

COLLOQUE NATIONAL/LYON 13-14 MARS 1979

CONNAITRE LE SOUS-SOL, UN ATOUT POUR L'AMENAGEMENT URBAIN

LES PROBLEMES DE CAVITES EN MILIEU URBAIN

P 211

par

F. BARDOT*, J.C. ERLING**, L. GIROUSSE*, E. SIWERTZ**

- . Société de Contrôle technique et d'expertise de la construction (SOCOTEC)
- .. Compagnie de Prospection Géophysique Française (C.P.G.F.)

RESUME

A l'aide d'exemples concrets pris dans des villes françaises de grande ou moyenne importance, les auteurs présentent une méthodologie pour la détection, puis l'orientation du traitement de divers types de cavités souterraines.

Suivant le moment de l'intervention : étude préalable, étude après démarrage du chantier ou étude postérieure à la construction, la méthode employée mettra en oeuvre soit la micro-gravimétrie seule, soit la micro-gravimétrie associée à des forages destructifs avec enregistrement de paramètres, soit des forages seuls.

A partir des différents cas de figure cités, on appréciera la contribution de cette méthode au problème de traitement de ces cavités en vue de l'aménagement urbain. Enfin des développements que l'on peut attendre de la méthode seront évoqués.

1. INTRODUCTION

Les problèmes de détection de cavités souterraines prendront de plus en plus d'importance lors de la réalisation d'équipements dans les zones sensibles. En effet, les zones "saines" étant déjà équipées l'urbanisation touche maintenant des secteurs où les problèmes sont plus aigus.

De plus, la multiplication des reconnaissances montre que rares sont les formations géologiques qui ne contiennent pas de cavités naturelles ou artificielles.

Nous avons donc été conduits à développer une double méthode de détection des cavités, afin d'évaluer les risques de désordre et suggérer les solutions de confortation adéquates.

2. METHODES UTILISABLES

Une récente publication (Réf. 1) a fait le point sur les différentes méthodes géophysiques actuellement mises en oeuvre pour la détection des cavités souterraines.

- la méthode de sismique réfraction classique ne donne pas de résultats satisfaisants dans la majorité des cas (Réf. 2). Des essais en réflexion (Réf. 1) en utilisant l'amplitude des ondes réfléchies semblent plus prometteurs et font actuellement l'objet de recherches.
- les méthodes électriques ont été et sont toujours très utilisées. Rappelons qu'il s'agit de déceler une zone à résistivité pratiquement infinie (vide) dans un milieu plus conducteur. Aux méthodes classiques de trainé et de sondages électriques, s'ajoutent maintenant diverses méthodes électromagnétiques (Réf. 1).
- la méthode micro-gravimétrique a bénéficié d'améliorations technologiques (gravimètre microgal) et de progrès dans l'interprétation des mesures (Réf. 3) qui permettent maintenant la détection et l'identification de cavités jusqu'alors indécélables. En particulier, la règle classique qui stipule que "le recouvrement doit être inférieur à 1,5 fois la hauteur du vide" n'est plus absolument restrictive.
- pour mémoire, citons la reconnaissance directe par forage, à la limite parfaite mais difficilement applicable de façon systématique.

3. METHODE MISE EN OEUVRE A LA COMPAGNIE DE PROSPECTION GEOPHYSIQUE FRANCAISE

Après l'analyse de la documentation existante, absolument fondamentale pour la définition du problème posé, la reconnaissance s'effectue en trois étapes :

- Prospection micro-gravimétrique avec une première maille, la plus lâche possible compte tenu des vides potentiels et du type d'aménagement prévu (suivant l'état d'avancement des travaux d'aménagement, la maille peut être conditionnée soit par le schéma directeur, soit par le plan masse, soit par le plan de fondation).
- Eventuellement, seconde phase de micro-gravimétrie avec une maille plus serrée au droit d'anomalies décelées lors de la première phase.
- Vérifications et étalonnage par forages avec diagraphies instantanées et photographies in situ si nécessaire.

Le détail de la méthode micro-gravimétrique a fait l'objet de publications antérieures (Réf. 1 et 4) et se trouve exposé dans d'autres communications à ce colloque. On peut insister sur l'importance que revêt le choix de la première maille de reconnaissance. En raison des contraintes de l'environnement géologique ou urbain, mais aussi des contraintes financières, le nombre des points de mesure est limité. A cette limite, correspond un seuil de probabilité de détection qu'il est possible de calculer. La figure 1 indique, par exemple, la probabilité de détection d'un déficit de masse dans un volume allongé en fonction de sa profondeur "z" et de sa section "s" pour une maille de 5 x 5 mètres. De telles abaques existent pour différentes mailles et différentes géométries du déficit de masse.

