

Reconnaissance de cavités dans le sous-sol par procédés électriques et gravimétriques

par Jacques Lakshmanan

Directeur Géologique de la Compagnie de Prospection Géophysique Française (C.P.G.F.) Paris

English Synopsis see page 14, Deutscher Abriss Seite 15

P 202

Résumé

Dans cette note sont tout d'abord rappelés les principes théoriques des méthodes électriques et gravimétriques, en exposant notamment le calcul déterminant l'anomalie provoquée par des formes géométriques simples, telles que des sphères, de densité nulle ou contrastant assez fortement avec le milieu ambiant.

Sont ensuite exposées les méthodes de travail sur le terrain, surtout pour la prospection gravimétrique, les méthodes électriques étant maintenant largement diffusées. Sont notamment exposées les diverses corrections permettant de calculer l'anomalie de Bouguer.

On a ensuite considéré trois exemples d'application, l'un à Saumur où, par méthodes électriques, on a pu mettre en évidence des caves partiellement remblayées sous les fondations d'un hospice de 6 étages. Le deuxième cas concerne une prospection effectuée pour la ville de Caen où l'on avait à déterminer, par méthodes électriques et gravimétriques l'extension de carrières souterraines creusées dans le calcaire ainsi que la position des descenderies actuellement bouchées.

Enfin, le troisième exemple évoque un essai récent réalisé sur le tracé de l'autoroute Paris-Lyon, dans le département de l'Yonne. Cet essai a porté sur des cavités naturelles d'origine karstique existant dans la craie. Les résultats étant positifs, la prospection doit s'étendre considérablement.

Enfin, en conclusion sont exposés les intérêts respectifs des méthodes électriques et gravimétriques appliquées à la recherche de cavités souterraines.

Rappel des principes théoriques

La répartition du potentiel électrique a fait l'objet de nombreux calculs qui concernent essentiellement des couches horizontales de terrain, infiniment étendues [1]. L'étude de l'anomalie due à une sphère infiniment résistante n'a pas, à notre connaissance, attiré de chercheur à ce jour.

Toutefois, dans le cadre d'études confiées à la Compagnie de Prospection Géophysique Française, nous avons pu compléter partiellement cette lacune par des essais sur modèle réduit. Ces résultats expérimentaux confirment l'allure de la répartition du potentiel que l'on peut déterminer approximativement, par procédés graphiques.

L'application de la gravimétrie à la recherche de cavités

souterraines est par contre susceptible d'une analyse quantitative plus poussée.

La forme géométrique la plus simple est la sphère. En effet, on démontre que son influence est la même que celle d'une masse équivalente concentrée en son centre. On peut alors facilement calculer l'anomalie gravimétrique provoquée par une sphère en un point quelconque de l'espace alors que, pour d'autres formes géométriques, cylindre à axe vertical par exemple, le calcul n'est aisé que dans l'axe de symétrie de l'anomalie.

C'est ainsi que la composante verticale Hz du champ gravimétrique créé par une sphère est donnée par

$$Hz = f \sigma \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{h}{(x^2 + h^2)^{3/2}} \text{ en C.G.S.}$$

Hz est exprimé en gals ou cm/sec./sec.

f est la constante gravimétrique, $f = 2/3 \times 10^{-7}$, σ est le contraste de densité entre la sphère et le matériau encaissant et x, h et R sont les longueurs représentées sur la Fig. 1, M étant le point de mesure.

[1] S. Stefanescu et C. et M. Schlumberger : « Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain à couches horizontales homogènes et isotropes », Journal de Physique, avril 1930.

