

Gravity and gamma gamma mapping of sink-hole-areas in Lutetian gypsum, North East of Paris.

P 205

Cartographie micro-gravimétrique et radioactive des zones de dissolution du gypse du Lutétien au Nord-Est de Paris.

Microgravimetrische und radioaktive Kartierung von Auflösungs-zonen im Gips des Lutet im Nord-osten von Paris.

J. LAKSHMANAN; Directeur Technique de la Compagnie de Prospection Géophysique Française, Rueil-Malmaison (France).

Summary:

Following some spectacular sink holes, Lutetian gypsum lenses have been detected in the North-East of PARIS region. Gravity methods now regularly used for the location of sink hole areas. New computation techniques give directly average heights of underground voids. Drill holes are completed by in situ density measurements (gamma-gamma).

Résumé:

A la suite d'effondrements spectaculaires, l'existence de lentilles de gypse lutétien a été mis en évidence au Nord-Est de PARIS. La gravimétrie est maintenant régulièrement employée pour la délimitation des zones en voie de dissolution. Des méthodes nouvelles de calcul permettent la tracé direct de cartes de hauteurs de vide. L'étude des forages est complétée par des mesures radio-actives de densité in situ (gamma-gamma).

Zusammenfassung:

Nach spektakulären Erdfällen wurde im Nordosten von PARIS die Existenz von Gips-linsen des Lutet nachgewiesen. Die Gravimetrie wird jetzt regelmäßig eingesetzt, um Auflösungs-zonen abzugrenzen. Neue Rechenmethoden erlauben die direkte Zeichnung von Höhenkarten der Hohlräume. Die Bohrloch-untersuchungen werden durch radioaktive Dichtemessungen (gamma-gamma) in situ vervollständigt.

Historique

Dès 1962, la Compagnie de Prospection Géophysique Française a appliqué la méthode gravimétrique à la détection de cavités souterraines (3), qu'elles soient des carrières souterraines ou des cavités de dissolution.

A la suite de l'effondrement spectaculaire d'un pavillon à SEVRAN, en Décembre 1964, faisant suite à des accidents parfois anciens (1), la mairie de SEVRAN a commandé une prospection gravimétrique suivie d'une campagne de sondages (4). Il s'est avéré que le cause de ces effondrements était la dissolution de lentilles de gypse intercalées dans les "marnes et caillasses" du

Lutétien supérieur entre 35 et 50 m de profondeur. Ce gypse, peu connu jusqu'alors, est baigné par une importante nappe aquifère, contrairement au gypse exploité du Ludien (5), (6).

Il est probable que divers pompages d'eau, exploitant cette nappe, et extrayant une eau fortement chargée en sulfate, contribuent à activer la dissolution du gypse.

Méthodologie de reconnaissances

Dans un papier séparé présenté au même symposi-

um (7), Monsieur TOULEMONT expose les grandes lignes géologiques du problème de la reconnaissance du gypse lutétien, l'étude géologique par sondages mécaniques à maille kilométrique permettant de définir approximativement les zones susceptibles de présenter des risques.

A l'intérieur de ces zones, et pour ne considérer que le cas des communes d' AULNAY, DRANCY, SEVRAN et VILLEPINTE, les constructeurs entreprenant systématiquement outre l'étude des sols classique, une reconnaissance de vides profonds. Si l'on procède encore quelquefois par mailles de sondages mécaniques distinctifs, il est généralement admis qu'une prospection gravimétrique conjuguée avec quelques sondages mécaniques permet un coût d'intervention beaucoup plus réduit.

Ainsi, dans l'exemple de la figure 3 (5 tours et un bâtiment allongé sur 3 hectares, le coût de 20 sondages destructifs réalisés au droit des bâtiments seulement, aurait été de l'ordre de 80 000 FF, alors qu'une prospection gravimétrique jointe à 3 sondages distinctifs aurait coûté environ 30 000 F tout en couvrant tout le terrain à la maille moyenne de 12 m x 12 m (la couverture de tout le terrain en sondages mécaniques à la maille de 25 m x 25 m aurait coûté environ 200 000 F).