Une fois la maille choisie et les mesures de terrain réalisés, le traitement automatique de l'ensemble des données (topographie, relief latéral, dérive instrumentale et luni-solaire, dérive de latitude) par une série de filtres (traitement sur calculateur COMPUCORP et ordinateur CDC 7600) permet de tracer la carte de l'anomalie dite "de BOUGUER".

Cette carte est ensuite filtrée de l'anomalie régionale due à la structure géologique, pour aboutir aux anomalies résiduelles qui traduisent les variations de densité du sous-sol par rapport à une base fixée.

Les résultats sont alors soumis à l'interprétation. Celle-ci est plus ou moins sophistiquée suivant le problème posé, et de la simple localisation des zones de faiblesse peut aller jusqu'au traitement "TEST FILT". Ce programme, compte tenu de certaines contraintes géologiques, permet de restituer les densités in situ par tranches successives sur un maillage donné.

Les résultats de l'interprétation sont enfin confrontés à ceux des sondages de reconnaissance. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec un forage destructif et l'enregistrement continu de la vitesse d'avancement et de la percussion réfléchie (Diagrafor et Vibralog).

On peut ainsi définir avec précision la position et la nature des discontinuités à l'origine des anomalies gravimétriques. Dans certains cas, la photographie depuis le forage renseigne directement sur la géométrie de la cavité ou la nature de son remplissage.

4. EXEMPLES CARACTERISTIQUES

Les cavités rencontrées dans le sous-sol peuvent avoir une origine naturelle ou artificielle. Dans la plupart des cas elles sont liées à un environnement géologique particulier : minéralisations diverses, matériaux de construction, ou d'amendement, formations géologiques plus ou moins solubles etc... mais parfois, elles sont encore plus directement liées à l'activité humaine : constructions souterraines, anciennes canalisations etc... Nous avons sélectionné parmi les études récentes, entreprises souvent à la demande de la SOCOTEC, de la C.P.G.F. des exemples pris dans près de 20 villes françaises correspondant à ces différents cas.

4.1. Cavités naturelles

Elles sont la conséquence de la dissolution de roches solubles et donc de la circulation actuelle ou fossile d'eau souterraine.

- Sur le site de la ZUP "Ma Campagne" près d'ANGOULEME, on a pu confronter les mesures micro-gravimétriques avec le relevé spéléologique d'une grotte existante (figure 2) et vérifier ainsi l'extension des cavités pour décider de l'implantation d'un château d'eau. La reconnaissance mécanique a été ainsi limitée à la zone 1 du plan.
- Les cavités karstiques peuvent être remblayées soit par effondrement soit par des apports ultérieurs. La reconnaissance en vue de la construction d'un immeuble important à AUBENAS (en collaboration avec SOCOTEC) a permis de mettre en évidence de telles cavités sur plus de 10 mètres de hauteur. La figure 3 montre l'implantation des forages et un exemple de diagraphie. On a fait ressortir les forages où la hauteur de vide plus ou moins remblayé représentait plus de 50 % de la longueur forée (le diamètre des cercles est proportionnel à cette longueur). Signalons qu'une première campagne de forage destructif sans enregistrement n'avait pas mis en évidence de discontinuités majeures dans ce terrain...

- A la CIOTAT et à ANTIBES (en collaboration dans les deux cas avec SOCOTEC) des problèmes similaires ont été posés à la suite de la découverte, après ouverture des fouilles, de cavités karstiques plus ou moins remblayées (figure 4). Les forages de contrôle réalisés après la prospection gravimétrique, ont permis de corréliser la vitesse d'avancement de l'outil avec l'anomalie gravimétrique résiduelle (figure 5) et de passer de la carte gravimétrique à une carte de qualité des matériaux.
- Des photographies prises dans le forage (diamètre 66mm) permettent de se rendre compte de l'extension latérale des vides décelés par la diagraphie. La photo a montre un exemple d'une telle cavité à l'origine d'une anomalie de 4 centièmes de milligal, sur le site d'une clinique près d'AIX-en-PROVENCE (recherche en collaboration avec SOCOTEC).
- La dissolution du gypse est souvent à l'origine de désordres importants, et singulièrement dans certaines localités de la région parisienne. Le cas du fontis de SEVRAN est classique (Réf. 5) (Réf. 6) (Figure 6), mais il est loin d'être isolé. A St-MICHEL-de-MAURIENNE une prospection dans les caves d'un bâtiment HLM (en collaboration avec SOCOTEC) a permis de limiter l'extension d'une zone effondrée liée à une lentille de gypse et d'exclure l'existence d'autres zones de faiblesse sous le bâtiment.
- Le cas de NOISY-le-SEC est intéressant dans la mesure où la prospection gravimétrique a été réalisée en pleine ville à la suite de l'apparition de fontis en surface. La figure 7 montre les résultats de la prospection et les anomalies décelées. Les anomalies supérieures à 3 centièmes de milligal se sont révélées être des zones de dissolution active.

