

## PROCEDES GEOPHYSIQUES SUR TERRAINS KARSTIQUES

par

G. BERLASSO<sup>1</sup>, F. CUCCHI<sup>2</sup>, F. GIORGETTI<sup>2</sup> & F. ULCIGRAI<sup>2</sup>

(7 figures)

**RESUME.** - Dans le but d'examiner les variations des paramètres géophysiques propres aux roches carbonatées karstifiées, en faisant varier l'orientation des procédés géophysiques en ce qui concerne l'organisation spatiale des discontinuités tectoniques, on a exécuté, sur le même point et dans quatre directions différentes, de la sismique réfraction, des profils électriques, des sondages électriques verticaux et à polarisation induite. De l'analyse des données, il résulte des variations plus ou moins marquées des paramètres géophysiques justifiables seulement avec l'analyse structurale des discontinuités et avec différentes typologies de karstification des joints et des diaclases. Parmi les méthodes utilisées, la polarisation induite dans le domaine du temps apparaît comme la plus apte à donner les résultats les plus profitables.

### **ABSTRACT.** - Geophysical methods in karst terrains.

In this study of the geophysical properties of karstified rocks, the variations of the geophysical parameters were studied as a function of the variation of the orientation, related to tectonical discontinuities. For this purpose, four different geophysical (sismic and electrical) methods were used at the same place, in four different directions. The analysis of the data reveals variations related to structural discontinuities and to various types of karstified joints.

Among the tested methods, induced polarization appears to be the most suitable to disclose the nature and intensity of the underground karstification.

### **RIASSUNTO.** - Prospezioni geofisiche in aree carsiche.

Al fine di esaminare le variazioni dei parametri geofisici competenti a rocce carbonatiche carsificate al variare dell'orientazione degli stendimenti rispetto all'assetto spaziale delle discontinuità, sono stati eseguiti sullo stesso punto e con quattro direzioni differenti basi sismiche a rifrazione, profili e sondaggi elettrici verticali oltre che a polarizzazione indotta. Ne risultano variazioni più o meno marcate dei parametri geofisici, giustificabili solamente con l'analisi della situazione strutturale e con diverse tipologie di carsificazione delle superfici di discontinuità. Inoltre, fra le varie metodologie di indagine, la polarizzazione indotta nel dominio del tempo si configura come la più adatta a mettere in luce l'entità della carsificazione ipogea.

### **AVANT-PROPOS**

En 1979-80, les auteurs ont effectué une série d'analyses détaillées dans une vaste zone (230 ha) du Karst près de Trieste (Italie), dans le but d'en mettre au point les caractéristiques géologiques et techniques. Au cours de ces recherches, outre la fixation de données lithologiques, structurales, géomorphologiques et sur la karstification épigée et hypogée, l'on a aussi exécuté une série de recherches géoélectriques (profils de résistivité avec  $AB/2 = 30$  m et  $= 50$  m et avec des intervalles de mesure de 10 m) et thermographiques (survolés avec enregistrement en deux temps différents dans les bandes 1-2 et 9-11 microns), dans le but de mettre au point les caractéristiques électriques et thermiques de cette zone.

Pendant l'analyse des données, destinée à l'évaluation de l'état de karstification de la zone, l'on a rencontré des difficultés en ce qui concerne l'intégration et la corrélation des éléments découlant des différentes approches d'étude. On avait, par exemple, remarqué que quelques anomalies de résistivité n'étaient pas justifiées par les données géologiques et géomorphologiques. Ainsi le modèle d'interprétation géologique du paramètre géophysique pouvait être attribué d'une façon non univoque à la présence de vides béants ou à des cavités remplies de dépôts, à un bedrock extrêmement compact ou karstifié, à une karstification diffuse ou ponctuelle, etc.

1 *Osservatorio Geofisico Sperimentale - Trieste.*

2 *Istituto di Geologia e Paleontologia - Università di Trieste.*

D'autres analyses du même genre, exécutées par la suite dans d'autres zones karstiques ont résolu des situations particulières, sans pourtant éliminer la difficulté de donner un modèle univoque à l'ensemble de tous les résultats.

