstiques met en jeu l'ensemble des sciences géologiques.

La **sédimentologie** et la **lithostratigraphie** conditionnent la présence et l'extension des roches solubles. Aux formations carbonatées proprement dites, il convient d'ajouter les roches détritiques à ciment soluble ou entraînable, les roches hypersolubles salines (gypse, sel gemme, . . .), les roches hyposolubles (marnes, roches cristallines et métamorphiques) et les formations gelées ou masses de glace de certaines régions froides (thermo-karst).

La **tectonique** fixe la disposition des différentes couches et conditionne les orientations, degrés et types de fissures qui permettent aux solutions agressives de pénétrer dans la roche et aux produits d'altération, solubles ou non, d'être évacués.

L'**hydrogéologie**, la **paléohydrogéologie** et l'**hydrochimie** étudient les paramètres dynamiques du phénomène. La **géomorphologie** et la **photogéologie** y compris les infrarouges et la télédétection examinent les effets en surface des phénomènes karstiques tandis que la **paléogéographie**, avec l'aide de la **paléontologie**, tente de reconstituer les conditions d'environnement qui ont généré des paléokarsts aux différentes époques.

Toute prospection du karst doit donc mettre en oeuvre les diverses techniques relevant de ces sciences mais elles sont généralement insuffisantes pour définir la localisation exacte et l'ampleur des phénomènes.

Si la **spéléologie** apporte une aide efficace, son domaine d'investigation est limité aux zones accessibles. Dans la plupart des cas, il faut faire appel aux méthodes de **prospection géophysique**.

Elles ont l'avantage d'être rapides, généralement peu coûteuses, couvrant de grandes surfaces et détectant des vides de dimensions réduites, souvent négligés lors des études scientifiques sur le karst, mais présentant un grand intérêt au point de vue hydrogéologique et des conséquences parfois graves en géologie de l'ingénieur.

A l'occasion de ce colloque, nous exposerons brièvement les principales méthodes utilisées dans la recherche des cavités et phénomènes karstiques et leurs développements récents en nous limitant à leur application, sans aborder les théories.

La plus classique est la **gravimétrie**. Elle est en principe la mieux adaptée car suivant la loi de Newton, l'anomalie gravimétrique est directement proportionnelle au déficit de masse du vide recherché. La méthode a nettement progressé avec la mise sur le marché d'appareils donnant le microgal et par l'établissement de programmes de calcul permettant d'étudier les différentes causes possibles d'anomalies. La limite théorique de la méthode (en général un recouvrement de la cavité

¹ Laboratoires de Géologie générale et appliquée. Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège.

inférieure à 1 fois et demi sa hauteur) est très généralement dépassée dans les phénomènes karstiques en raison des processus de dissolution et de fissuration existant autour de la cavité et suite à la déconsolidation des terrains sus-jacents. On constate ainsi que l'amplitude mesurée dépasse généralement le double de la valeur théorique. Malheureusement, la méthode est chère car si l'on veut des mesures atteignant le microgal, les corrections instrumentales et d'environnement sont nombreuses et l'écartement des points de mesure doit être réduit. La précision de la méthode exige de plus une définition correcte de l'anomalie régionale et une homogénéité assez bonne des terrains de couverture.

Dans les massifs de craies de Hesbaye, du Pays de Herve et de la région de Mons, moyennant une maille de mesure de l'ordre de 5 m, nous avons pu détecter, sous une dizaine de mètres de limon quaternaire et de conglomérat à silex, des vides de dissolution ou d'anciennes exploitations de phosphate de quelques mètres cubes auxquels correspondaient des anomalies de l'ordre de 10.1/100e de milligal, des zones de craies fortement dissoutes mais dont le squelette subsiste en partie et

offre une résistance à la pénétration (R_p) de 1 à 10 kg/cm² (anomalie comprise entre 5 et 10.1/100e de milligal), des craies moyennement altérées de résistance à la pénétration (R_p) comprise entre 20 et 50 kg/cm² (anomalie comprise entre 3 et 5.1/100e de milligal) et des craies saines de résistance à la pénétration (R_p) supérieure à 50 kg/cm² (MONJOIE, 1974).

Un tel stade de précision n'est généralement rentable que dans les problèmes de géologie de l'ingénieur posés par les fondations d'immeubles importants, l'étanchéité de barrages, etc. . .

La figure 1 donne la carte d'anomalie résiduelle mesurée au site de l'aérogare de Bierset au nord-ouest de Liège.

