

RECHERCHE D'UN BED-ROCK CALCAIRE: METHODES CLASSIQUES COMPAREES A LA PROSPECTION ELECTROMAGNETIQUE AEROPORTEE

DETERMINATION OF A LIMESTONE BED-ROCK: TRADITIONAL METHODS COMPARED TO AIRBORNE ELECTROMAGNETIC SURVEY

DELETIE Pierre, Ingénieur Géologue*, LEMOINE Yves, Ingénieur Géologue**

P108

Résumé

L'étude et l'expérimentation de nouvelles techniques de reconnaissance ont conduit E.D.F. à mettre en œuvre une prospection d'électromagnétisme aéroporté dans diverses régions et notamment dans la plaine de la Saône déjà reconnue par des méthodes classiques.

Les auteurs décrivent les résultats obtenus par les méthodes traditionnelles et les comparent à ceux fournis par la prospection électromagnétique aéroportée qui s'est avérée parfaitement adaptée à la résolution de ce type de problème.

Summary

E.D.F. has been studying and testing new techniques of geological surveying; among them, airborne EM has been carried out on several sites and namely along the Saône river valley, already surveyed by classical methods.

The authors describe the results obtained through traditional methods and compare them to those given by airborne EM, the latter having proved itself a perfectly adapted tool to resolve this type of geological problem.

1. Préambule

La région de la Tour-de-Vers entre Châlon-Sur-Saône et Sennecey a fait l'objet de reconnaissances détaillées par suite de la mise en évidence d'un chaînon calcaire sous un recouvrement alluvial de 15 à 30 m d'épaisseur. La réalisation d'une centaine de forages associée à une couverture électrique a permis de bien identifier le dôme calcaire.

Postérieurement (1982) et dans le cadre d'une étude méthodologique, une prospection électromagnétique aéroportée a été réalisée. La comparaison des résultats obtenus avec ceux fournis par les méthodes traditionnelles (forages, prospection électrique) permet de vérifier les apports de cette technique.

2. Conditions géologiques

La zone initialement étudiée se situe en bordure de Saône à l'Est du chaînon jurassique de Sennecey-le-Grand qui s'appuie à l'Ouest sur les formations cristallines bordant le fossé d'effondrement de la Grosne. Vers le Sud, les formations jurassiques qui constituent les Monts du Mâconnais sont entaillées par la dépression de Boyer, bordée vers l'Est par un chaînon parallèle N.-N.E. - S.-S.O. qui s'interrompt à la hauteur de Limone.

Ces formations jurassiques (calcaires et parfois marno-calcaires) s'ennoient plus ou moins brutalement sous les formations tertiaires et quarternaires de la Bresse châlonnaise.

3. Résultats obtenus par les moyens traditionnels

La zone étudiée se situe entre Gigny et la Tour-de-Vers. Après un premier maillage très lâche de forages carottés, il a été décidé de reconnaître plus en détail le secteur de la Tour-de-Vers, où le Jurassique avait été rencontré à une profondeur raisonnable laissant présager la poursuite du chaînon de Tournus.

Les reconnaissances ont associé mesures géophysiques et forages.

A. Résultats obtenus par les forages

Deux types de forages ont été utilisés:

- des forages carottés
- des forages destructifs avec enregistrement de diagraphies instantanées (vitesse d'avancement, pression sur l'outil...) et différées (gammagraphie).

Plus de 100 forages ont été réalisés avec une profondeur moyenne supérieure à 50 m (20 - 106,50 m).

Les terrains en présence peuvent être schématisés comme suit :

Limons de surface de 0 à 3 m	
Ouest	Est
Horizon de St Cosme	Alluvions récentes 8 ± 3 m
- argiles varvées pouvant dépasser 10 m	
- niveau sablo-graveleux de base (> 5 m).	

* Electricité de France - TEGG. Paris (France).

** Compagnie de Prospection Géologique Française - Rueil-Malmaison (France).

Ce niveau peut s'intégrer à la base des alluvions récentes.

Le mur de ces niveaux graveleux se situe à la cote 165 ± 5 . Ces formations reposent en général sur les "marnes de Bresse"; ce terme recouvre des formations lacustres très hétérogènes, marnes, argiles, silts et sables. On notera une tendance plus calcaire à l'Ouest (dépression de Boyer) et plus argileuse vers l'Est en direction de la dépression bressane.

Dôme calcaire

A l'aplomb du dôme calcaire, les "marnes de Bresse" sont peu épaisses et recouvrent un ancien massif calcaire se trouvant dans le prolongement du massif affleurant plus au Sud.

Ce massif calcaire est constitué par des couches attribuées à l'Oxfordien supérieur et au Kimméridgien. La stratigraphie de détail en est relativement complexe. Toutefois, sur le plan sédimentologique, ce sont essentiellement des calcaires lithographiques à entroques ou à oolithes.