Dans le but d'apporter une nouvelle contribution à la solution de ces problèmes, on a projeté d'autres recherches géophysiques, parmi lesquelles il y a celles illustrées ci-dessous, exécutées pour pouvoir analyser d'une meilleure façon les variations des paramètres géophysiques en fonction de la fréquence et de l'organisation spatiale des plans de discontinuité des roches. En particulier, on a exécuté une série de recherches au moyen de la sismique réfraction, de profils géoélectriques, de sondages électriques verticaux et de polarisation induite, dans une zone sans cavités connues et caractérisée par une lithologie qui garantissait dans toute la mesure du possible l'absence de vides susceptibles d'influencer d'une façon significative les données géophysiques.

D'autres auteurs avaient déjà exécuté des enquêtes de ce genre : ces enquêtes étaient cependant essen-

tiellement différentes en ce qu'elles étaient consacrées à des situations spécifiques (cavités connues ou dépôts de terres rouges), avec des méthodologies opérationnelles différentes et avec l'acquisition de paramètres géophysiques différents. Notre objectif a été essentiellement celui d'analyser le "niveau de réponse" des différentes méthodes, de comparer les paramètres mesurés et de vérifier les possibilités de discrimination, dans les différentes directions, des caractéristiques structurales des terrains et de l'organisation spatiale des fractures karstifiées.

**DONNEES GEOLOGIQUES**

Les recherches ont été menées dans une zone morphologiquement adéquate, à l'intérieur de la zone analysée en 1979-80, caractérisée par une couverture terreuse-détritique faible mais continue, sur le flanc légèrement incliné d'une vaste doline, près du sommet d'un faible anticlinal qui complique légèrement l'organisation monoclinale générale de la zone. La roche est formée

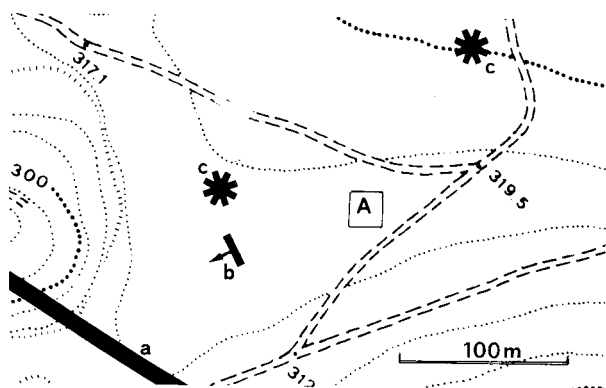


Figure 1 A. - Carte structurale (du travail 1979-80).  
a : linéation; b : stratification; c : station de mesure; A : la zone étudiée.

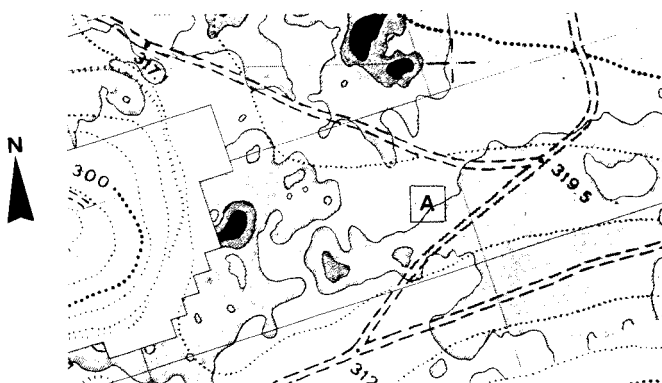


Figure 1 B. - Carte des isorésistivités depuis les profils de 10 en 10 m. Intervals : -1000; 1000-3000; 3000-5000; 5000-7000; 7000- ohm.m par AB = 30 m.