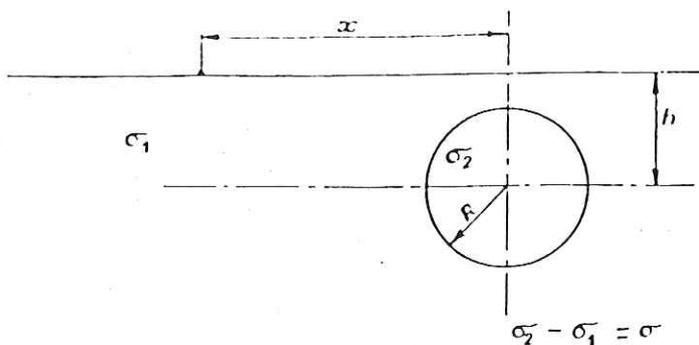


Fig. 1

En unités pratiques (x, h, R en mètres, H_z en milligals), et pour un contraste de densité $\sigma = 2$, on a

$$H_z = 5,56 \times 10^{-7} \frac{R^3 h}{(x^2 + h^2)^{3/2}}$$

Pour un gravimètre donné, on connaît la valeur minimum de H_z que l'on peut mesurer. Partant, et en fixant par exemple h et x , on peut alors, *a priori*, calculer le rayon minimum d'une sphère pour qu'elle puisse être décelée.

En utilisant des artifices de calculs par empilements de sphères, on peut de même calculer les dimensions limites de n'importe quelle forme de cavité.

On peut également, pour certains cas, chercher la solution de l'intégrale.

$$H_z = \frac{2}{3} \times 10^{-7} \iiint \frac{(Z - Z_0) \sigma(x, y, z) dx dy dz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}$$

Processus de travail

Nous n'insisterons pas sur la pratique des trainés électriques ou des sondages électriques à l'aide des quadripôles Schlumberger ou Wenner, dont l'utilisation se généralise chaque jour. Signalons cependant que nous avons parfois utilisé un dispositif spécial [2] à trois électrodes fixes qui, dans certains cas, permet de localiser plus facilement les anomalies.

Quel que soit le dispositif utilisé, nous considérons comme indispensable de régler les pas et écartements d'électrodes en fonction des conditions géologiques et géométriques de chaque cas. Il faut peut-être insister ici sur le danger que représentent des schémas de travail trop systématiques, que l'on voit pratiquer malheureusement trop souvent.

[2] Brevet français n° 1 202 358, du 14 avril 1958.

En gravimétrie par contre, le processus a été universellement mis au point par des années de prospection pétrolière. Seul le pas ou la maille diffère pour chaque problème. Lors des prospections pétrolières profondes, le pas varie entre 100 m et 1 km ; ici, pour des prospections pelliculaires telles que les recherches de cavités, le pas sera de 2, 3, 5 ou 10 mètres.

La mesure effectuée au gravimètre Worden par exemple est en réalité une mesure dynamométrique comparative : une masse est suspendue par un ressort extrêmement sensible ; on en mesure les variations d'élongation par rapport à une station de référence. Afin d'obtenir des lectures au centième de milligal (soit 1 pour 100 000 000), il est nécessaire d'avoir une constance de température et de pression très grande. Elle est obtenue grâce à un dispositif thermostatique et par une enveloppe hermétique.

Compte tenu de la constante de l'appareil et des corrections de dérive, la mesure donne la valeur brute de Δg . On doit ensuite effectuer les corrections d'altitude : $\Delta g_1 = (0,3086 - 0,0419 \sigma_1) \Delta Z$, de latitude (φ) :

$g = 978,046 (1 + 0,005296 \sin^2 \varphi - 0,000007 \sin^2 2\varphi)$ et de « terrain ». Ces dernières concernent l'influence des masses latérales ; elles sont en général négligeables en plaine.

Si la correction de latitude est à gradient faible et régulier pour des études localisées, la correction d'altitude est capitale. En effet, pour une densité moyenne $\sigma_1 = 2$, on a :

Δg_1 milligals = 0,2248 ΔZ mètres.

Pour $\Delta g < 1/100$ milligal, il faut donc une erreur d'altitude $\Delta Z < 0,22$ cm. Il faut donc que l'altitude de chaque point soit connue à 5 cm près.

Après ces diverses corrections, on obtient la valeur dite de « Bouguer ». Ce sont les anomalies négatives locales de cette valeur qui sont provoquées par les cavités souterraines. Compte tenu de certaines hypothèses préalables, car l'interprétation quantitative n'est pas univoque, on peut alors déterminer la position ainsi que la profondeur et les dimensions d'une telle cavité.