La prospection sismique classique basée sur la mesure de la propagation des ondes de choc dans le sol donne des résultats dans le cas où des phénomènes karstiques ont entraîné, par détente ou par dissolution, une fissuration importante dans les terrains. Elle permet souvent de dégrossir les problèmes de localisation des zones susceptibles d'être karstifiées ou des zones

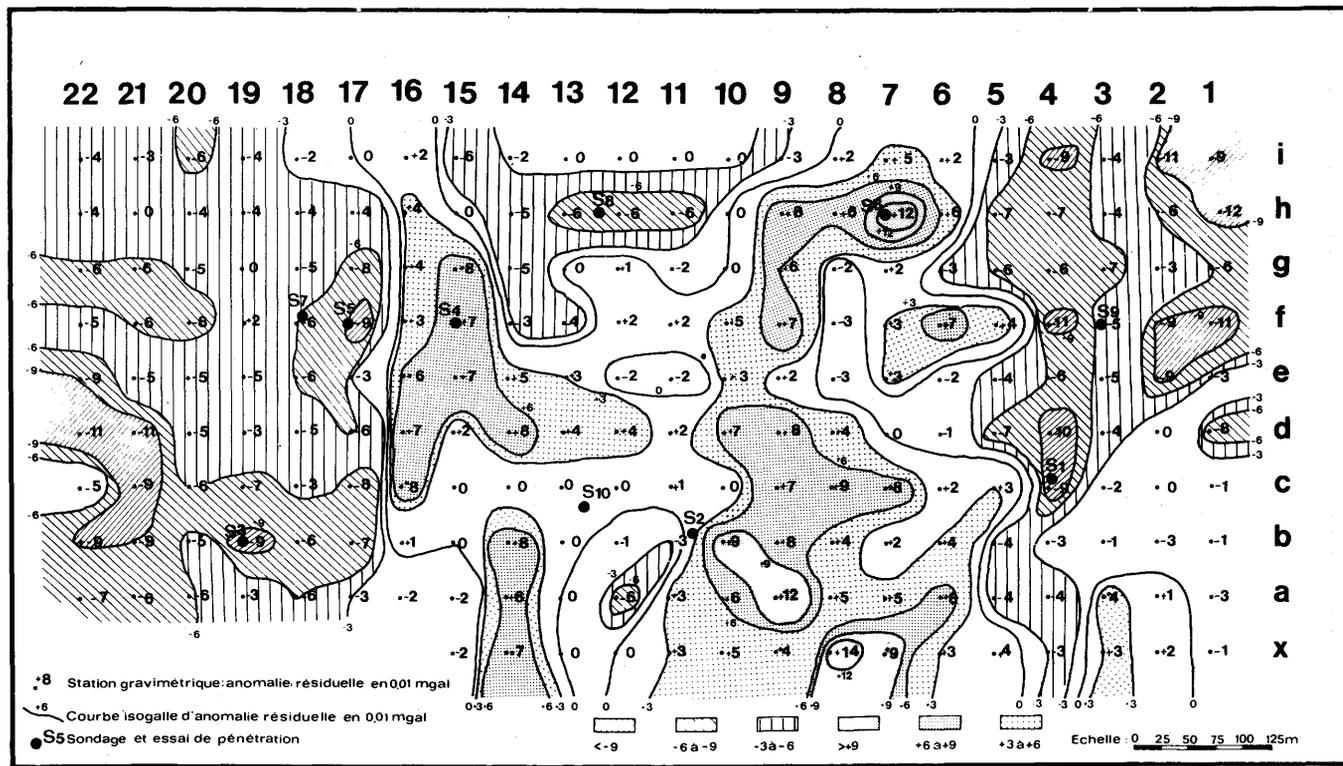


Figure 1.- Aérogare de Bierset : carte gravimétrique résiduelle

saines. Dans les calcaires paléozoïques de la région liégeoise, nous avons généralement obtenu :

	Calcaires compacts	Calcaires fissurés altérés	Calcaires karstifiés
vitesse sismique	1800-3400 m/s	750 à 1000 m/s	< 700 m/s
résistivité électrique	> 1000 ohm.m	500 à 1000 ohm.m	50 à 100 ohm.m

Pour les études de détail, il faut travailler sur les types d'ondes, leur forme, leur amplitude, leur fréquence.

On parvient parfois à détecter avec précision une cavité en sismique-réfraction en étudiant les micro-retards et les atténuations d'amplitude. Le bloc sismique, qui enregistre les arrivées d'un tir "lointain" sur une série de géophones implantés en mailles serrées sur la zone à investiguer, donne parfois de bons résultats moyennant une structure géologique adéquate (notamment un bon marqueur sous les horizons karstiques et une tectonique faible) et une géométrie tir-géophones bien adaptée. On peut également utiliser les rapports entre les vitesses d'ondes longitudinales (onde de compression) et d'ondes transversales (onde de cisaillement) (A. MONJOIE & C.S. SCHROEDER, 1978a). En sismique-réflexion, on constate parfois une réflexion de l'onde au toit de la cavité, un changement de polarité par rapport à la réflexion profonde. La figure 2, extraite du travail de M. FRAPPA, R. HORN, P. MURAOUR, J. PERAGALLO (1977) schématise ces phénomènes.

Ces techniques nécessitent généralement de travailler avec des longueurs d'ondes inférieures aux dimensions et profondeur de la cavité, imposant ainsi un appareillage particulier. Il y a lieu également de rapprocher au maximum le point d'émission au point de réception. Par interférence de l'onde directe et de l'onde de réflexion, on constate généralement un accroissement de l'amplitude du signal et une anomalie dans la fréquence (FRAPPA *et al.*, 1977). Les mesures se font par trainées du même type que la sismique réflexion en mer. Le procédé de microsismique réflexion semble présenter de bonnes perspectives pour l'avenir. Dans certains cas, on envisage également de procéder par résonance sismique.