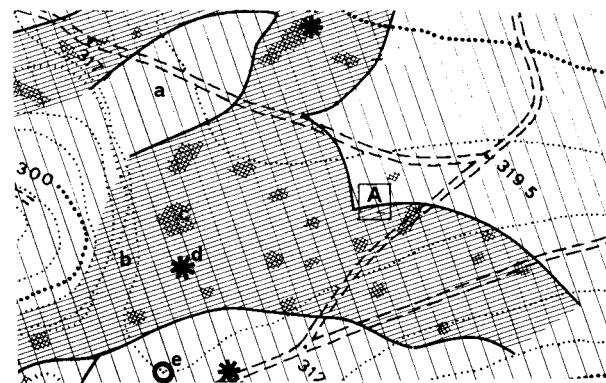


Figure 1 D. - Carte de synthèse.  
a : zone à basse résistivité; b : zone à haute résistivité; c : anomalies positives de résistivité; d : anomalies thermiques; e : cavité.

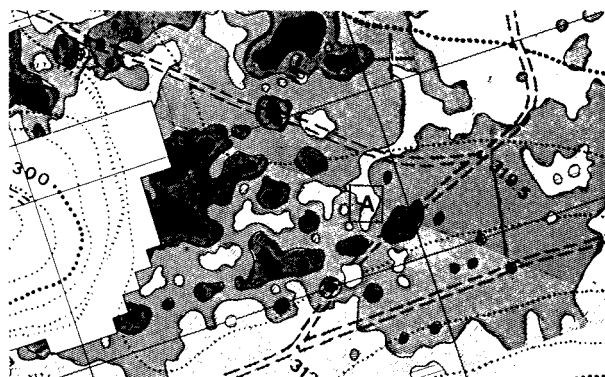


Figure 1 C. - Carte des isorésistivités depuis les profils de 10 en 10 m. Intervals : -2000; 2000-4000; 4000-6000; 6000-8000; 8000- ohm.m par AB = 50 m.

de "Calcaire à Rudistes" du Crétacé supérieur, de calcaires compacts, de biomicrites avec stratification et fissuration décimétrique-métrique. L'organisation spatiale, obtenue moyennant le relevé de 200 plans de fracturation dans deux stations de mesure placées aux environs, est caractérisée par la présence d'une série de systèmes de fracturation dûs aux poussées dinariques NE-SW, qui déterminent la genèse de l'anticlinal du Karst de Trieste.

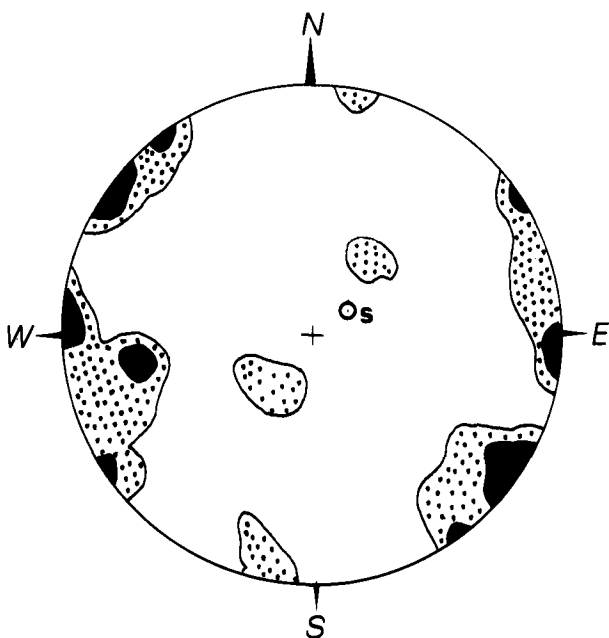


Figure 2

Diagramme de la fissuration. 200 pôles sur le réseau de Schmidt. Fréquence en points = 3-6 % en noir = > 6 %/o. Le cercle(s) indique le pôle de la stratification.

