



Etudes de fondation en terrain caverneux.

Place de la gravimétrie

J. LAKSHMANAN
Directeur général

M. BICHARA
J.-C. ERLING
Ingénieurs

Compagnie de
prospection géophysique française

RÉSUMÉ

La place d'une prospection géophysique dans une étude de fondation en terrain caverneux est d'abord examinée, en distinguant le cas des cavités étendues, ou très petites et nombreuses. La microgravimétrie est ensuite située comme étant la seule méthode donnant directement l'anomalie recherchée, c'est-à-dire le déficit de masse en tonnes. Le contrôle par sondages mécaniques n'est pas toujours d'une interprétation facile, aussi l'enregistrement continu de la vitesse d'avancement et de la percussion réfléchie est-il préconisé. Divers programmes de reconnaissance puis de confortement sont décrits, fonction de la nature de la construction et de celle des vides. Enfin divers exemples réels illustrent le propos.

MOTS CLÉS : 41 - *Fondation - Terrain - Cavité - Souterrain - Prospection - Gravimétrie (géophys) - Forage (processus) - Vitesse - Percussion - Méthode.*

QUELS VIDES RECHERCHER ?

Lorsque le constructeur d'un bâtiment, ou son maître d'œuvre, sont confrontés avec un problème de cavités souterraines, c'est bien souvent en cours de chantier. Le bureau, appelé en consultation, doit agir rapidement et économiquement.

Même, lorsque le risque est connu au tout début de l'opération, la prospection des vides et l'établissement de solutions de fondations nécessitent la recherche d'un optimum technico-financier entre les dépenses et les résultats à atteindre.

Dès lors, un programme de reconnaissance doit, après définition géologique des risques encourus, prendre en compte les facteurs suivants :

1. Cavités souterraines étendues

(Exemple : carrière de calcaire de Lille, Caen, Reims, dissolutions de gypse de la Seine-Saint-Denis).

L'étude devra être réalisée dans la mesure du possible avant l'établissement du plan masse.

Les méthodes proposées et leur maillage dépendront davantage des cavités que des constructions.

2. Cavités souterraines peu étendues

(Exemple : marnières de craie en Haute-Normandie — galeries gallo-romaines à Limoges — exploitations de calcaire grossier dans les Yvelines, de calcaire de Beauce dans l'Orléanais).

La prospection systématique de grandes surfaces est généralement prohibitive.

Le programme de prospection devra tenir compte des caractéristiques de la fondation, et en particulier :

— pour des constructions comprenant des voiles en sous-sol, une condition de fontis pourra être fixée a priori (puis éventuellement modifiée à la fin de l'étude),

— pour des constructions comportant des descentes de charge ponctuelles, le programme de prospection devra tenir compte de la position des poteaux.

Rappelons que la condition de fontis, c'est le diamètre d'un vide remonté jusqu'à la surface, que l'on doit faire franchir en poutre par une structure en béton armé, longrine ou voile.

Si l'on prend en considération une condition de fontis de 3 m par exemple (ce qui conduit à des longrines raisonnables dans le cas d'un faible taux de travail de 1 à 3 bars), il s'agira de détecter par une prospection appropriée des vides qui, après remontée à la surface, risqueront de provoquer un effondrement de 3 m de diamètre.

Si l'on veut aller dans le sens de la sécurité on devra détecter des vides ayant une projection verticale sur l'axe de la longrine de 3 m.

Cette marge de sécurité peut être modifiée soit par une étude géomécanique appropriée (simulation mathématique de l'effondrement d'une cavité), soit par la connaissance statistique des modalités d'effondrement de vides de la couche géologique considérée.

CHOIX D'UNE METHODE DE PROSPECTION

Ayant ainsi, en fonction de l'ensemble construction — sol de fondation, défini la dimension et la profondeur des cavités dangereuses, le chargé d'étude géotechnique doit soumettre au maître d'œuvre un programme de prospection comprenant en particulier :

- le choix éventuel d'une méthode géophysique, maille à adopter,
- le choix d'une méthode de sondages mécaniques, maille à adopter.