Plusieurs failles sont connues dans les massifs affleurants; les corrélations stratigraphiques entre sondages confirment l'existence de plusieurs accidents au niveau du dôme. Un karst ancien, très développé, a été mis en évidence dans le massif par les sondages carottés.

La fig. 1 montre un plongement rapide vers l'Est (la cote 100 correspond à une profondeur de 80 m) et vers le Nord, ainsi qu'une pente plus douce vers l'Ouest et un raccordement progressif avec les affleurements du Sud.

B. Résultats obtenus par la prospection électrique

S'agissant, non seulement de mettre en évidence le dôme calcaire, mais encore de fournir une image des horizons sus-jacents, la prospection par sondages électriques a été utilisée.

Pour une surface de 10 km² environ, 130 sondages électriques ont été réalisés avec des longueurs d'émission pouvant atteindre 600 m.

Cadre de résistivités

Les différents horizons rencontrés sont caractérisés par les résistivités suivantes :

- couverture argilo-limoneuse : de 20 à 70 Ωm ,
- alluvions sablo-graveleuses récentes : de 80 à 200 Ωm ,
- St Cosme | - argiles varvées : de 15 à 30 Ωm ,
- niveau graveleux de base : de 60 à 120 Ωm ,
- Remplissage tertiaire :
 - à l'Est côté Saône : < 15 Ωm ,
 - à l'Ouest entre les 2 moles calcaires : entre 20 et 30 Ωm .
- Massif calcaire ennoyé.

Les valeurs les plus élevées sont rencontrées à l'Est (> 300 Ωm), alors qu'à l'Ouest, des marnes et marno-calcaires (Argovien) font baisser la résistivité au voisinage de 50 Ωm .

Représentation des résultats

Les résultats obtenus ont été traduits de deux façons :

- sous forme de coupes d'interprétation (voir fig. 2) qui permettent de visualiser les différents horizons et d'observer le "fond" de la cuvette de Boyer;
- sous forme de cartes d'isorésistivité. La fig. 3 correspond aux valeurs mesurées pour $AB/2 = 200$ m; elle est la plus représentative de la morphologie du toit du calcaire. On notera cependant que les niveaux graveleux de surface peuvent avoir une influence qui perturbe celle du calcaire. Ce phénomène est manifeste au Nord-Ouest de la Tour-de-Vers.