Schématiquement, la situation structurale est la suivante :

- discontinuités par stratification : direction NW-SE, pendage de 10° vers SW. Fréquence de 10 à 40 cm en moyenne.
- discontinuités par fissuration :
  - système N-S**, considérable et concentré, de subvertical à incliné de 70° vers l'E. Fréquence de 10 à 25 cm, plan de cisaillement souvent fortement karstifié en surface;
  - système NE-SW**, considérable et diffus (25°), subvertical. Fréquence de 5 à 20 cm, plan de tension ouvert souvent karstifié en surface. Il a une forte influence sur les cavités connues aux environs, est parallèle à des linéations identifiées par les photos aériennes de la zone et qui sont probablement en relation avec des failles limitées;
  - système NW-SE**, moyennement fréquent et concentré, subvertical. Fréquence décimétrique, plan de tension, en général peu karstifié en surface;
  - système E-W**, sous-système subvertical. Fréquence décimétrique, plan de cisaillement, rarement karstifié en surface,

Il y a en outre deux systèmes mineurs, avec une direction parallèle à la stratification et avec un pendage SW et NE respectivement, qui forment avec le plan des strates des angles de 20° environ.

Cette situation structurale fait partie du cadre tectonique général, mais il faut rappeler que, sur la base des données sismologiques, cette zone est à présent soumise à des pressions orientées N-S, ce qui favorise la transformation en plan de cisaillement des fractures NW-SE et NE-SW, facilitant ainsi aussi la karstification des fractures théoriquement non favorisées.

En ce qui concerne la géomorphologie épigée et hypogée, la zone étudiée est essentiellement caractérisée par le "Karst couvert" et les environs immédiats par des affleurements limités de bancs, sur lesquels on retrouve toutes les typologies microkarstiques. Dans cette zone il n'y a pas de cavités; par contre, en dehors de cette dernière et dans un rayon de 450 m environ, on a inventorié 13 cavités, dont 10 sont des puits (quelques-uns explorables jusqu'à 40-50 m), deux sont des galeries à structure complexe et avec un léger pendage, et la dernière est une étroite caverne située sur le flanc d'une doline.

## DONNEES GEOPHYSIQUES

### SISMIQUE

L'instrument digital utilisé pour la sismique réflexion est le BISON 1580 à six canaux et à enregistrement permanent analogique sur écran et sur papier. Le sondage sismique était de 33 m, avec des géophones sur câble à 24 canaux et avec distance du point d'émission en avant et en arrière de 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 5; 7; 9; 11; 13; 17; 21; 25; 29 et 33 mètres, afin d'obtenir la résolution la meilleure sur l'interface dépôts de couverture-roche et sur les caractéristiques superficielles du bedrock réfractant. Les sondages ont été exécutés tous les 45°, faisant faire une rotation à l'emplacement des géophones par rapport au centre du dispositif.

La sismique a mis en évidence la couverture minimale (de quelques décimètres au mètre) terreuse-détritique de la zone (avec des valeurs de Vp de 280-400 m/sec) et le développement ondulé-irrégulier avec des légers abaissements du bedrock, ce qui a donné des vitesses différentes des Vp dans les quatre directions :

sondage 1, en direction N-S	Vp = 3000 m/sec
sondage 2, direction NE-SW	Vp = 1700 m/sec
sondage 3, direction E-W	Vp = 2050 m/sec
sondage 4, direction NW-SE	Vp = 2400 m/sec

Pour les quatre directions on obtient donc, dans la pratique, des vitesses qui sont en moyenne inférieures à celles des roches calcaires et l'on observe même des variations de 40 %/o, ce qui prouve une anisotropie du bedrock dans les différentes directions.