Le maître d'œuvre et le chargé d'étude, *responsables juridiquement*, doivent choisir un programme et, en particulier, une méthode géophysique permettant de répondre à la question fondamentale suivante :

« Si aucune anomalie n'a été décelée, quelle est la probabilité pour que subsiste un vide supérieur à la condition de fontis ? »

Seule la *gravimétrie* nous paraît actuellement apte à répondre à cette question, car l'anomalie gravimétrique est proportionnelle au déficit de masse (en tonnes) du vide recherché (vide franc, plein d'eau ou comblé de sédiments). On peut en effet calculer l'anomalie due à des corps de forme géométrique simple, par diverses applications de la loi de Newton.

De plus, la Compagnie de prospection géophysique française (CPGF) a développé divers programmes de calcul (dans le cadre d'un contrat de recherches de la délégation générale à la recherche scientifique et technique) permettant de :

- calculer le champ gravimétrique d'une cause de forme quelconque,
- résoudre le problème inverse c'est-à-dire, à partir du champ gravimétrique mesuré, et compte tenu de conditions aux limites à définir en fonction de la géologie, reconstituer la structure d'origine.

Ainsi, il est toujours possible, préalablement à une prospection gravimétrique, de définir si la gravimétrie est apte à répondre à la question posée, et si oui, de déterminer la maille de prospection constituant l'optimum technico-financier.

Après une prospection gravimétrique, il faut choisir une méthode de *reconnaissance mécanique* appropriée, c'est-à-dire fiable et économique.

L'expérience montre en effet qu'il n'est pas si simple de reconnaître mécaniquement des vides plus ou moins effondrés ou remblayés :

- le carottage continu est coûteux et lent, et n'est jamais réalisé à 100 % dans les mauvais terrains hétérogènes,
- l'utilisateur n'est pas maître de la profondeur de refus des pénétromètres, qui restent très valables lorsqu'on est géologiquement sûr qu'il n'y aura pas de refus,
- la mesure en place de la densité (gamma-gamma) pose des problèmes de sécurité (nécessité de tuber), elle est assez onéreuse et est fortement influencée par les variations de diamètre du sondage,
- le sondage destructif avec chronométrage est assez efficace, mais ne permet pas de voir de très petits vides.

Aussi nous sommes-nous orientés, à la CPGF, vers le sondage destructif avec enregistrement continu de paramètres (ou diagraphies instantanées), vitesse d'avancement (Diagrafor) et percussion réfléchie (Vibralog). A condition que la machine choisie permette de travailler à pression rigoureusement constante (ce qui n'est pas le cas de certaines machines sophistiquées qui au contraire font varier la pression en fonction de la dureté), l'interprétation de ces enregistrements, jointe à l'examen des débris de forage, permettent de définir avec précision :

- la position des anomalies,
- leur nature : vide franc ou vide rempli de terrains très mous ou de remblais, qui correspondent tous deux à une vitesse d'avancement élevée, le premier se distinguant par une percussion réfléchie élevée.

Il est possible ensuite de contrôler visuellement (appareil de photographie descendu en forage ou endoscope) l'étendue des vides rencontrés.

Notons enfin qu'il est possible, une fois résolu le problème des vides, d'étudier les caractéristiques de la fondation par pressiomètres placés en fonction de la diagraphie (fig. 1).

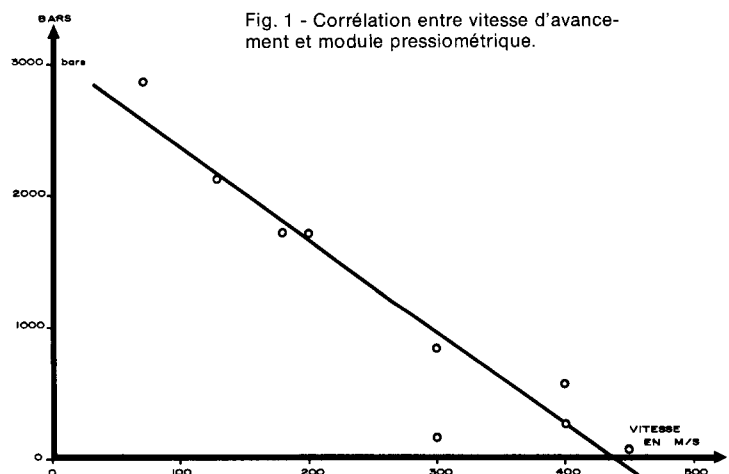


Fig. 1 - Corrélation entre vitesse d'avancement et module pressiométrique.