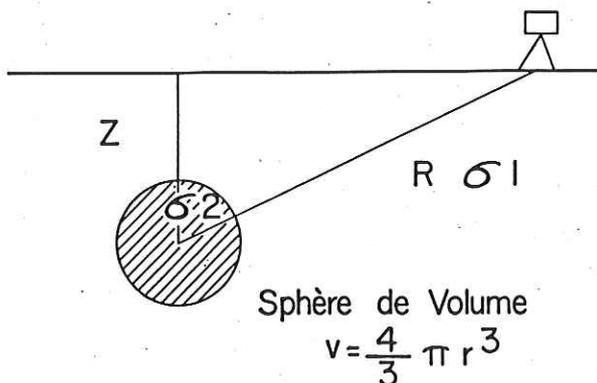
Interprétation gravimétrique, définition des zones dangereuses

La plus grosse cavité reconnue au Nord-Est de PARIS avait un volume de l'ordre de $V = 1000 \text{ m}^3$.

En l'assimilant à une sphère de masse $\Delta \sigma \cdot V$, la composante verticale de l'anomalie gravimétrique en centième de milligal est donné par:

$$\Delta g = \frac{2}{3} \frac{\Delta \sigma \cdot V \cdot 3}{Rz} \quad V \text{ en } \text{m}^3$$

$z \text{ et } R \text{ en } \text{m}$
 $\Delta \sigma \text{ en } \text{T/m}^3$



— Figure 1 — $\Delta \sigma = \sigma_1 - \sigma_2$

La valeur normale $\Delta g_0 = \frac{2}{3} \frac{\Delta \sigma \cdot V}{z^2}$

Pour $\Delta \sigma = 1,2$ (sphère remplie d'eau: $\sigma_2 = 1$ et $\sigma_1 = 2,2$) pour $z = 40 \text{ m}$ et pour $V = 1000 \text{ m}^3$

$$\Delta g_0 = 0,5 \text{ centième milligal}$$

ce qui est indétectable, même avec le gravimètre modèle D de Lacoste-Romberg. Ce vide individuel est localisé est donc indétectable à 40 m de profondeur. Or l'expérience (30 études pour le gypse lutétien) montre que les zones dangereuses donnent bien des anomalies significatives.

Ce qui est détecté, ce n'est donc pas la cavité isolée, mais la zone en état de dissolution, contenant une certaine fréquence de vides, de zones de gypse fracturé, éboulé avec pertes d'eau.

Ainsi, lors de l'étude réalisée après l'effondrement du pavillon, contrôlée par sondages (*), on avait estimé la cause d'une anomalie de 6 centièmes de milligal comme pouvant être un disque plat de 7 m de hauteur, de 160 m de diamètre ($V = 140 000 \text{ m}^3$) et présentant un contraste de densité de 0,4 ($\sigma_2 = 1,8$ au lieu de 2,2).

Au cours des 30 études réalisées depuis 1964 dans le gypse lutétien, nous avons ainsi pu établir un catalogue des anomalies dont quelques exemples sont représentés figure 2.

La courbe [A] (anomalie maximale de -6 centièmes de milligal) correspond à une zone proche de pavillon effondré.

La courbe [B] (-15 centièmes de milligal) correspond à un bâtiment ou un vide de 1000 m^3 a été injecté (hauteur 7 m).

La courbe [C] (-5 centièmes de milligal) correspond à une anomalie faible légèrement décalée par rapport à un bâtiment sous lequel n'apparaît que des déficits de densité superficiels.