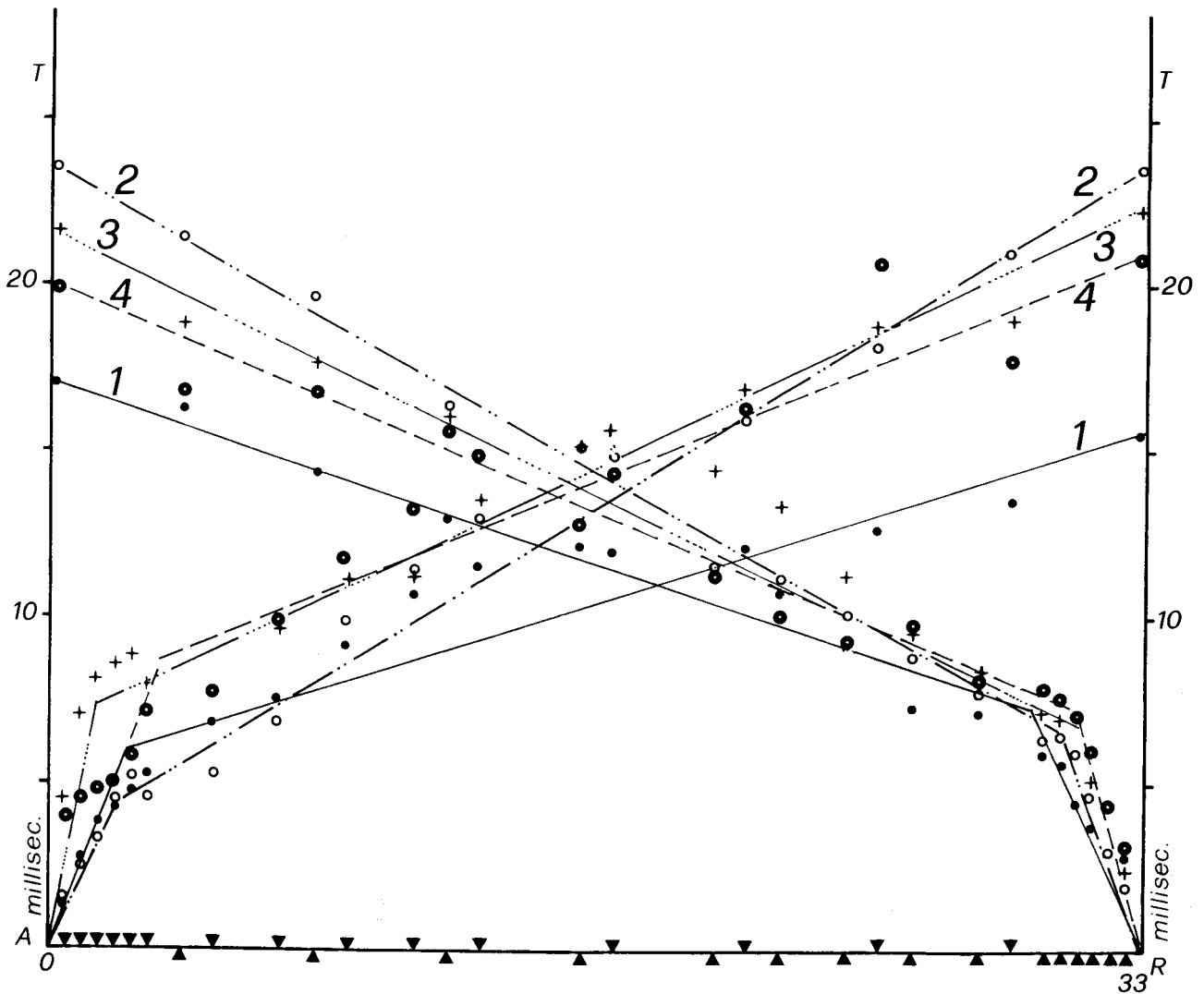


Figure 3. - Dromochroniques des sondages sismiques; les 4 directions : 1 : N-S; 2 : NE-SW; 3 : E-W; 4 : SE-NW.

**GEOELECTRIQUE**

L'instrument utilisé est le SYSCAL R, du B.R.G.M., qui permet des mesures de résistivité avec accumulation du signal, et de polarisation induite dans le domaine du temps. Avec cet instrument, on peut changer aussi bien les temps d'énergisation que les temps d'interposition de dV dans le temps.