La prospection électrique par la méthode des résistivités est basée sur la loi d'Ohm $V = RI$. On mesure entre deux électrodes MN la différence de potentiel V engendrée dans les terrains par un courant I envoyé par deux électrodes externes A et B. Différentes dispositions ou écartements des électrodes permettent d'inves-

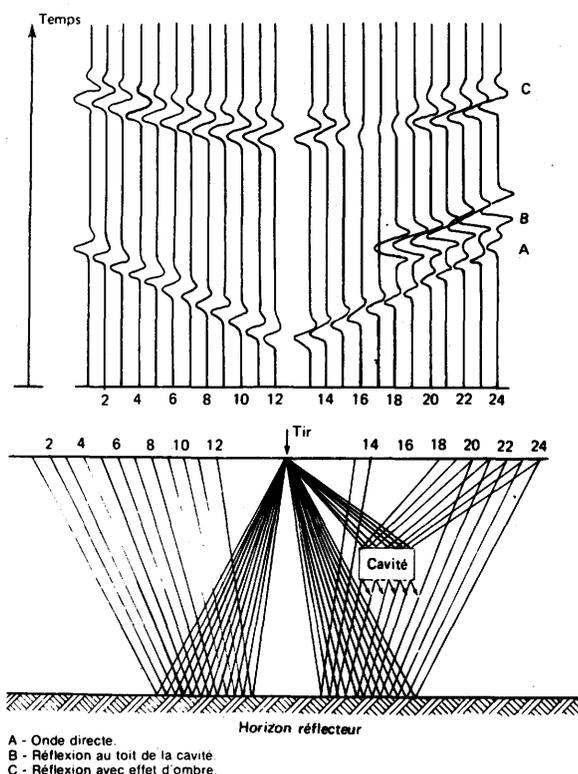


Figure 2.- Sismique-réflexion au droit d'une cavité. Extrait du Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées n° 92, Paris.

tiguer les terrains en profondeur. On peut ainsi déterminer les phénomènes karstiques en fonction des modifications qu'ils créent dans la conductivité des terrains. Il s'agit suivant les cas d'une augmentation ou d'une diminution des résistivités. Dans le cas des phénomènes karstiques, on travaille généralement par trainées en mesurant les différences de résistivité. Comme dans la sismique classique, il s'agit plus d'une méthode de dégrossissage que d'une étude précise. La figure 3 donne l'allure des trainées électriques réalisées dans la région d'Eupen-Moresnet, perpendiculairement au contact schisto-calcaire. Elles mettent en évidence la présence des failles transverses et dans les calcaires du nord, des phénomènes karstiques particulièrement nets au droit des accidents tectoniques (MONJOIE, 1975a).

Durant les dernières années, les méthodes électro-magnétiques ont pris un essor remarquable dans la détection des cavités. Elles sont basées sur la mesure des composantes du champ électrique et magnétique naturel ou artificiel. Dans les domaines qui nous in-