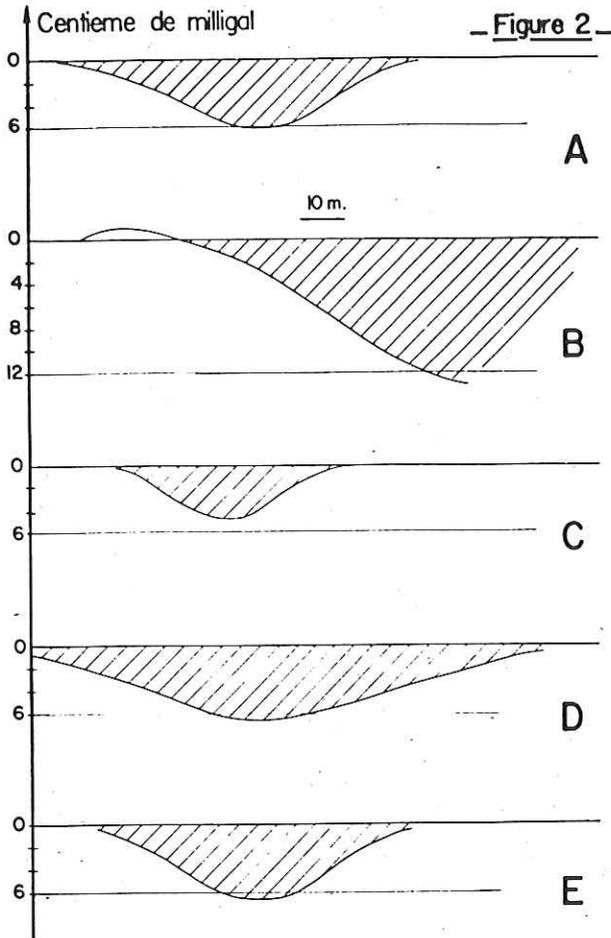
La courbe [D] (7 centièmes de milligal) représente une des anomalies profondes de la figure 3. La hauteur cumulée de vides est de 2 m.

La courbe [E] (-7 centièmes de milligal) représente une anomalie superficielle (surépaisseur des terrains quaternaires) qu'on pouvait confondre avec les anomalies semi-profondes recherchées.

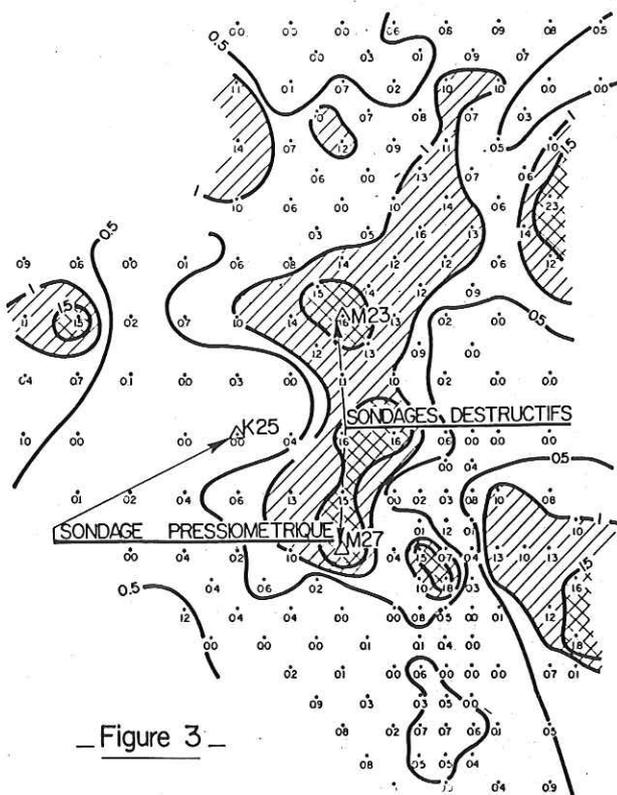
A propos de la courbe [E], nous évoquons ici, sans l'étudier, le problème du filtrage. En effet, l'anomalie de BOUGUER (valeur relative de l'attraction de la pesanteur, corrigée des effets topographiques et de latitude) est la somme algébrique des attractions des masses anomaliées diverses. L'anomalie "résiduelle"

(*) Il faut noter qu'en Février 1970, un fontis est apparu à l'épicentre d'une anomalie de densité détectée en Décembre 1964 (réf. 6).

que nous étudions ici doit être filtrée à la fois des causes profondes (anomalie "régionale" et des causes superficielles.