Le long du périmètre de la zone, avec des intervalles de 10 m et toujours selon les quatre directions différentes, on a exécuté des mesures de résistivité en 8 points avec deux ouvertures AB=30 m et AB=50 m. Il en résulte que, en général, avec AB=30 m la résistivité moyenne est de 3500 ohm.m et de 5000 ohm.m environ avec AB=50 m. Il s'agit de valeurs moyennement adéquates pour des roches calcaires pas trop karstifiées et donc sans cavités considérables. Il en résulte, en particulier, que la résistivité présente les valeurs maximales dans la direction N-S et les valeurs minimales dans la direction E-W.

Au centre de la zone et dans les quatre directions, on a exécuté des sondages géoélectriques verticaux de résistivité et de polarisation induite dans le domaine du

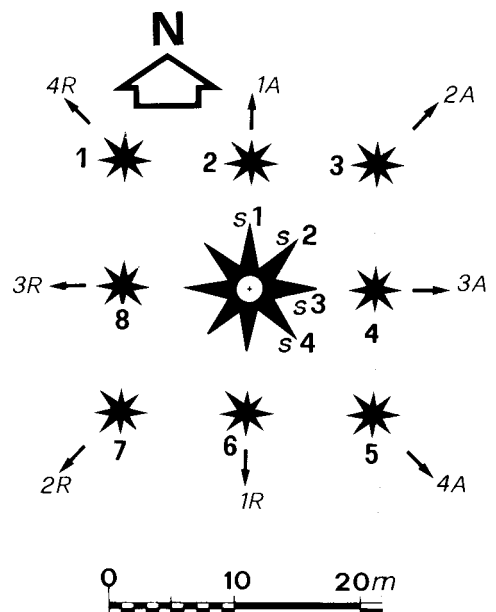


Figure 4. - Ubication des mesures : 1A-1R : sismique ; 1 : profil ; s1 : sondage.