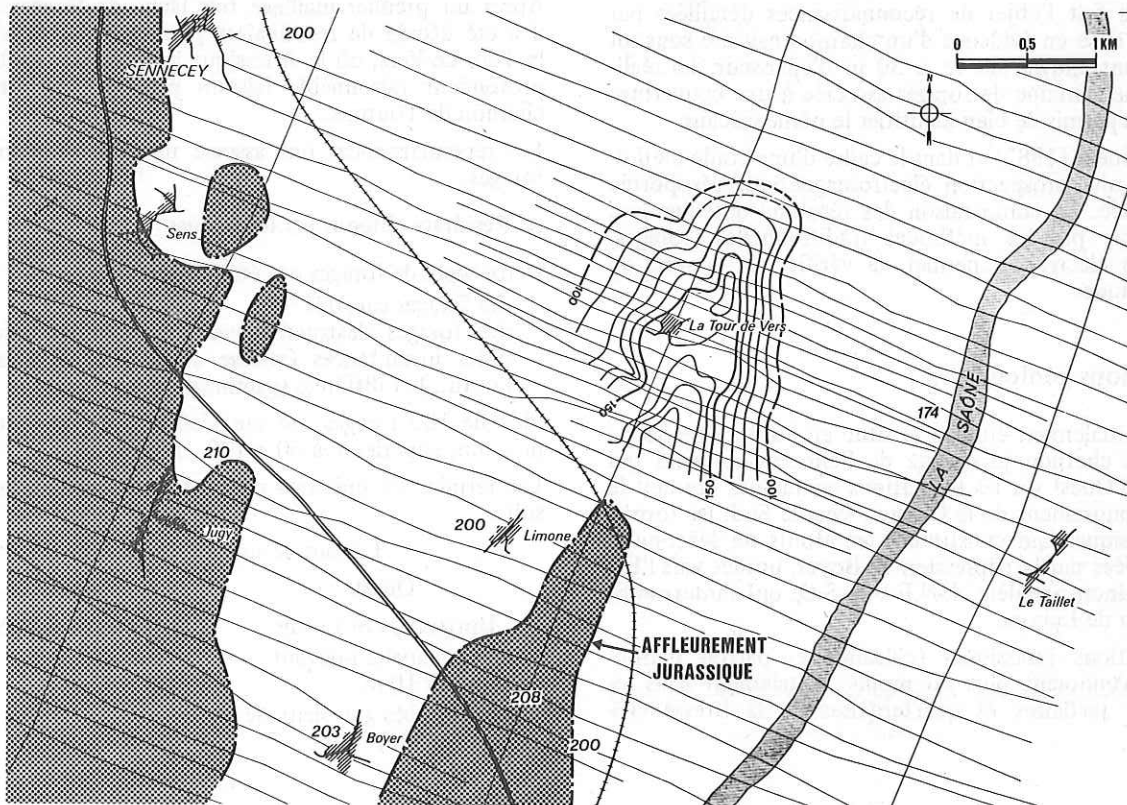


Fig. 1: Toit du substratum calcaire

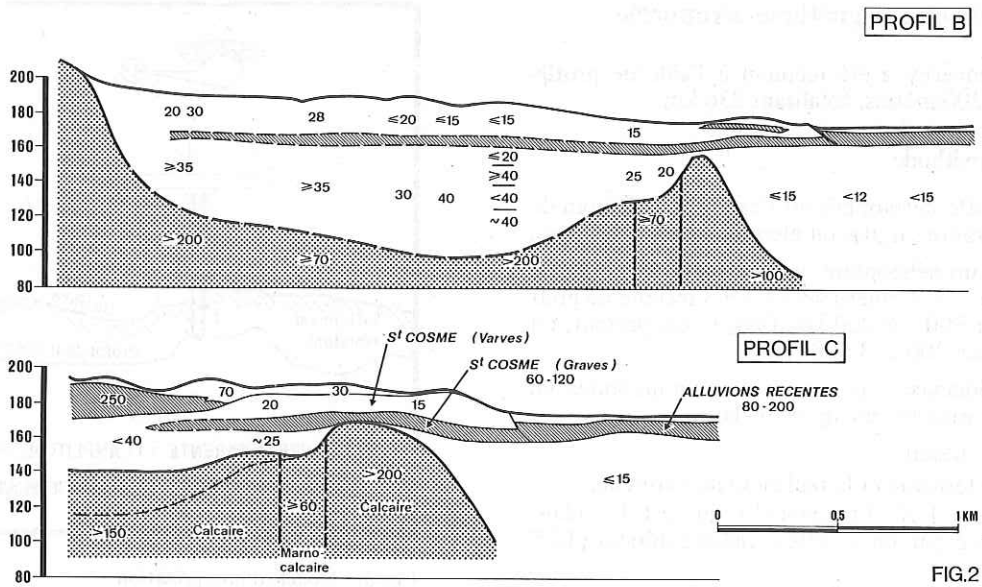


FIG.2

Fig. 2: Coupes d'interprétation électrique

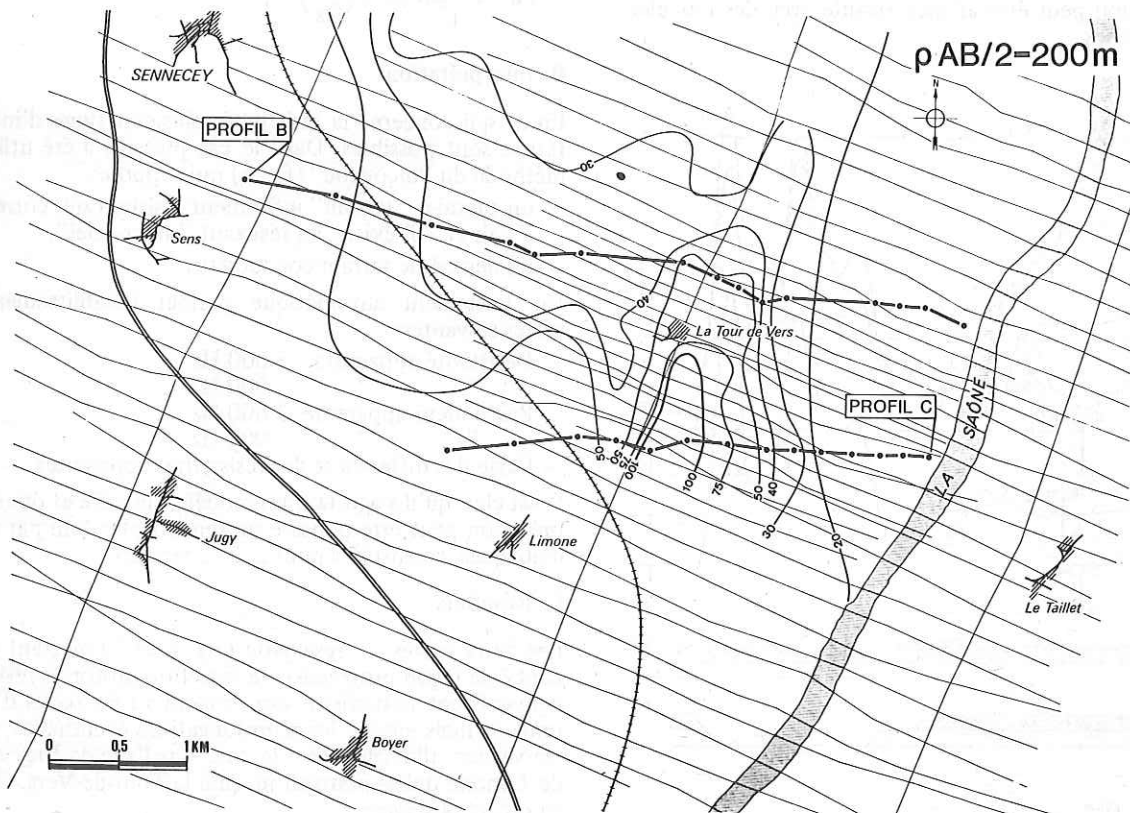


Fig. 3: Carte d'isorésistivité pour $AB/2 = 200\text{ m}$

3. Prospection électromagnétique aéroportée

Le secteur de Sennecey a été reconnu à l'aide de profils espacés de 100 à 200 mètres, totalisant 236 km.

A. Principe de la méthode

Cette méthode a été développée au Canada sous le nom de DIGHEM II, "Airborne multicoil electromagnetic system".

On suspend sous un hélicoptère, un oiseau de 10 mètres de long, comprenant 2 à 3 émetteurs et 2 à 3 récepteurs pour les fréquences de 900 - 8 000 Hz. Dans le cas présent, on utilise 2 fréquences, 900 et 3 600 Hz.

Pour chaque fréquence, on mesure les composantes en phase et en quadrature du champ secondaire.

Parallèlement, on mesure :

- le magnétisme terrestre et la radioactivité naturelle,
- le VLF ("Very Low Frequency") qui est le champ magnétique créé par un émetteur radio extérieur (15 à 25 KHz).

Le positionnement est assuré par un altimètre radar et par une caméra à enregistrement continu. L'enregistrement est à la fois analogique et digital. Les données sont traitées sur ordinateur. Sur l'enregistrement de la fig. 4 sont représentés en haut, les enregistrements bruts, et notamment les composantes en phase et quadrature du 3 600 Hz, ainsi que celles du 900 Hz. En bas de la figure est représentée une première interprétation en résistivités apparentes pour chacune des 2 fréquences. On établit ensuite automatiquement des cartes de résistivités pour chaque fréquence. L'interprétation peut être affinée ensuite avec des modèles à 2 ou 3 couches.