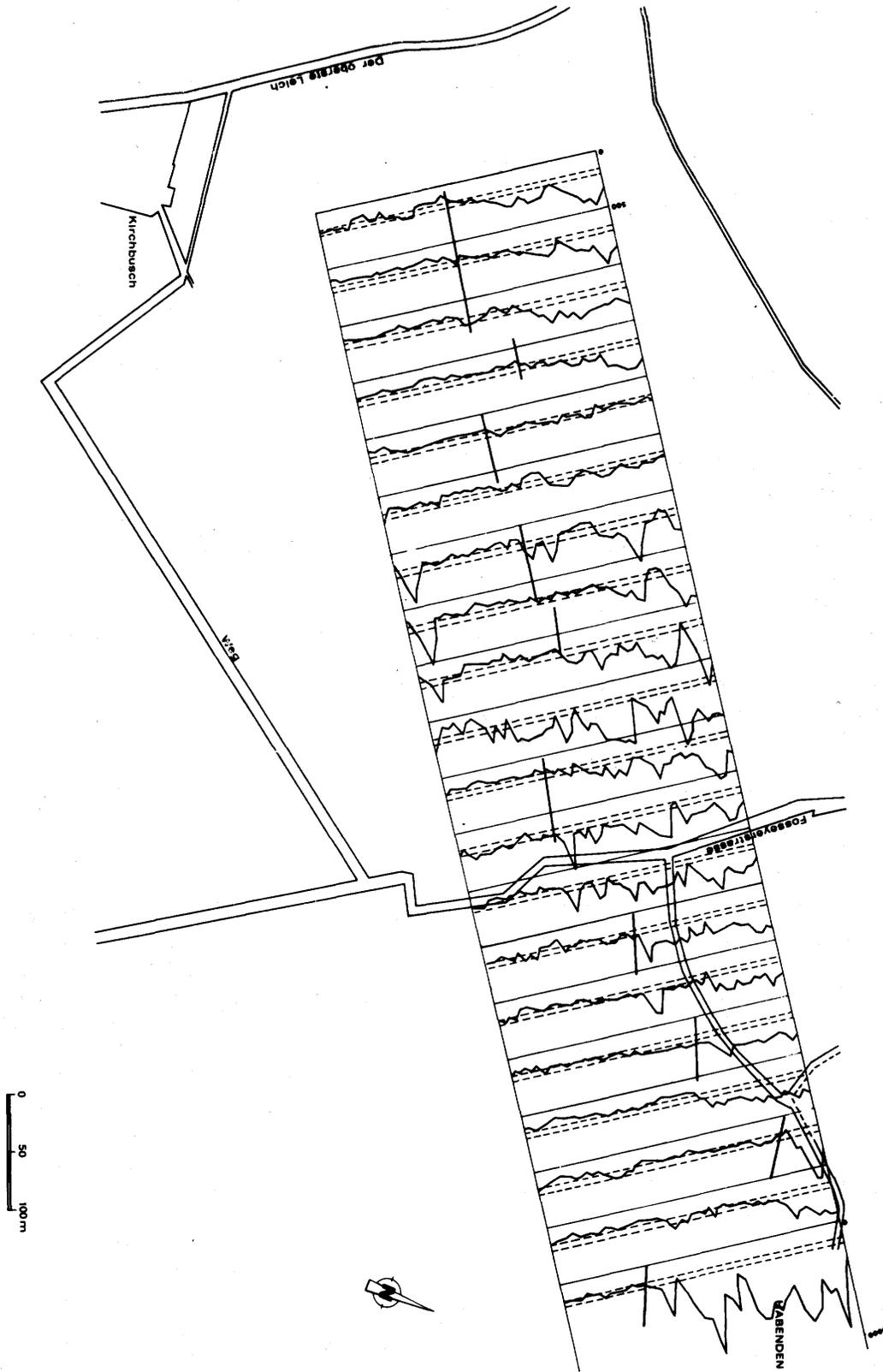


Figure 3.- Eupen Moresnet - Tratnées électriques

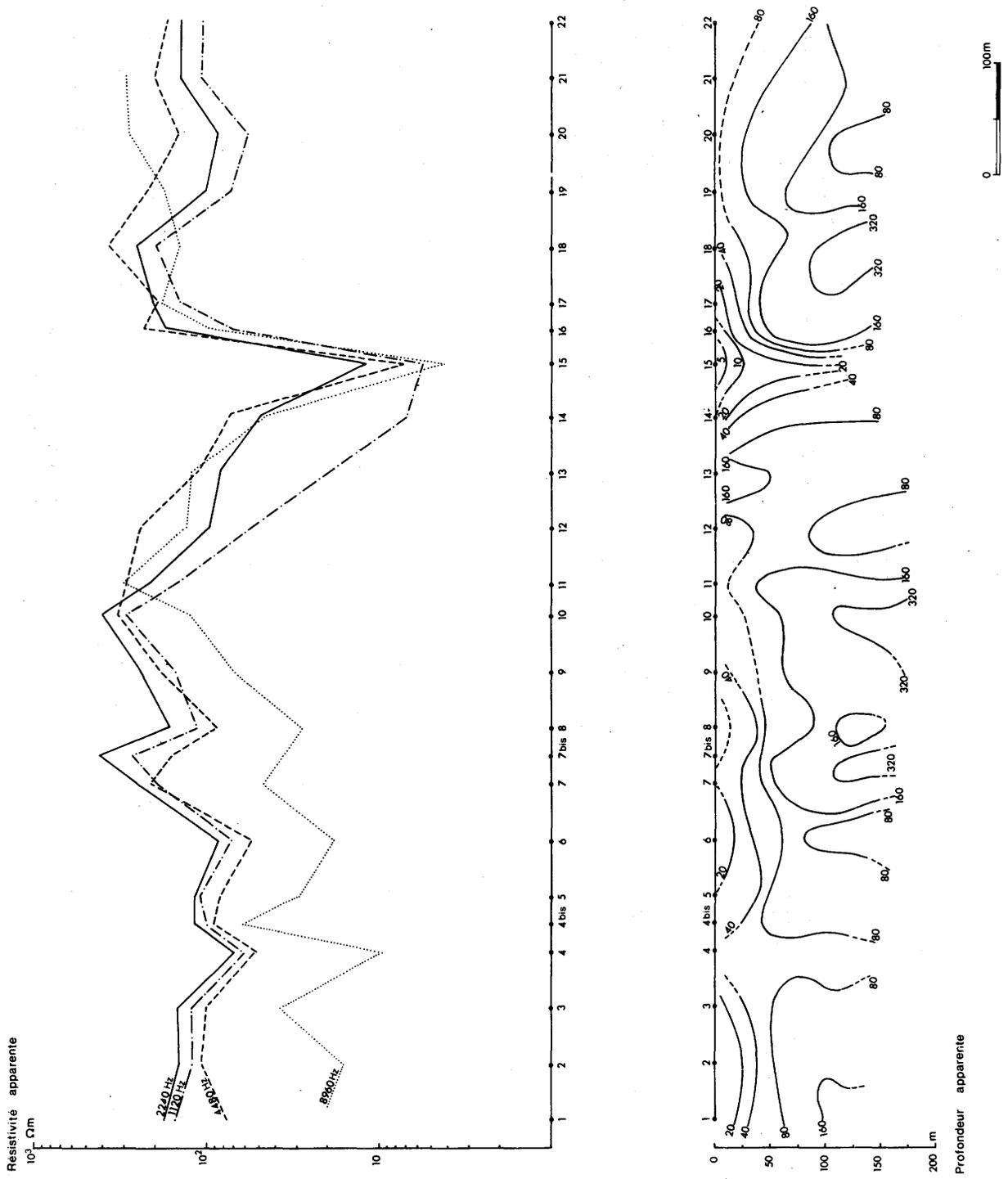


Figure 4.- Eupen Moresnet - Profils électromagnétiques Melos

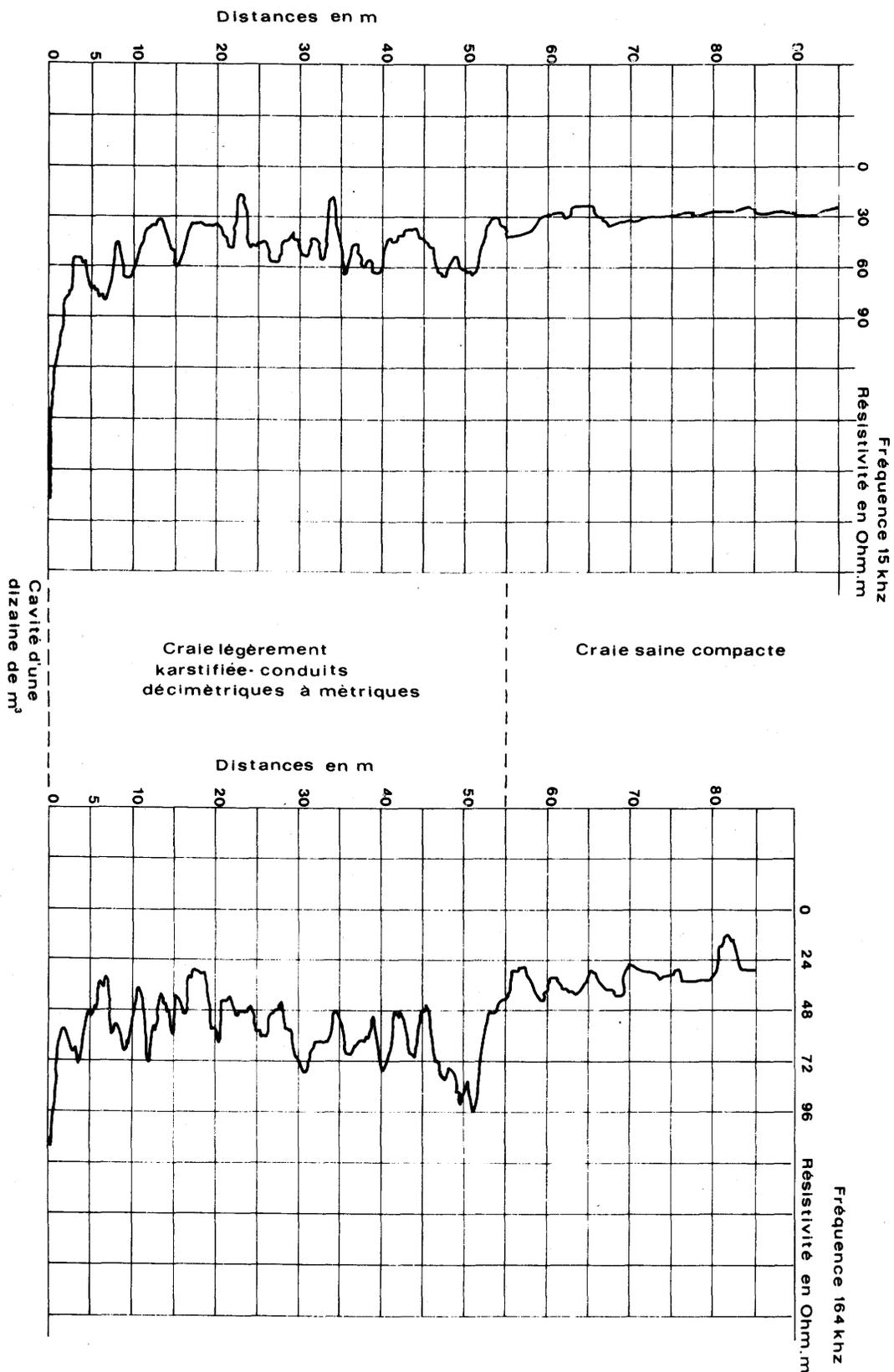


Figure 5.- Pommeroeul : profils électromagnétiques avec l'appareil LCPC.

téressent, la précision nécessaire ne permet généralement pas d'utiliser les phénomènes naturels, trop étendus ou souvent aléatoires. On préfère utiliser un émetteur de surface qui induit le champ électro-magnétique. Une boucle de réception mesure les trois composantes du champ électrique et magnétique et permet le calcul des résistivités du terrain. L'utilisation de différentes fréquences permet une investigation différentielle en profondeur. Nous avons obtenu des résultats intéressants dans la région d'Eupen-Moresnet avec un appareillage de prospection magnéto-électrique par onde de surface (Mélos) (MONJOIE, 1975a). Il a permis de localiser avec précision les failles aquifères et les chantoirs. La figure 4 donne l'allure des courbes et les phénomènes karstiques correspondants.