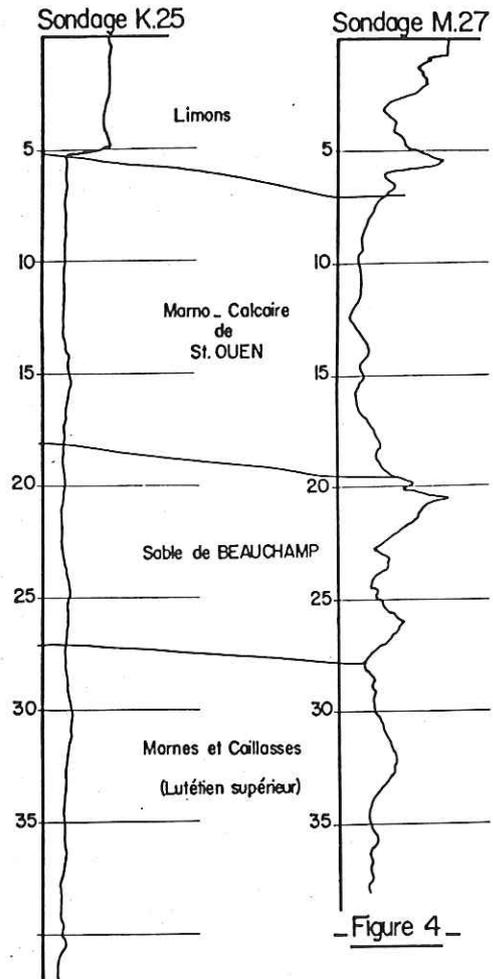


- Représentation d'Anomalies Types -



- Figure 3 -

- ENREGISTREMENTS GAMMA_GAMMA -



Le filtre employé, basé sur les différences de moyennes mobiles, fournit les résultats approximatifs(**) suivants, lorsqu'on se cale à 40 m:
 Causes situées à moins de 20 m: coupées à 70 %
 Causes situées à plus de 80 m: coupées à 70 %.

Interprétation gravimétrique quantitative

Compte tenu des limites d'efficacité du filtre, il est apparu souhaitable d'aller plus loin que l'interprétation quantitative suivant certains profils types et de la réaliser sur toute l'étendue de la prospection

Le procédé automatique, itératif, employé est dû à Monsieur La PORTE 2. En supposant, en première itération, que l'anomalie est due à une répartition de densités planes situées à la profondeur z, sera donné par:

(**) - Ces valeurs exactes sont, en réalité, fonction de la forme de l'anomalie.

$$\delta = \frac{3g(-z)}{4\pi} \quad (A1)$$

$$\delta = \sigma e \quad (\sigma \text{ est la densité volumétrique et } e \text{ l'épaisseur de la couche}) \quad (A2)$$

$g(-z)$ étant le champ prolongé vers le bas, on a:

$$g(-z) = g(+z) + 2g(0) + 2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{z^{2i}}{2i} \frac{\delta^{2i} g(0)}{\delta z^{2i}} \quad (A3)$$

Le champ prolongé vers le haut, $g(+z)$ est donné par:

$$g(+z) = \frac{z}{2\pi} \iint \frac{g(x,y,0)}{(x^2+y^2+z^2)^{3/2}} dx dy$$

Compte tenu, par ailleurs du caractère Laplacien du champ, il est possible aussi de calculer un filtre linéaire du type:

$$g(i,j,-z) = \sum_{i-k=-\infty}^{i-k=\infty} \sum_{j-l=-\infty}^{j-l=\infty} a(i-k,j-l) g(k,l,0) \quad (A4)$$

Ayant mesuré $g(k,l,0)$ aux noeuds d'une maille, on peut donc calculer en chaque point $g(i,j,-z)$, et grâce à (A1) calculer la densité plane.

Si l'on suppose que la densité réelle σ est constante, on pourra calculer e . Par exemple, dans l'hypothèse de vides remplis d'eau au sein d'une roche de densité 2,2, σ sera égal à 2,2-1=1,2 et e sera la hauteur de vides (***) Lorsque e est important par rapport à z , il est nécessaire de procéder par itération, c'est-à-dire:

- calculer e_1
- calculer le champ $g_1(0)$ dû à e_1
- retrancher ce champ du champ mesuré $g(0)$
- calculer Δe_1 dû à $\Delta g = g(0) - g_1(0)$

et ainsi de suite.

Exemple de calcul contrôlé par diagraphie gamma-gamma

La figure 3 représente une partie du résultat d'un tel calcul appliqué à des vides dans le gypse lutétien situés sous un ensemble immobilier important (nombreuses tours de 17 étages).