DEFINITION D'UN PROGRAMME DE PROSPECTION

Compte tenu du programme précédemment défini, c'est-à-dire :

- l'observation géologique (enquête, terrain, photographie aérienne, sondages, endoscope),
- la microgravimétrie,
- le sondage destructif avec diagraphies instantanées, quelle est la part respective des deux dernières méthodes de reconnaissance ?

En fonction de la nature des cavités et du type d'ouvrage, nous pouvons considérer les cas suivants :

A - Cavités étendues (quel que soit le type de construction)

- microgravimétrie à la maille de 10×10 ou 20×20 , débordant largement les constructions,
- quelques sondages Diagrafor de contrôle,
- établissement du plan de masse (lorsque le projet peut être déplacé ou modifié),
- sondages complémentaires.

B - Cavités peu étendues

Bâtiment sur semelles

- ouverture et examen des fouilles,
- microgravimétrie à une maille adaptée à celle des semelles ($2 \times 3,50$ m par exemple, ou $7,20 \times 7,20$ m, etc.),
- sondages Diagrafor (ou pelle mécanique si peu profond),
- programme de confortement (curage et remplissage de gros béton, injections, longrines renforcées).

Bâtiment sur pieux

On craint des cavités très petites et situées sous la base des pieux. La microgravimétrie est généralement inopérante.

On devra effectuer :

- des sondages Diagrafor à l'emplacement de chaque pieu,
- un programme éventuel d'injections,
- de préférence, on pourra rechercher une solution de fondation superficielle (radier, semelles avec longrines, faux radier...).

Structure souple et étendue (barrage, route, autoroute, canal)

C'est le problème le plus complexe, car il faudrait théoriquement la même maille que pour les bâtiments sur pieux. Le coût risquerait d'en être prohibitif : 5 000 points gravimétriques par kilomètres d'autoroute, soit environ 500 000 francs/kilomètre !

Dans l'attente de solutions venant de la construction (treillis ?), on devra s'orienter vers des solutions pragmatiques (par exemple, l'autoroute A6 entre Courtenay et Sepeaux) :

- étude géologique,
- ouverture et examen des fouilles,
- définition des secteurs critiques,
- microgravimétrie avec de l'ordre de 800 points par kilomètre concentrés sous les chaussées,