Exemples d'application

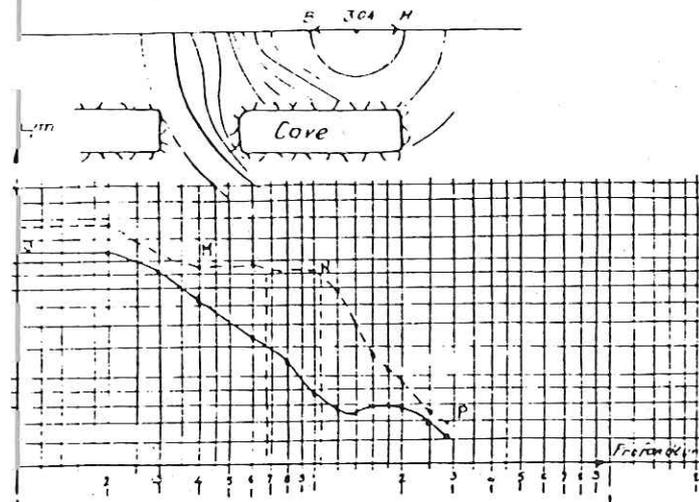
Ville de Saumur

Il s'agissait là de l'étude des fondations d'un hospice de six étages. On désirait s'assurer qu'il n'existait pas à moins de 8 m de profondeur d'anciennes caves du genre de celles connues en bordure de la Loire et qui auraient été par la suite murées ou isolées par des éboulements.

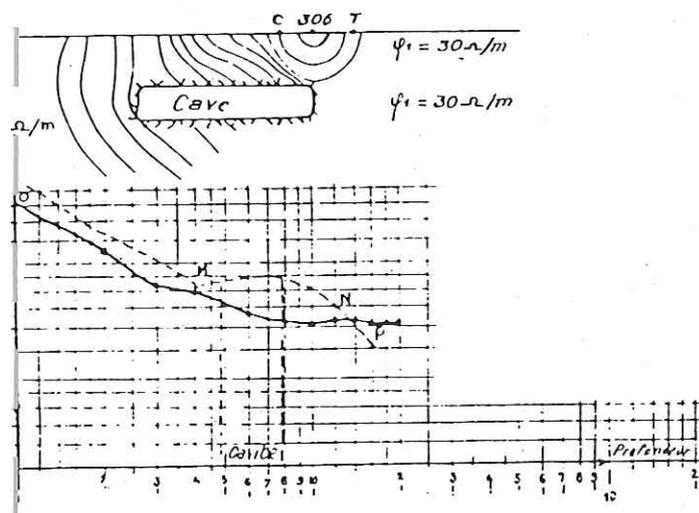
reconnaissance par procédés électriques (méthode à électrodes fixes), a compris tout d'abord l'étalonnage sur des caves existantes. Ces étalonnages ont montré l'importance et la forme de la déformation du champ électrique dû à un milieu fini considéré comme infiniment résistant (voir Fig. 2).

En dehors de l'étude des terrains superficiels constituant la couverture du « tuffeau », la prospection a mis en évidence quatre anomalies. Ces anomalies n'étaient pas aussi caractéristiques que dans le cas de véritables caves. Les fouilles entreprises ont montré qu'il s'agissait de caves comblées.

Sondage 304



Sondage 306



- ▲ Zone normale
- ∇ Augmentation de la densité du courant (la résistivité décroît)
- Diminution de la densité du courant (la résistivité décroît)
- La bosse MN est une perturbation due à la présence d'une cavité à résistivité infinie

Fig. 2

Ville de Caen

Le problème qui avait été posé par les Services Techniques de la Ville de Caen était de deux ordres :
1. Détermination de la situation de caves souterraines, dont on connaissait seulement une partie et qu'il était indispensable de connaître en totalité en vue de la création de zones à urbaniser ou d'autoroutes à gros trafic ;

2. Localisation des « descenderies » qui servaient à l'évacuation des matériaux lors de l'exploitation de la carrière.

Ces descenderies ont été en effet bouchées par les carriers et recouvertes depuis par une mince couche de terre végétale (de l'ordre de 1 m). Ces points très localisés peuvent être extrêmement dangereux et l'on cite certains accidents dus à l'effondrement sous une charge de la fermeture de ces descenderies.