Le contrôle par sondages a été réalisé en deux temps. En premier lieu, les sondages ont été réalisés au droit des principales anomalies, permettant ainsi de modifier le plan masse par le déplacement de certaines tours.

En deuxième lieu, d'autres sondages ont été implantés au bord des bâtiments les plus proches des anomalies (par exemple K25).

(***) En prenant $e =$ constante, on pourra de même obtenir une carte de densités.

La comparaison des sondages K25 et M27, où ont été réalisées des mesures de densité in situ par procédé radioactif ("gamma-gamma") est très instructive. Au sondage M 27 situé au centre d'une anomalie (hauteur de vide calculée de 1,50 m) le vide principal, situé vers 40 m de profondeur, n'a pu être mesuré par suite d'un éboulement. Néanmoins, au-dessus, outre les limons de surface des zones de faible densité vers 21, 27 et 33 m.

Au sondage K25 situé à 35 m de distance horizontale du M27, seuls les 5 premiers mètres (limons) présentent des faibles densités. L'implantation de la tour était donc valable.

N.B.- Sur les mêmes forages, ont été réalisées des mesures de rayonnement gamma naturel, qui permettent très aisément de mettre en évidence les 3 niveaux gypseux (radioactivité nulle). Leur absence dans l'exemple cité montre que le phénomène de dissolution est ici arrivé à son terme, et seul peut intervenir le tassement progressif des couches.

Conclusions, remerciements

Dans les zones suspectes (où à leur voisinage immédiat) définies par l'étude géologique générale, la cartographie des vides de dissolution des gypses lutétiens au Nord-Est de PARIS est très fréquemment réalisé par prospection micro-gravimétrique. Sans permettre la localisation de chaque vide, la gravimétrie délimite les zones dangereuses. Les méthodes d'interprétation permettent de mieux quantifier les risques par le tracé de cartes de hauteurs moyennes de vides. Ce contrôle mécanique par sondages destructifs avec mesure de vitesses d'avancement, de rayonnement gamma naturel (recherche du gypse) et par mesures de densité in situ (gamma-gamma) permet de circonscrire les anomalies par rapport aux bâtiments projetés, dont la reconnaissance purement mécanique aurait un prix de revient très élevé, vu la profondeur des anomalies.

Nous devons remercier la S.A.E.S., les Municipalités d'AULNAY-sous-BOIS, DRANCY, SEVRAN et VILLEPINTE et les principaux promoteurs grâce à qui ces études ont été entreprises et cette synthèse rendue possible.

Bibliographie

- (5) M. ARNOULD et P. LE GUILLOU:
Sur les cavités souterraines de dissolution dans les marnes et caillasses de la région parisienne
- C.R. Acad. Sc. Paris, série D 265
(Déc. 1967), p. 1864-1866

- (1) G.F. DOLFUSS: Sur les effondrements de la plaine de SEVRAN. - C.R. Acad. Sc. Paris, 137 (1903), p. 279-281
- (3) J. LAKSHMANAN: Reconnaissance de cavités dans le sous-sol par procédés électriques et gravimétriques. - Sols-Soils, Paris tome 2 n° 4, Mars 1963
- (4) - et E. KUTKAN: Fontis de SEVRAN, Etude gravimétrique. - Assoc. Géol. Bassin Par., journées de Géol. Appl. (Paris 1966)
- (2) M. La PORTE: Calcul de la forme d'une structure homogène à partir de son champ gravimétrique. - Eur. Assoc. Expl. Géophys. 22 nd Meeting,

London, May 1962

- (8) M. ROSSI: Les problèmes de prospection et d'adaptation relatifs à la présence de gypse dans le Nord-Est de Paris, Hanovre Septembre 1973
- (7) M. TOULEMONT: Les problèmes de reconnaissance de zones gypseuses à urbaniser: cas Nord-Est de Paris, IAEG Symposium, Hanovre, Septembre 1973
- (6) - et J.C. CAILLEUX: Observations sur l'origine de certains effondrements au Nord-Est de Paris, - Bull. Liaison, P. et. Ch. Paris 59- Mai-Juin 1972