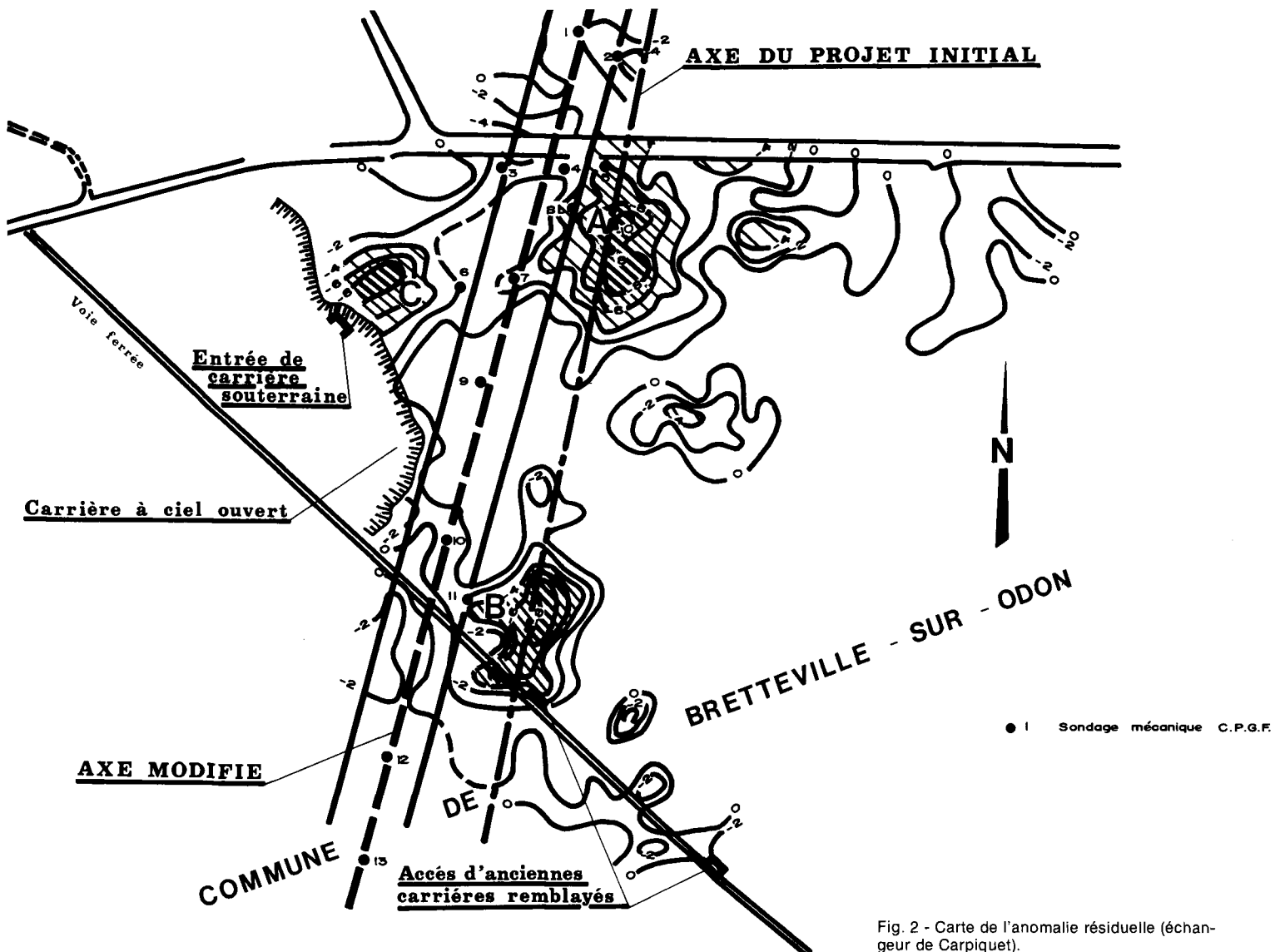


Fig. 2 - Carte de l'anomalie résiduelle (échangeur de Carpiquet).

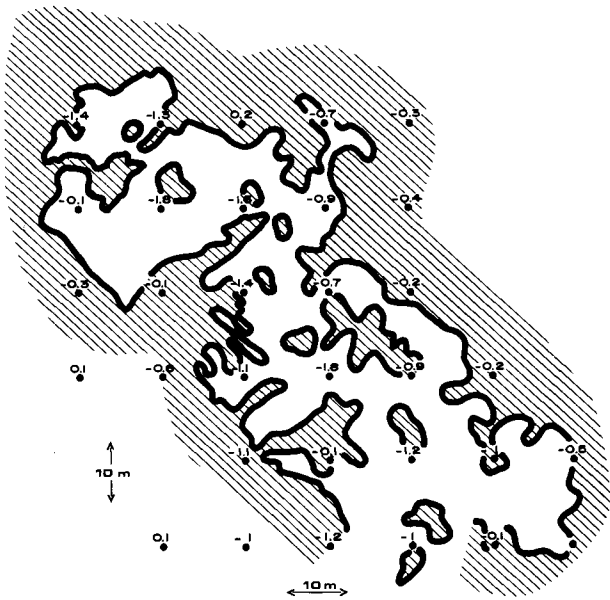


Fig. 3 - Comparaison entre une carrière et les densités reconstituées par le programme Filtr.

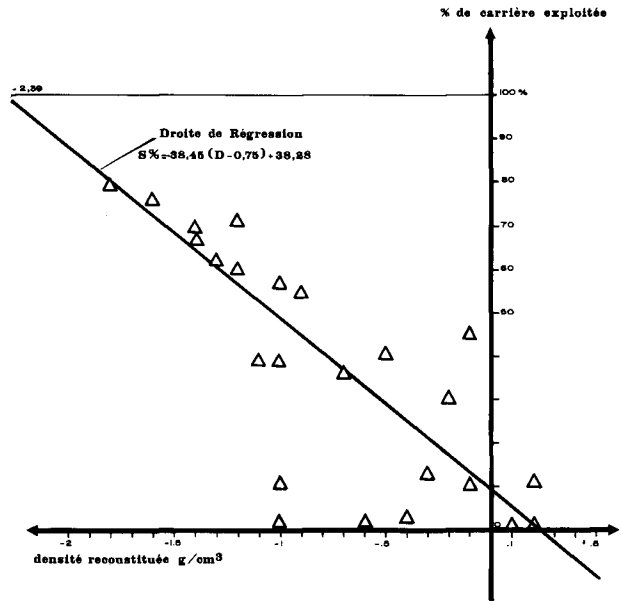


Fig. 4 - Corrélation entre la densité reconstituée et le pourcentage de carrière exploitée.