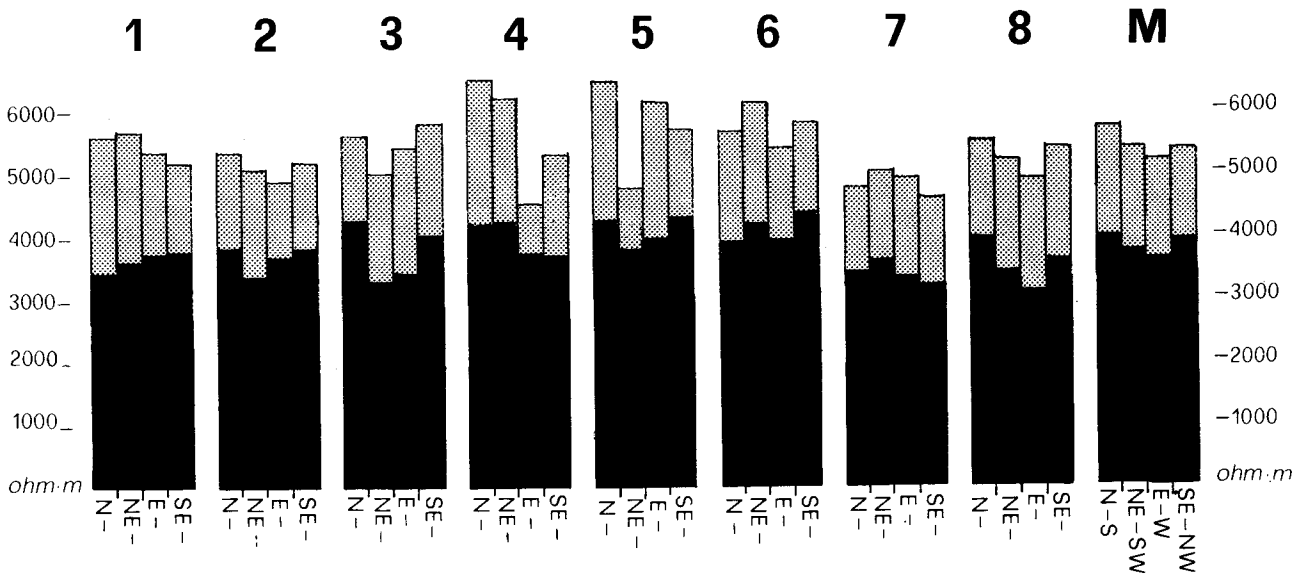


Figure 5. - Valeurs de résistivité pour les profils avec AB = 30 m (en noir) et AB = 50 m (en gris) dans les 8 points de mesure et pour les 4 directions, dont M est ici la médie.

temps avec le dispositif quadripolaire Schlumberger et AB/2 max = 68,1 m.

De l'interprétation des courbes de résistivité l'on obtient un modèle de 3 couches avec courbe de type A. En particulier, la résistivité maximale est toujours présente dans la direction N-S. Par contre, la troisième couche ( $AB/2 \geq 21,5$  m) montre une forte différenciation et augmentation de la résistivité dans la direction N-S par rapport aux autres directions, qui à leur tour présentent des résistivités très proches. Les valeurs minimales sont observées en direction E-W. Il faut noter que les valeurs maximales (12000 ohm.m) sont extrêmement élevées.

Dans le même temps, on a exécuté les mesures de polarisation induite dans le domaine du temps. Les temps d'intégration ont été choisis après des tests préalables, qui ont montré que l'écart  $dV/dT$  était considérable immédiatement après l'ouverture du circuit d'énergisation et que les valeurs résiduelles de  $dV$  étaient prolongées dans le temps. Sur la base de ces considérations, les temps choisis ont été de 990 msec avec  $T = 12$ , 1980 msec avec  $T = 23$  et 3960 msec avec  $T = 45$ . La chargeabilité (M) est bien mise en évidence et elle est maximum dans la direction NW-SE avec  $AB/2 \leq 21,5$  et dans la direction NE-SW avec  $AB/2 \geq 21,5$  m. Dans ces deux directions les valeurs de la chargeabilité sont cependant toujours élevées par rapport aux deux autres directions, pour lesquelles les valeurs N-S sont toujours minimum. Dans l'ensemble, l'anisotropie du bedrock dans les différentes directions est plus marquée avec des temps d'intégration plus longs.

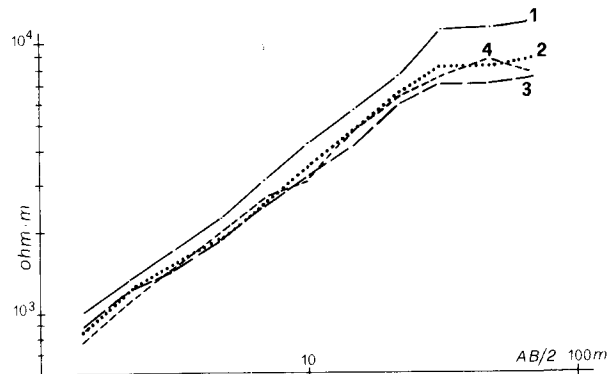


Figure 6. - Valeurs de résistivité obtenues avec les 4 SEV dans les 4 orientations.