A partir de ces quelques exemples, deux points apparaissent comme fondamentaux : les cavités naturelles ne sont que très rarement structurées (mis à part les karsts orientés sur des fractures) et elles sont souvent comblées ou en voie de l'être. Ces deux caractères contribuent à la difficulté de leur détection. En particulier, du fait du remplissage, le contraste de densité avec le terrain encaissant se trouve diminué. Un exemple frappant est celui des bassins de Tancarville au HAVRE. La gravimétrie avait mis en évidence des anomalies de 3 centièmes de milligal qui en fait correspondaient à des zones de diaclases colmatées dans la craie. Le calcul théorique conduisait à un volume de l'ordre de 12 mètres cube avec un contraste de densité de 1 (figure 8). En effet, du fait de la décompression des terrains en surface l'anomalie mesurée est très souvent plus forte que l'anomalie théorique correspondant au vide existant.

Notons qu'il est parfois malaisé de différencier pour une anomalie donnée, la part des hétérogénéités de surface (remblai par exemple) et des causes plus profondes. Le programme CPGF "TEST FILT" a permis d'apporter une solution à ce problème dans le cas de la Z.I. de St-JEAN-de-BRAYE près d'ORLEANS (figure 9) à la suite du traitement, il a été possible de tracer une carte de densité des terrains situés entre 4 et 7 mètres de profondeur.

La dispersion quasi aléatoire des cavités naturelles et leur dimension souvent réduite ajoutent à la difficulté de détection. L'exemple du parking de la ZAC de Murigny à REIMS est très significatif. A la suite d'une première phase de micro-gravimétrie, des forages de contrôle situés sur une anomalie à 50cm l'un de l'autre ont donné des résultats différents. La maille de la prospection gravimétrique a du être resserrée progressivement de 5 x 5m à 1 x 1m. La figure 10 illustre

les résultats de la prospection. Il s'agissait en fait de cassures sub-verticales dans la craie localement comblées avec une argile peu dense.

4.2. Cavités artificielles

Les exemples sont multiples. En effet, dans le cas des cavités naturelles la reconnaissance n'a souvent lieu qu'après la mise en évidence du problème, alors que dans le cas des cavités artificielles, l'expérience de l'aménageur ou les recommandations des services compétents entraînent souvent une reconnaissance à priori.

On peut distinguer les carrières souterraines étendues où le maillage de la reconnaissance dépendra plus des cavités que des futures constructions et les cavités peu étendues (marnière dans la craie, galeries...) où le programme de prospection pourra être ajusté aux fondations prévues.

D'autres communications à ce colloque font état de problème de ce type à CAEN et à LILLE. Nous avons retenu, pour les carrières étendues trois exemples :

- A VITRY-sur-SEINE, lors du prolongement vers Orly de la ligne n° 5 de la R.A.T.P. le tracé de la ligne devait recouper d'anciennes carrières de gypse situées vers 40 mètres de profondeur sur une hauteur de 2 à 4 mètres. Le traitement mathématique des anomalies gravimétriques décelées, confronté avec les dimensions des exploitations connues, a permis de tracer la carte des hauteurs de vide dont la figure 11 montre un extrait. A partir de cette carte on a pu prévoir l'amplitude des tassements en cours et futurs et orienter le tracé de la voie et des bâtiments annexes.
- Sur la ZUP de la Croisette à LILLE, la micro-gravimétrie a montré l'existence de carrières plus ou moins comblées de grande dimension, dont la géométrie a pu être calculée à partir de l'anomalie théorique (figure 12) et vérifiée par la suite par des relevés souterrains.
- Le cas de CARRIERE-sur-SEINE est assez complexe. En effet, à côté de carrières bien connues, saines, accessibles et pouvant être maintenues dans l'état, existent des carrières "sauvages" dans les calcaires grossiers dont les accès sont perdus ou murés. La micro-gravimétrie ayant délimité ces carrières sauvages, une série de forages destructifs avec diagraphies a permis de définir avec précision l'état du toit de ces carrières (figure 13) et de décider des solutions confortatives (dans ce cas on a réalisé des piliers artificiels par injection d'un coulis à prise rapide).

Les cavités artificielles de petites dimensions sont évidemment plus difficiles à déceler. En particulier, le problème posé par d'anciennes canalisations en milieu urbain est assez fréquent. On peut citer deux exemples :

- A MARSEILLE, rue de Rome (figure 14) dans un contexte très remanié, l'analyse des anomalies gravimétriques décelées a montré qu'elles correspondaient à des hétérogénéités de surface sans rapport avec l'effondrement d'anciens égouts à l'origine de la prospection.