Fig. 5 - Carte de l'anomalie résiduelle (Saint-Germain-en-Laye).

- sondages de contrôle,
- travaux confortatifs,
- passage d'un rouleau de 100 tonnes.

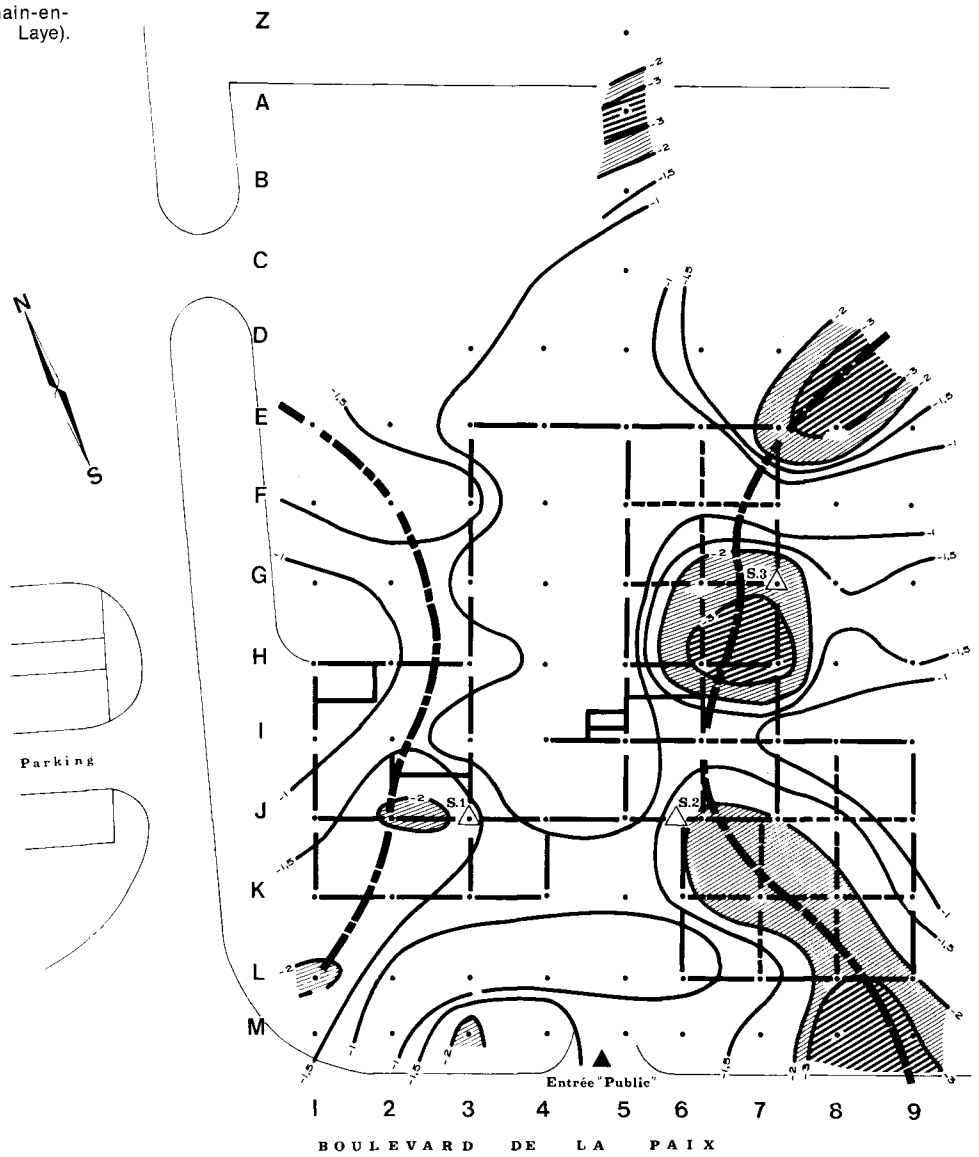
EXEMPLES D'ETUDE

Carrières étendues

Le premier exemple choisi concerne l'échangeur routier de Carpiquet (Calvados).