La première reconnaissance (recherche de l'extension et de la position des caves), a été réalisée par trainés électriques après quelques étalonnages de sondages électriques en des points caractéristiques.

D'autre part, un autre type d'essais électriques a été réalisé. Dans cette zone fort limitée et pour laquelle nous possédions un plan très détaillé de la cave sous-jacente, avec deux descenderies dont un puits visible de l'extérieur, nous avons exécuté une carte d'équipotentiels, espérant ainsi mettre en lumière des anomalies dues à la présence d'un corps isolant à faible profondeur.

Malgré une maille de mesures très serrée, quadrillage de 5 m x 5 m en certaines zones, les résultats obtenus ont été négatifs. Aussi, cette recherche de descenderies a-t-elle été traitée, quelques mois plus tard, par méthode gravimétrique.

Cette-ci a essentiellement consisté à la mise au net d'une carte d'anomalies de Bouguer sur la zone déjà étudiée par équipotentiels électriques (voir Fig. 3).

Un autre profil, reliant deux puits avec bretelles transversales, a également été exécuté pour tester la méthode. Les résultats de ces mesures se résument comme suit : La résistivité des calcaires, lorsqu'ils sont massifs, est de l'ordre de 120 à 150 Ω m. L'existence d'une cave au sein de ces calcaires correspond électriquement parlant, à une anomalie infiniment résistante au sein d'un matériau relativement conducteur. La résistivité apparente mesurée doit donc se trouver augmentée.

En traçant la courbe d'équirésistivité 180 Ω m, on a pu retrouver avec une très bonne approximation le contour des caves donné par relevé topographique. On retrouve même le merlon rocheux qui se trouve à l'extrémité sud-est de l'étude.

Par contre, la limite nord des caves donnée par les plans fournis ne semblait pas correspondre à la véritable limite des caves. En effet, les résistivités restent toujours

très élevées jusqu'aux abords de la R.N. n° 9. On a ainsi détecté une zone de caves inconnues à ce jour. La limite sud-ouest par contre semble être exacte. Par gravimétrie, nous avons repris la même zone d'étude que celle que nous avons utilisée pour établir la carte d'équipotentielle. C'est un quadrillage de 5 m x 5 m qui a été utilisé. On peut voir sur cette carte, où nous avons reporté les limites des caves ainsi que la présence des piliers et descenderies connus, que ces zones moins « lourdes » correspondent effectivement à la position des descenderies. Les anomalies sont déterminées avec un contraste d'environ 15/100 de milligals par rapport à la zone des calcaires massifs. On note également que la limite des caves correspond à un gradient gravimétrique important (resserrement des courbes).