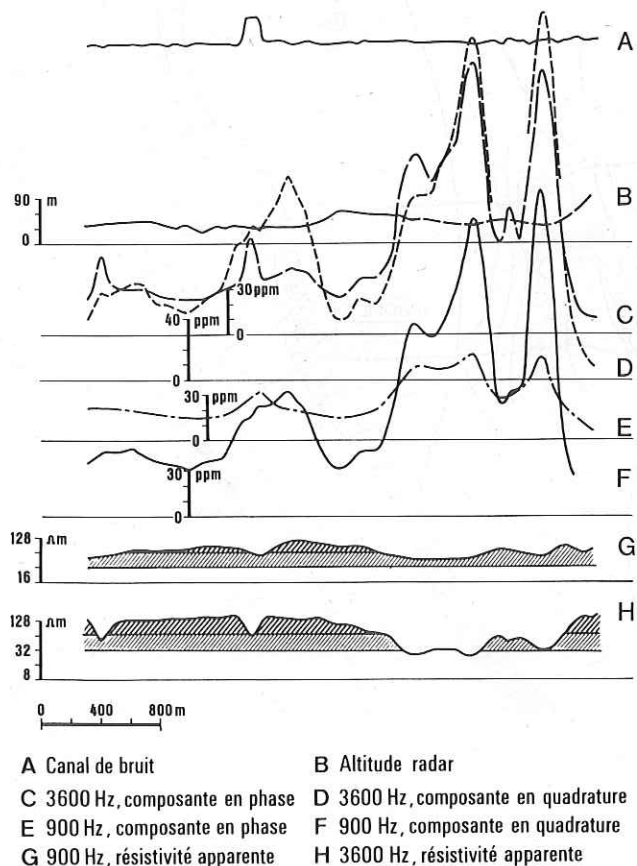


Fig. 4: Enregistrement d'électromagnétisme aéroporté

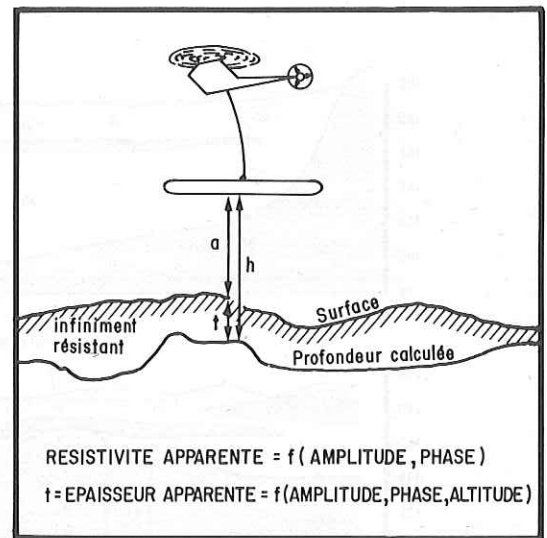


Fig. 5: Modèle d'interprétation

La résistivité apparente mesurée est fonction :

- de l'altitude de vol Z ,
- de la fréquence F ,
- de la distance entre émetteur-récepteur,
- du rapport $\frac{H_p}{H_s}$ Champ primaire / Champ secondaire

$$P_a = f \left[Z, F, R^2, \left(\frac{H_p}{H_s} \right)^2 \right]$$

B. Interprétation

En ce qui concerne la résistivité, plusieurs types d'interprétation sont possibles. Dans le cas présent, a été utilisée la méthode du "bicouche" (fig. 5) qui suppose :

- un premier "terrain" infiniment résistant qui correspond à l'air et, s'il existe, au résistant "superciel",
- un deuxième terrain conducteur.

Un traitement automatique permet l'établissement des cartes suivantes :

- Résistivité apparente 3 600 Hz
- " " " 900 Hz
- Profondeur apparente 3 600 Hz
- " " " 900 Hz
- Carte des différences des résistivités apparentes.

Il est clair qu'il s'agit là d'un modèle simplifié et que l'interprétation peut être poussée nettement plus loin par le biais d'abaques, construites pour 2, 3 ... terrains.

C. Résultats

Les deux cartes de résistivité (fig. 6 et 7) mettent en évidence de façon progressive, la structure profonde résistante. Apparaissent nettement, non seulement les zones d'affleurement, mais encore leurs prolongations éventuelles, sous la couverture alluviale. C'est le cas pour l'axe de Jugy et celui de Limone qui se poursuit jusqu'à la Tour-de-Vers. On peut en outre, observer :

- un substratum moyennement profond au droit de la dépression de Boyer (cf. fig. 7),
- un ennoisement très rapide côté Saône, sauf vers le Sud, là où la plaine alluviale se rétrécit.

Les cartes de profondeur apparente permettent de faire la distinction entre les zones où la succession est résistant/