Une variante intéressante (A. DUPIS, 1976, 1977) consiste à utiliser des émetteurs existants, en l'occurrence France-Inter (164 KHz) et Châteauroux (15 KHz) en mesurant les variations de potentiel électrique au moyen d'un capteur capacitif : armature de condensateur de $0,8 \text{ m}^2$ environ posé sur un tapis en caoutchouc déposé sur le sol. Si la méthode ne permet pas d'investigation différentielle en profondeur, elle possède l'avantage d'être extrêmement rapide et de donner des résultats à profondeur limitée. La figure 5 donne les résultats obtenus avec l'appareillage du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Paris au droit d'une cavité de quelque m^3 située à 2 m de profondeur et sur des chenaux karstiques dans la craie de la région de Pommeroeul.

Pour pallier les effets des variations d'épaisseur et de conductivité des couches superficielles susceptibles de masquer les anomalies dues aux cavités plus profondes, on peut aussi focaliser le champ émetteur par une boucle secondaire couplée à la boucle principale et annulant la composante horizontale du champ électrique engendré dans l'horizon supérieur au droit du récepteur. La figure 6 donne le schéma prévu par R. GABILLARD & J.P. DUBUS (1977). D'autres variantes sont également possibles et récemment on a vu se développer une méthode utilisant le radar pour localiser des cavités peu profondes.

Dans certains cas, des mesures de potentiels spontanés permettent de localiser des phénomènes karstiques surtout en présence d'une circulation des eaux.

Si les méthodes géophysiques sont nombreuses, il faut cependant se rappeler que la mesure des paramètres physiques du sol et les hétérogénéités des terrains naturels ne permettent pas toujours de trouver une solution unique aux anomalies observées. Il est

nécessaire de très bien connaître le cadre géologique et utiliser plusieurs méthodes différentes de façon à éliminer certaines hypothèses.

Enfin, un contrôle direct par forage ou essais de pénétration est nécessaire. A ce niveau également, de grands progrès ont été réalisés. Les essais de pénétration peuvent atteindre 20 T et être couplés avec du battage et du forage pour traverser les horizons durs. En roches cohérentes, le sondage carotté long et coûteux, souvent décevant dans les phénomènes karstiques en raison du nombre important de vides, est actuellement remplacé par un forage à destruction plus rapide et moins onéreux. De façon à obtenir les renseignements nécessaires, des diagraphies sont réalisées dans le trou. Outre l'enregistrement des vitesses d'avancement, de vibration d'outil, de perte d'eau ou de boues de forage, on a adapté aux problèmes du génie civil, les techniques employées depuis de nombreuses années par les pétroliers.

Les principales sont :

- les diagraphies électriques (potentiel spontané, microlog, microlatérolog, latérolog, inductolog, etc...) qui mesurent les mêmes paramètres que la prospection électrique de surface mais in situ avec focalisation permettant une définition ponctuelle précise et des profondeurs de pénétration variables. Elles permettent de calculer une perméabilité relative des terrains sur base des diamètres d'invasion des fluides de forage dans les formations.
- le sonic équivalent de la sismique surface mais en profondeur, présente également un pouvoir sélectif poussé.

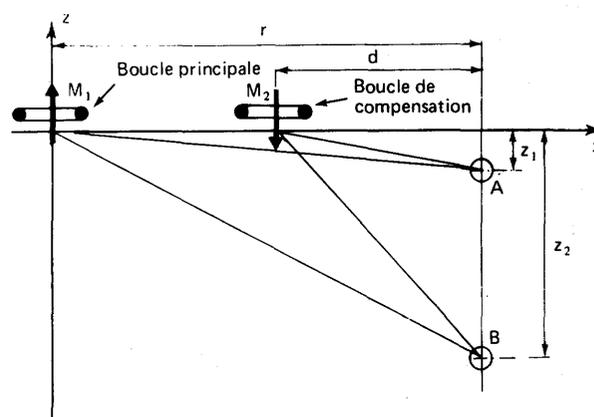


Figure 6.- Schéma de compensation de champs électromagnétiques en surface.
Extrait du Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées n° 92, Paris.