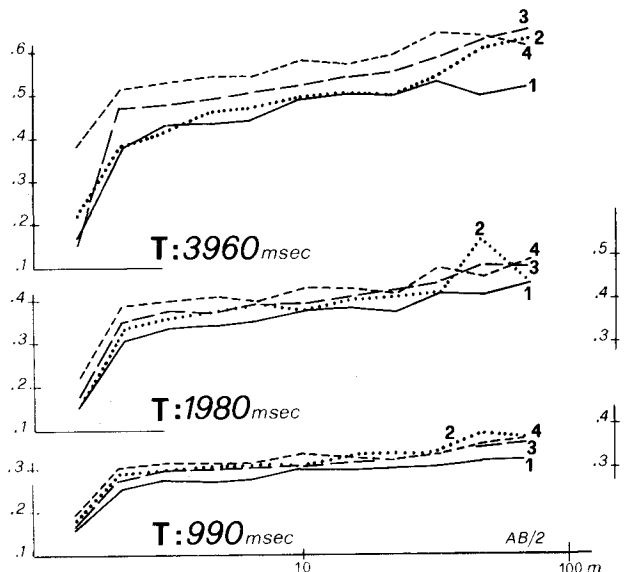


Figure 7. - Valeurs de chargeabilité (M) en secondes pour trois temps de l'intégration et pour les 4 directions.

## DISCUSSION

Du point de vue géophysique, les mesures de résistivité ont démontré, dans cette analyse, une compacité considérable du bedrock dans la direction N-S, compacité qui augmente avec la profondeur, étant donné les valeurs élevées dans cette direction. Dans les autres directions cette compacité est inférieure.

La sismique aussi confirme la rigidité maximale du bedrock superficiel en direction N-S et une rigidité bien inférieure en direction E-W.

Les mesures de chargeabilité ont en premier lieu démontré que, du point de vue méthodologique, elles sont particulièrement discriminantes dans le domaine du temps, puisque dans le temps on observe des variations considérables en pourcentage dans les différentes directions de mesure. De l'analyse des valeurs de M aux différents temps d'intégration on peut constater que les roches karstifiées sont caractérisées par une rapide diminution initiale des valeurs de potentiel et par un potentiel résiduel qui, aux fins de la différenciation, est donc le paramètre déterminant. En particulier, on a mis en évidence deux directions différentes de chargeabilité maximale associées à deux niveaux différents du sous-sol.

Les résultats des recherches géophysiques sont en corrélation étroite avec la situation géologique-structurale, puisque les données géophysiques montrent les différentes conditions de karstification des systèmes de discontinuités de la roche. Parmi les méthodes géophysiques utilisées pour la définition de la karstification les mesures électriques demeurent les plus adéquates et, parmi celles-ci, on peut envisager un emploi profitable de la polarisation induite dans le domaine du

temps, qui est la méthode apte à donner les résultats les plus significatifs.

D'ailleurs, les interprétations lithologiques des données géophysiques, bien qu'elles permettent d'envisager des directions de compacité différente et des karstifications plus ou moins intenses, avec une évolution diverse dans les différentes directions, ne semblent pas encore proches de l'univocité et d'une complète compréhension.

Etant donné les résultats, il sera donc utile de vérifier les méthodologies illustrées et, en particulier, la polarisation induite dans le temps, dans d'autres sites avec les mêmes caractéristiques et dans des sites avec des caractéristiques lithologiques et techniques différentes et, en outre, de comparer ces résultats avec des mesures en laboratoire.

## BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- BERLASSO, G., CUCCHI, F., GIORGETTI, F. & ULCIGRAI, F., 1981. Prospezioni geofisiche in aree carsiche. *Rass. Tecn. F.V.G.*, 4, 1981, Udine.
- CUCCHI, F & ULCIGRAI, F., 1982. Raffronti tra diverse metodologie di studio di un'area carsica. *Geol. Appl. e Idrol.* XVII-1982, parte II, Bari.
- MULLER, I., 1982. Résultats préliminaires des sondages géophysiques pluridirectionnels dans la région de Baume. *Bull. Soc. Neuchâtel Sc. Nat.*, 105, 1982.
- ULCIGRAI, F., 1981. Methods of study for a hypothetical industrial settlement on a Karst area. *Atti I Symp. Int. Karst areas Utilisation.* Trieste 1980.
- ZEZZA, F., 1981. In situ characterisation and geological-technical evaluation of karstified rocks. *Atti I Symp. Int. Karst areas utilisation,* Trieste 1980.