Il s'agissait de localiser des carrières de calcaires bathoniens souvent étendues horizontalement, en vue d'implantation. Compte tenu de la carte des anomalies résiduelles, il a été possible de changer le tracé de la bretelle principale.

Autour du nouvel axe une campagne de sondages a confirmé les résultats (fig. 2). Seul le sondage 8 a traversé une ancienne carrière souterraine entre 15 et 19.50 m de profondeur. Le sondage 11 effectué sur l'anomalie B à proximité du nouvel axe a traversé une ancienne carrière à ciel ouvert remblayée sur une hauteur de 14 m.



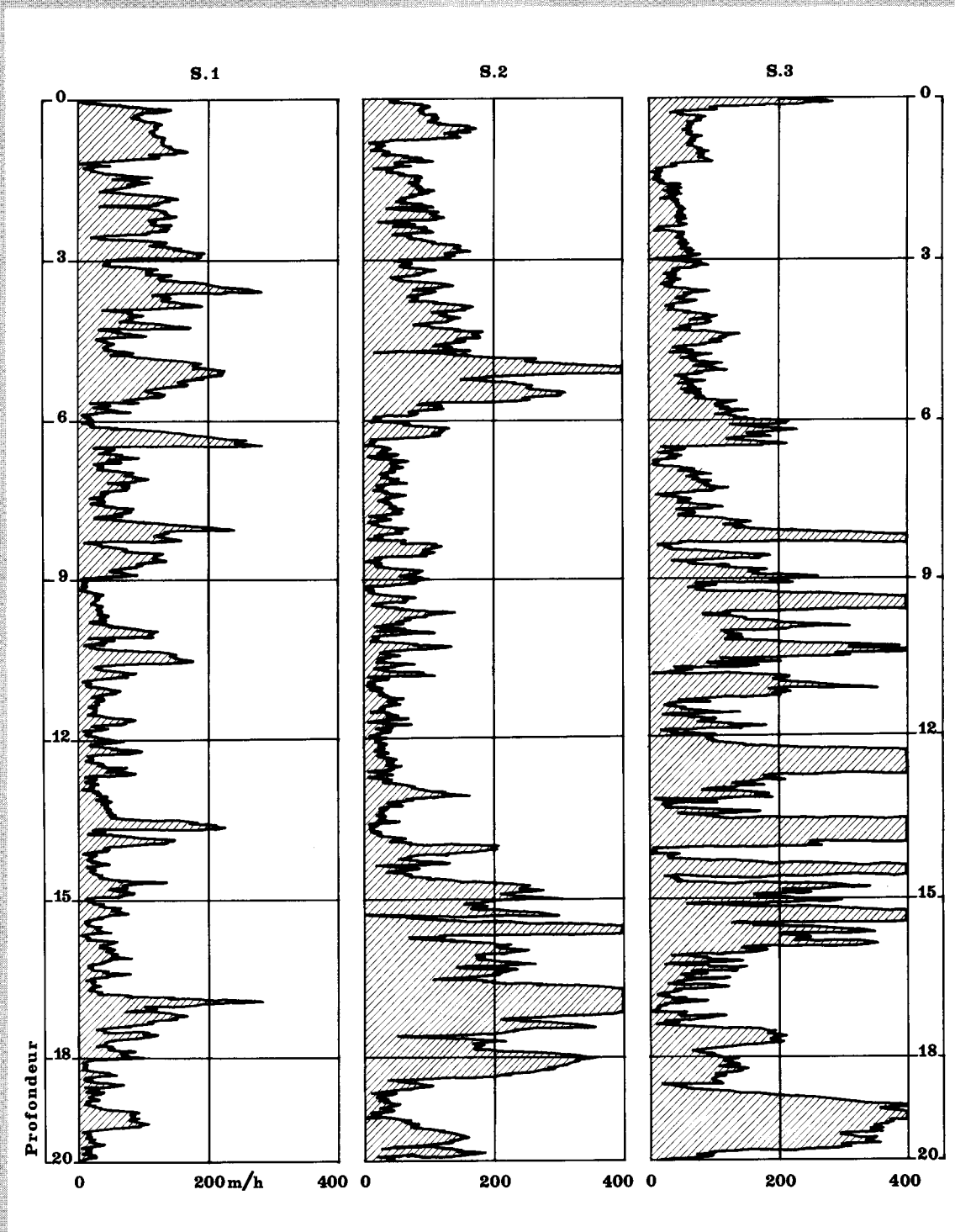


Fig. 6 - Vitesses d'avancement (Saint-Germain-en-Laye).