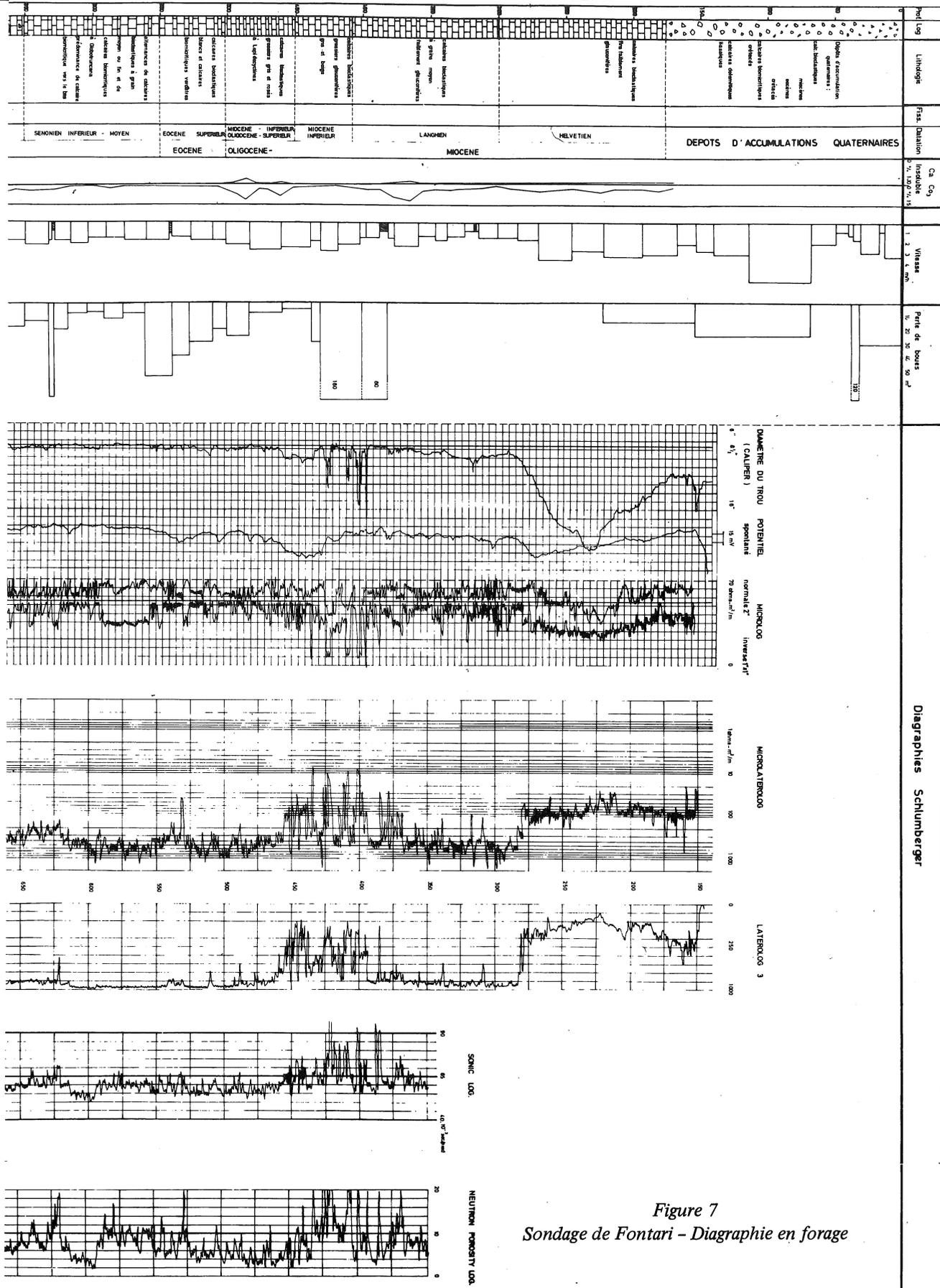


Figure 7
Sondage de Fontari - Diagraphie en forage

- les diagraphies de formation qui mesurent la teneur en argile (gamma ray), la teneur en eau (gamma neutron) et la densité (gamma gamma), couplées avec les résultats du sonic, permettent de définir le type de fissuration rencontrée, son degré d'ouverture, la nature du remplissage et la porosité.

D'autres techniques sont également réalisables telles que l'enregistrement des températures, l'observation visuelle par télévision, la pendagimétrie qui mesure l'orientation et la direction des fissures in situ. La figure 7 donne les résultats des différentes diagraphies dans le sondage de Fontari, dans le massif du Gran Sasso (MONJOIE, 1975b, 1978b). On distingue un horizon karstique entre 390 et 450 m de profondeur et différentes failles et fractures plus ou moins aquifères notamment à 480, 510, 530, 620 m de profondeur.

Les diagraphies fournissent, outre l'étude en profondeur, les paramètres de calcul nécessaires à une meilleure interprétation des prospections de surface. Les deux méthodes permettent ainsi de mieux visualiser les phénomènes en trois dimensions. Dans ce but également, on couple parfois la prospection en sondage et en surface en plaçant une partie des appareillages au niveau du sol et l'autre en profondeur. On peut ainsi réaliser des sondages sismiques avec géophones en sondage et tirs en surface à des distances et suivant des directions différentes et des sondages électriques ou électromagnétiques avec émetteur en surface et récepteur en profondeur (GABILLARD *et al.*, 1977). A partir d'un trou de forage, on obtient l'information sur plusieurs mètres ou plusieurs dizaines de mètres.

Cette liste de méthodes est loin d'être exhaustive et pour le prouver, on peut ajouter une technique réalisée en Yougoslavie (ARANDJELOVIC, 1977) et qui consiste à larguer dans un chantoir une mine à mise à feu retardée et d'enregistrer les ondes provoquées par l'explosion. Comme pour un séisme, on calcule l'épicentre et l'hypocentre de l'explosion et en répétant l'opération avec différents retards, on peut retracer le cours souterrain de la rivière et étudier spatialement les caractéristiques du massif surincombant.