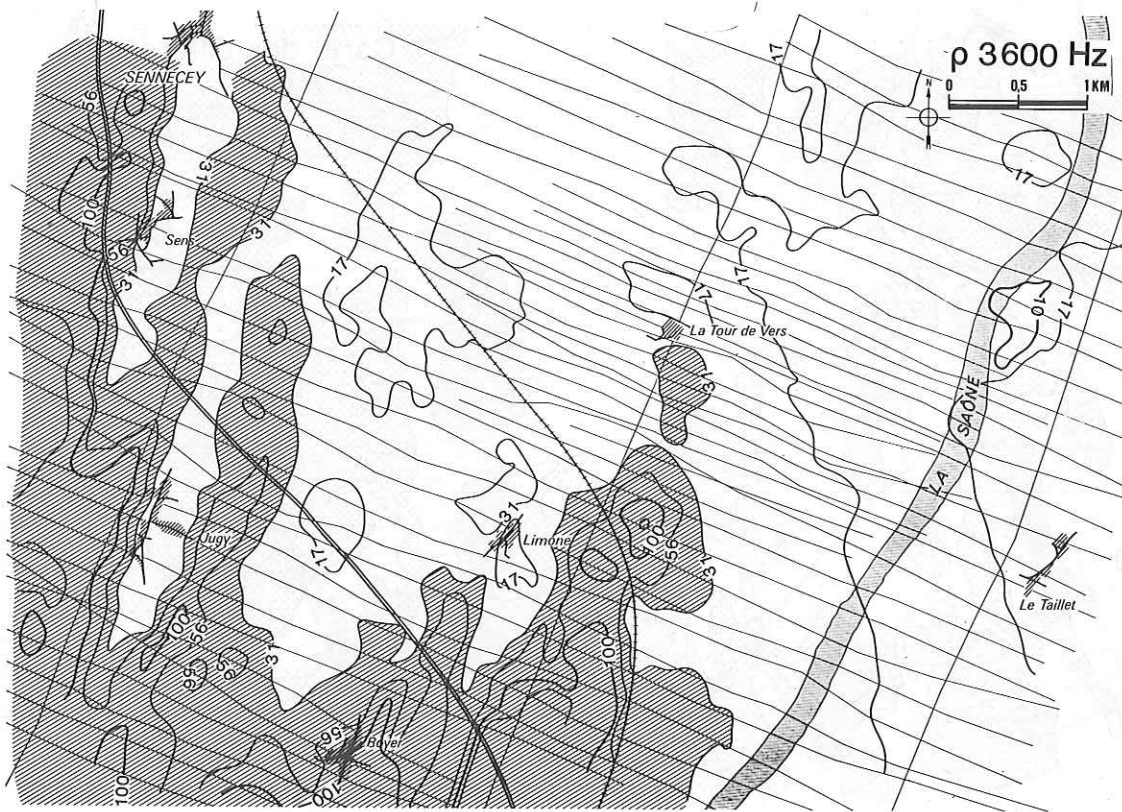


Fig. 6: Carte d'isoresistivité pour 3 600 Hz

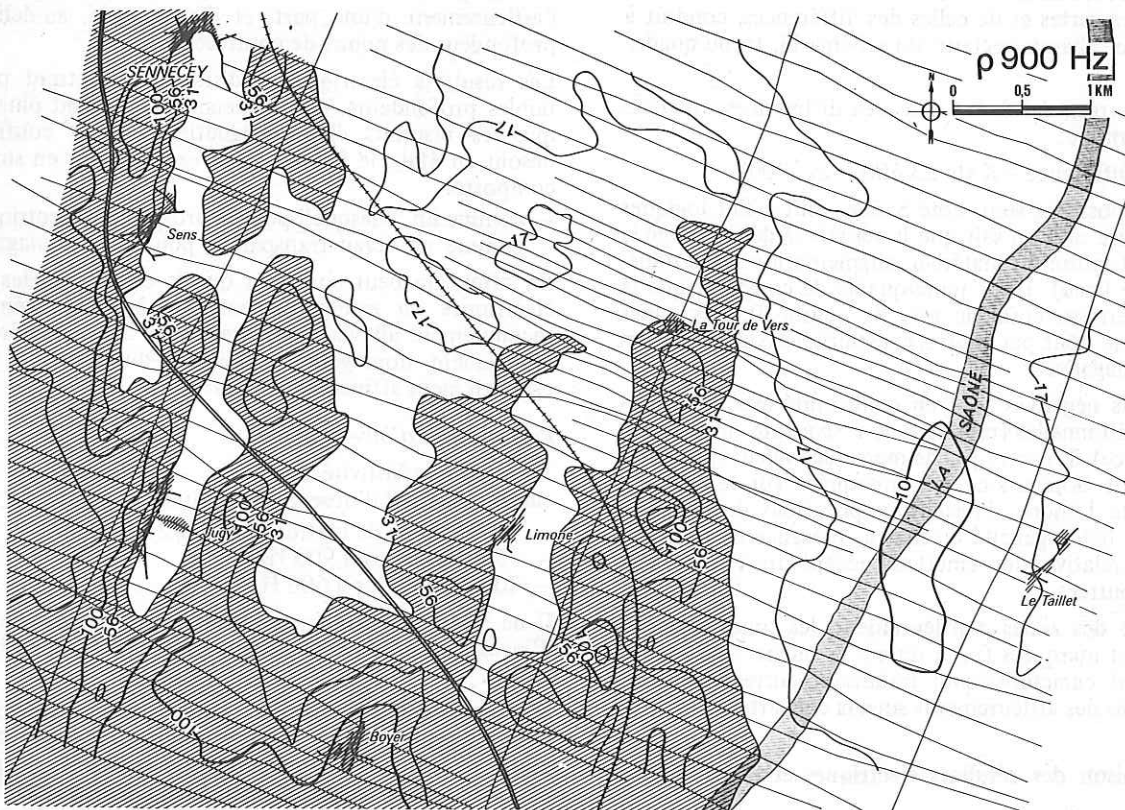


Fig. 7: Carte d'isoresistivité pour 900 Hz

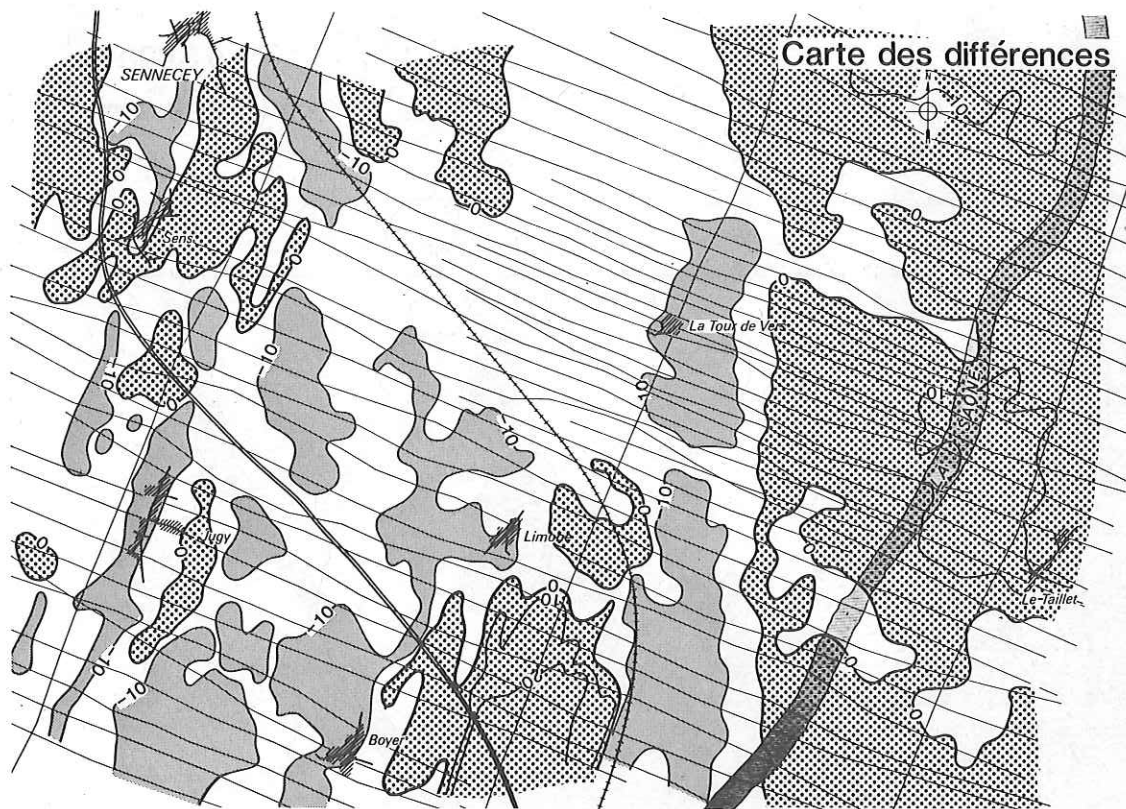


Fig. 8: Carte des différences

conducteur et les zones où l'inverse est observé. La combinaison de ces cartes et de celles des différences, conduit à proposer pour chaque secteur, un schéma bi, tri ou quadricouches.

La fig. 8 correspond à la carte des différences calculées suivant la formule:

$$\text{Différence} = K (\ln \rho_{3600} - \ln \rho_{900})$$

Les valeurs positives sont, côté Saône, tout à fait logiques dans la mesure où l'on sait que la résistivité décroît avec la profondeur (nature du matériau, augmentation de la minéralisation de l'eau). Il est remarquable de constater que la limite de terrasse coïncide avec la courbe 0. Les zones d'affleurement sont par contre, caractérisées par des valeurs positives et négatives.

Si les valeurs négatives sont en conformité avec les observations traditionnelles (présence de couverture ou d'altération de surface), il n'en va pas de même des valeurs positives. Celles-ci sont notamment très marquées sur le chaînon affleurant de Limone. Plusieurs explications doivent être envisagées : hétérogénéité du massif, présence de la nappe, disposition relative des émetteurs-récepteurs et des anomalies rencontrées.

A proximité des zones d'affleurement, les zones négatives suffisamment marquées (on a retenu la valeur -10 comme suffisamment caractéristique) traduisent correctement les prolongations des affleurements sous la couverture.

D. Comparaison des résultats électriques et électromagnétiques

Une relation a été établie entre la résistivité apparente et la profondeur du toit du môle calcaire; obtenue à partir

des forages de contrôle, elle a été extrapolée au droit de l'affleurement d'une part, et d'autre part, au-delà de la profondeur des points de contrôle.

Les résultats électriques traditionnels montrent pour les faibles profondeurs, une dispersion nettement plus grande que les résultats électromagnétiques. Cela confirme, si besoin en était, le fait qu'un niveau résistant en surface se comporte:

- comme un "masque" pour la prospection électrique
- comme un écran transparent pour l'électromagnétisme.

En effet, on peut constater que la dispersion des valeurs électriques est essentiellement due à l'hétérogénéité du recouvrement alluvial sablo-graveleux; dans un cadre d'alluvionnement homogène, à l'aplomb du dôme, la relation est nettement affinée (cf. fig. 9).