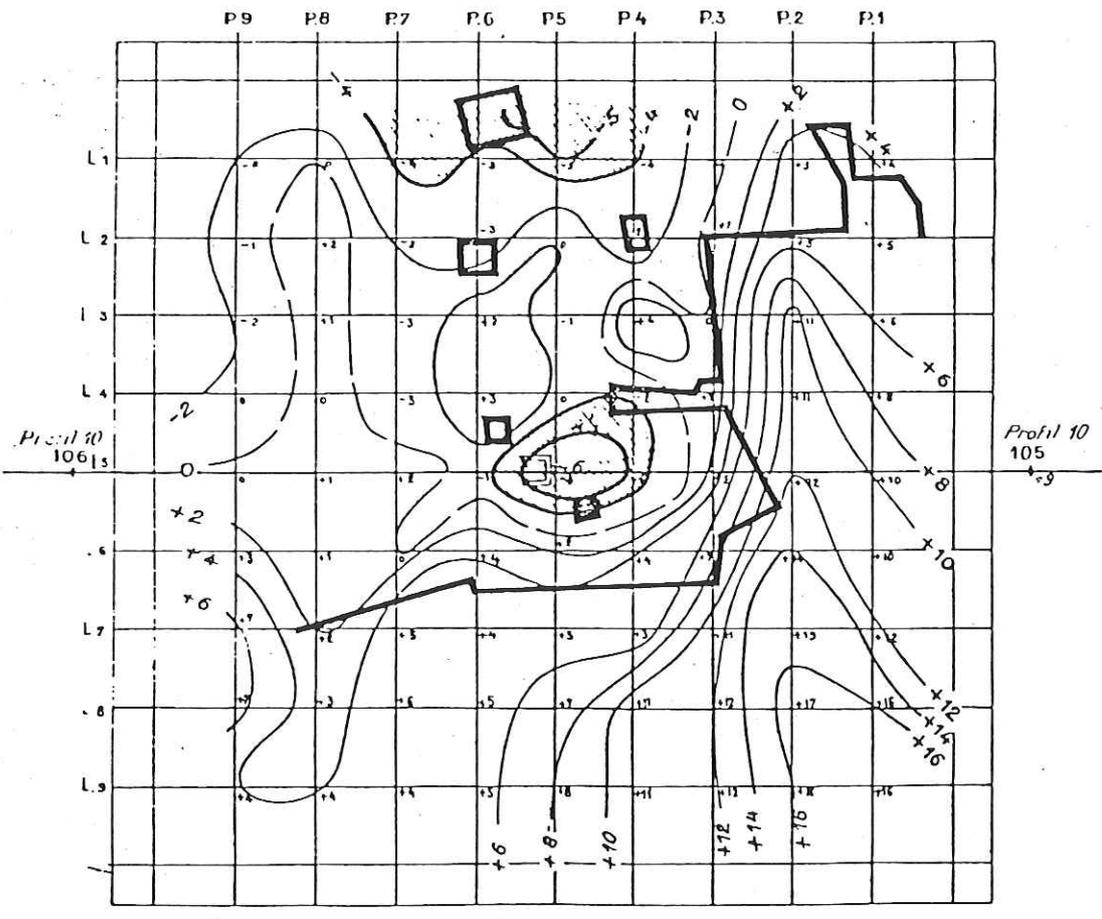
Autoroute Paris-Lyon, département de l'Yonne

Dans de nombreux tronçons situés dans la craie, la présence de dolines ou de bétoires en surface laisse supposer l'existence de cavernes souterraines liées à une ancienne circulation karstique.

Un essai par gravimétrie a été effectué afin de vérifier la précision de la méthode et de l'étalonner sur des cavernes visibles. La statistique des points repris a montré que l'erreur moyenne quadratique était de 0,035 milligals ce qui, grâce au resserrement des points, rend indubitables des anomalies de 0,07 milligals.

A la suite de cet essai favorable, une prospection systématique va être entreprise.

ZONE A



... Zones favorables.
 — Limite des caves et des piliers.

Echelle: 1/500

Fig. 3

Conclusion

Ces quelques exemples nous conduisent à penser que si la prospection électrique, peu onéreuse et rapide (1 km par jour environ), permet dans certains cas la détection de cavités souterraines, elle ne peut être appliquée à coup sûr. En effet, si les cavités sont remplies d'argile ou d'eau, le contraste de résistivité sera alors trop faible. De plus, une interprétation quantitative est difficilement réalisable. Il convient alors de compléter la reconnaissance par gravimétrie.

Si cette prospection est un peu plus onéreuse, (50 stations par jour), les anomalies négatives locales ne peuvent être dues qu'à des cavités souterraines ; un remblayage partiel diminuant simplement le contraste de densité.

Un profil, implanté parallèlement au chemin rural n° 2, a permis de rattacher cette zone d'étude très délicatée aux conditions locales environnantes. Nous avons sous ce profil réalisé un schéma d'interprétation (voir Fig. 3). L'anomalie « légère » de la zone A se retrouve sur ce profil.

Au point 113 une deuxième anomalie, moins marquée, doit correspondre à une deuxième descente ou encore à un effondrement du toit de la cave. La limite de la cave est nettement marquée aux environs du point 121 par une pente gravimétrique importante.

Les anomalies lourdes que l'on trouve dans la zone où la présence de caves est certaine correspondent vraisemblablement à l'existence de piliers ou de zones remblayées.