Toutes ces méthodes sont actuellement un outil remarquable pour l'étude du karst et indispensable si l'on veut répondre aux problèmes précis que posent l'hydrogéologie et la géologie de l'ingénieur en terrains karstiques. Elles ne sont cependant valables que si elles sont choisies et interprétées en fonction des conditions naturelles que les sciences géologiques doivent définir mais à une échelle des problèmes humains et contemporains.

BIBLIOGRAPHIE

- ARANDJELOVIC, D., 1977. Proceedings of the Twelfth International Congress Karst Hydrogeology, Mémoires XII : 399-400, edited by Janyth S. Tolson and F.L. Doyle, University of Alabama in Huntsville.
- CALEMBERT, L. & MONJOIE, A., 1970. Bassin karstique et réseau souterrain de la région de Beaufort (Liège-Belgique). Actes du Colloque d'Hydrogéologie en Pays calcaire : 277-283, 2 fig., 1 tabl., Besançon.
- CALEMBERT, L. & MONJOIE, A., 1973. Géologie de l'Ingénieur en relation avec les roches solubles en Belgique. Symposium de Hanovre de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, 4 : F1-F8, 10 fig., Hanovre.
- CALEMBERT, L. & MONJOIE, A., 1975a. Observations hydrogéologiques dans la vallée de la Haine (Belgique). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 280, série D-2637 à 2639, 2 fig., Paris.
- CALEMBERT, L. & MONJOIE, A., 1975b. Modification du régime hydraulique des eaux souterraines dans la vallée de la Haine (Belgique). Colloque de Géologie urbaine du Comité Belge de Géologie de l'Ingénieur, 12 pp., 4 fig., Bruxelles.
- CALEMBERT, L. & MONJOIE, A., 1975. Problèmes de Géologie de l'Ingénieur en régions karstiques. Bull. Assoc. Intern. Géol. de l'Ing. 12 : 93-132, 23 fig., Krefeld.
- DUPIS, A., 1976. Application d'une méthode magnéto-tellurique à la reconnaissance des sites. Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées 84 : 61-68, Paris.
- DUPIS, A., 1977. Localisation des cavités par la méthode magnéto-tellurique artificielle (MTA). Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées 92 : 66-67, Paris.
- FRAPPA, M., HORN, R., MURAOUR, P. & PERAGALLO, J., 1977. Contribution à la détection par sismique réflexion des cavités souterraines de faible profondeur. Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées 92 : 59-65, Paris.
- GABILLARD, R & DUBUS, J.P., 1977. Procédé électromagnétique par focalisation des courants. Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées 92 : 80-86, Paris.
- GABILLARD, R., DUBUS, J.P., BAVANDI, R., RAT, M. & LAGABRIELLE, R., 1977. Détection des cavités souterraines par une méthode électromagnétique entre surface et forage. Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées 92 : 68-72, Paris.
- LAKSHMANAN, J., BICHARA, M. & ERLING, J.C., 1977. Etudes de fondation en terrain caverneux, Place de la gravimétrie. Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées 92 : 74-79, Paris.
- MONJOIE, A., 1974. Phénomènes de dissolution dans la zone nord de Liège. 2ème Congrès International de l'Ass. Inter. de Géol. de l'Ing., III(18), 10 pp., 4 fig., Sao Paulo.
- MONJOIE, A., 1975a. Application de la méthode magnéto-électrique à la recherche des conduits et vides karstiques. Colloque de Géologie urbaine du Comité Belge de Géologie de l'Ingénieur, 14 pp., 5 fig., Bruxelles.

- MONJOIE, A., 1975b. Hydrogéologie du Massif du Gran Sasso (Apennin central). Université de Liège, Faculté des Sciences appliquées. Collection des Publications 53 : 1-60, 17 fig., 8 tabl., 3 pl., hors-texte, Liège.
- MONJOIE, A., 1978a (en coll. avec Ch. SCHROEDER). Auscultation des massifs rocheux par sismique-réfraction et propriétés géodynamiques des terrains. 3ème Congrès International de l'Association internationale de Géologie de l'Ingénieur, IV (2) : 29-36, 2 fig., Madrid.
- MONJOIE, A., 1978b. Problèmes hydrogéologiques rencontrés par les tunnels autoroutiers dans le massif du Gran Sasso (Apennin central). Symposium International sur les implications de l'Hydrogéologie dans les autres sciences de la terre, Montpellier.
- MONJOIE, A., 1979. Reconnaissances hydrogéologiques au Guatemala. Cinquantenaire de l'A.R.S.O.M. (sous presse).
- Hydrogéologie des terrains karstiques. International Union of Geological Sciences. Series B, Number 3. International Association of Hydrogeologists, Paris 1975.
- Karst Hydrogeology. Memoirs of the 12th Congress of the International Association of Hydrogeologists, XII, UAH Press. The University of Alabama in Huntsville, Alabama.