Profondeur "d'investigation"

La relation résistivité apparente - profondeur du toit du calcaire, permet d'observer le chaînon jusqu'à:

- une centaine de mètres pour $AB/2 = 200$ m
- 75 à 100 m pour 900 Hz
- 30 à 50 m pour 3 600 Hz.

Il ne s'agit pas là à proprement parler, d'une profondeur d'investigation, dans la mesure où il n'y a pas eu interprétation.

S'il est possible d'affirmer que le sondage électrique ne saurait permettre une interprétation au-delà de la valeur limite de $AB/2$ (les auteurs retiennent $AB/4$, ce qui est à peu près vérifié dans le cas présent), il n'en va pas de même pour l'électromagnétisme quand l'on associe phase et quadrature pour deux fréquences différentes. Dans le cas présent, les paramètres fournis par les deux fréquences

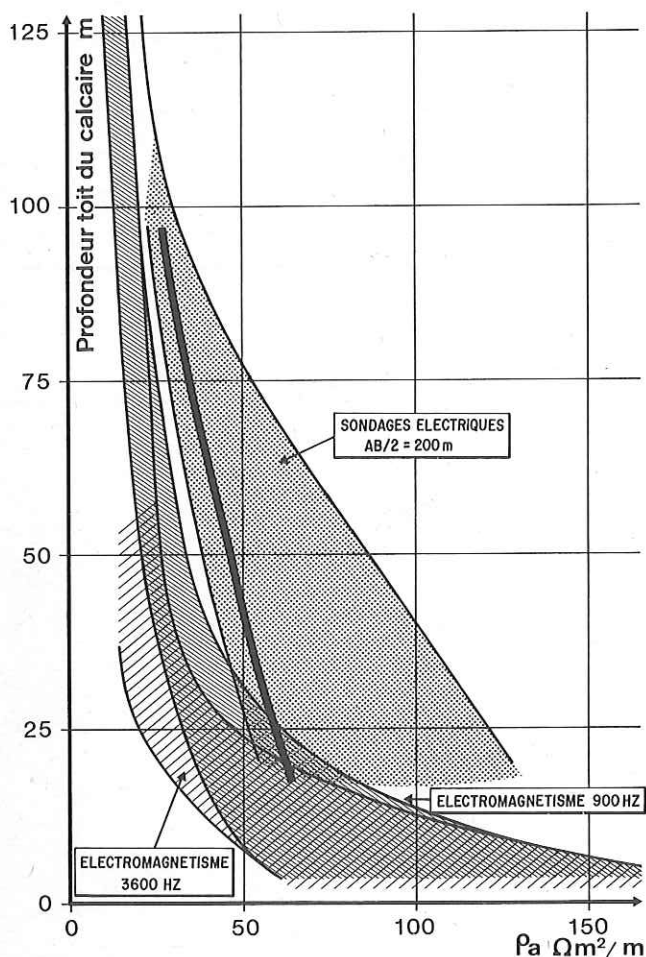


Fig. 9: Relation résistivité-toît du calcaire

permettent d'identifier la présence d'un niveau résistant jusqu'à 80 - 100 m au moins.

4. Conclusions

L'expérimentation menée dans la région de Sennecey-le-Grand montre bien que si la méthode électrique traditionnelle fournit des résultats tout-à-fait satisfaisants, ceux fournis par l'électromagnétisme le sont tout autant, sinon plus, dans la mesure où cette méthode permet pour les basses fréquences, de s'affranchir des anomalies superficielles.

L'exemple cité met en évidence que dans un milieu hétérogène relativement résistant en surface (dans la tranche 10-20 m) et conducteur ensuite (moins de 20 Ωm), la profondeur d'investigation est satisfaisante (de l'ordre de 80 à 100 m). On rappellera que cette méthode présente les avantages suivants:

- rapidité
- continuité
- absence de contact avec le sol.

On peut réaliser au plus bas prix, un véritable balayage continu de sites étendus. Il est clair que la méthode électromagnétique doit encore progresser tant au niveau de l'instrumentation que de l'interprétation. Depuis la prospection réalisée, le nouveau système DIGHEM III propose 3 fréquences au choix parmi 380, 900, 3 600, 7 200 et bientôt 50 000 Hz. Ses possibilités doivent lui permettre de supplanter la prospection électrique traditionnelle dans certains cas.

Références

- Groupe de Travail du Comité des Grands Barrages (1982): Nouvelles techniques de Reconnaissance, 14ème Congrès des Grands Barrages, Rio de Janeiro. Question 53, Rapport 57.
- FRASER D.C. (1978): Resistivity mapping with an airborne multi-coil electromagnetic system. Geotechnics, vol. 43, p. 144-172.