Le deuxième exemple provient également de Caen. Dans le quartier de l'hôpital, à la suite d'une étude gravimétrique réalisée pour la mairie, une carrière a été découverte. Nous avons ensuite effectué divers traitements mathématiques (dans le cadre de la recherche subventionnée DGRST).

La figure 3 montre les densités reconstituées par blocs de $20 \times 20 \times 4$ m, et le tracé réel des carrières.

La figure 4 montre la corrélation entre ces densités reconstituées et le pourcentage effectivement exploité. On en déduit la densité moyenne du calcaire en place, ici de 2,36.

Vides peu étendus

L'exemple proposé concerne un édifice public à Saint-Germain-en-Laye.

Un premier projet de fondation avait été effectué et prévoyait des pieux à 10 m de profondeur ancrés dans le calcaire grossier lutétien.

La possibilité d'anciennes galeries de captage d'eau ayant été évoquée, une étude complémentaire fut réalisée au moyen de mesures gravimétriques à la maille de 7,20 m (trame des descentes de charge). En fonction des résultats acquis (carte de l'anomalie résiduelle, figure 5), trois sondages furent implantés en des points présentant respectivement des anomalies en centièmes de milligal de : — 1,3 (S1), — 2 (S2), et — 2,8 (S3).

Les graphiques de vitesse d'avancement sont particulièrement contrastés (fig. 6) et confirment l'existence d'un axe d'anomalie dans le calcaire grossier correspondant soit à une galerie de drainage effondrée, soit à une zone karstique.

Suite à ces résultats, le projet de fondation a été modifié et l'on a adopté une solution de fondations superficielles avec des semelles filantes sous les voiles périphériques, des semelles carrées sous les descentes de charge ponc-

tuelles, et des longrines à croisillons reliant les semelles carrées dans les zones d'anomalie.

Il a été ainsi possible d'augmenter la sécurité de la construction, tout en réduisant le coût des fondations spéciales.

CONCLUSION

La méthode microgravimétrique est actuellement le procédé géophysique le plus employé en France pour la détection des cavités souterraines.

La qualité des résultats augmente considérablement lorsque sa mise en œuvre est subordonnée à une bonne définition du problème de fondation. L'utilisation de procédés mathématiques d'inversion permet d'en quantifier et d'en apprécier plus exactement les résultats. Le contrôle par sondages destructifs avec enregistrement de la vitesse d'avancement et de la percussion réfléchié permet un bon contrôle des interprétations microgravimétriques. Il est alors possible de définir une condition de fontis.

Enfin, un projet de fondation superficielle rigidifiée prenant en compte cette condition de fontis permet souvent d'apporter une solution plus économique que des injections ou des pieux.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] LAKSHMANAN J., Reconnaissance de cavités dans le sous-sol par procédés électriques et gravimétriques, *Rev. Sols Soils*, Paris, mars 1963.
- [2] KUTKAN E., LAKSHMANAN J., *Le fontis de Sevrans. prospection gravimétrique*, Assoc. Géol. Bassin de Paris, 1966.
- [3] LAKSHMANAN J., *Cartographie microgravimétrique et radioactive des zones de dissolution du gypse du Lutétien au nord-est de Paris*, cavités de dissolution, Symp. int. Assoc. Geol., Hanovre, 1973.
- [4] LAKSHMANAN J., BICHARA M., *Automatic deconvolution of gravimetric anomalies*, 25^e Congr. EAEG, La Haye 1976, *Geophys. prosp.*, à paraître.
- [5] THORIN R., UNVOIS J.-P., *Identification des cavités souterraines par sondages*, *Bull. liaison Labo. P. et Ch.*, **88**, mars-avril 1977, p. 124-128.