- A LIMOGES, il s'agissait de mettre en évidence d'anciennes galeries gallo-romaines dans le cristallin. Les sondages destructifs réalisés à la suite de la prospection gravimétrique, sur l'emplacement des faibles anomalies rencontrées (inférieures à 2 centièmes de milligal) ont montré que les anomalies n'étaient liées qu'à des zones décomprimées dans le terrain sans structures définies (figure 15).
- Au Lude près du MANS, le problème était lié à un réseau d'anciennes galeries de 3 à 4m² de section (voûte vers 5m et plancher vers 7m) plus ou moins effondrées. Les sondages destructifs réalisés lors de cette étude ont permis d'établir une corrélation entre les anomalies gravimétriques et l'indice des vides sur la diagraphie avec différentes hypothèses de contraste de densité (figure 16). L'exploitation de ces résultats a permis de s'orienter vers une solution d'injection relativement économique (mise en place de piliers périphériques et remplissage par coulis maigre). Un cas similaire a été traité à St-GERMAIN-en-LAYE (Réf. 1).

Pour la petite histoire, signalons que le problème n'est pas de déceler les cavités souterraines parce qu'elles présentent un risque... Ainsi, à St-GERVAIS les TROIS CLOCHERS on nous a demandé de rechercher d'anciennes carrières pour y installer des champignons... nières...

5. EVALUATION DES COÛTS ET DEVELOPPEMENT DE LA METHODE

La prospection gravimétrique en milieu urbain revient actuellement (fin 1978) entre 250 et 300 F. le point compte tenu de l'ensemble des corrections nécessaires. Le coût des forages de contrôle avec diagraphies interprétées peut être évalué, suivant le nombre, la profondeur (25m au maximum actuellement pour la C.P.G.F.) et le type de terrain entre 250 et 350 F le mètre linéaire.

Dans le cas cité d'AIX-en-PROVENCE, une campagne générale de forages (un moment envisagée) se serait montée à près de 200.000 F. (coût du projet 15 MF) la campagne de prospection gravimétrique associée à 18 forages a permis de diviser cette somme par deux tout en testant l'ensemble de la zone concernée.

Enfin, le dépouillement sur le terrain permet de donner au Maître d'Oeuvre une réponse rapide, point souvent très important lorsque les difficultés apparaissent en cours de chantier.

Cette méthode maintenant fiable et relativement économique, est appelée à se développer sur deux axes :

- l'un concerne le traitement des données gravimétriques. Une meilleure résolution du problème inverse, c'est-à-dire reconstruire la structure d'origine à partir du champ gravifique mesuré permettra d'élaborer des cartes de densité in situ plus détaillée.
- l'autre concerne l'interprétation des diagraphies avec en particulier la corrélation avec des paramètres géotechniques classiques.

6. CONCLUSION

CONTRIBUTION DE LA METHODE A LA DEFINITION DES SOLUTIONS DE CONFORTATION

Cette double méthode, mise en oeuvre par la Compagnie de Prospection Géophysique Française, en collaboration dans de nombreux cas avec le Bureau SOCOTEC, apporte des éléments de réponse aux trois questions fondamentales posées par l'Aménageur :

- délimitation en plan et en volume des éventuelles cavités dans le terrain.
- Nature du remplissage (vide ou matériaux plus ou moins lâches).
- Caractéristiques des limites de la discontinuités (en particulier mur et toit).

Le premier point permet de définir une condition de fontis et de calculer un projet de fondation superficielle rigide plus économique que des injections ou des pieux quand il est possible de ponter les cavités reconnues ou supposées.

Lorsque l'injection est nécessaire (vides trop étendus par exemple) le second point est fondamental et la méthode utilisée apporte deux éléments : l'un statistique et global sur le contraste de densité entre la cavité et son environnement, l'autre ponctuel par l'analyse de la percussion réfléchi (vibralog) lors du sondage destructif.

Enfin, lorsque la solution de fondation par pieux descendus sous les cavités est retenue (descentes de charges ponctuelles...) les diagrammes permettent de situer avec précision la position des horizons sains, mais aussi de choisir dans le forage, l'emplacement de mesures complémentaires (pressiomètre classique ou médératec, pressiomètre de très grande puissance, par exemple).

PROBABILITE DE DETECTION D'UNE CAVITE ALLONGEE
MAILLE de 5 x 5 m

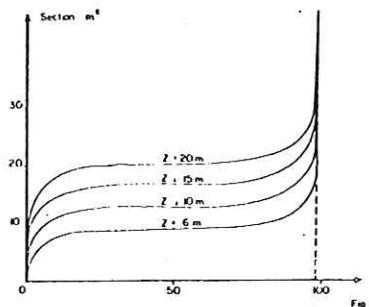


Figure 1

ZUP MA CAMPAGNE

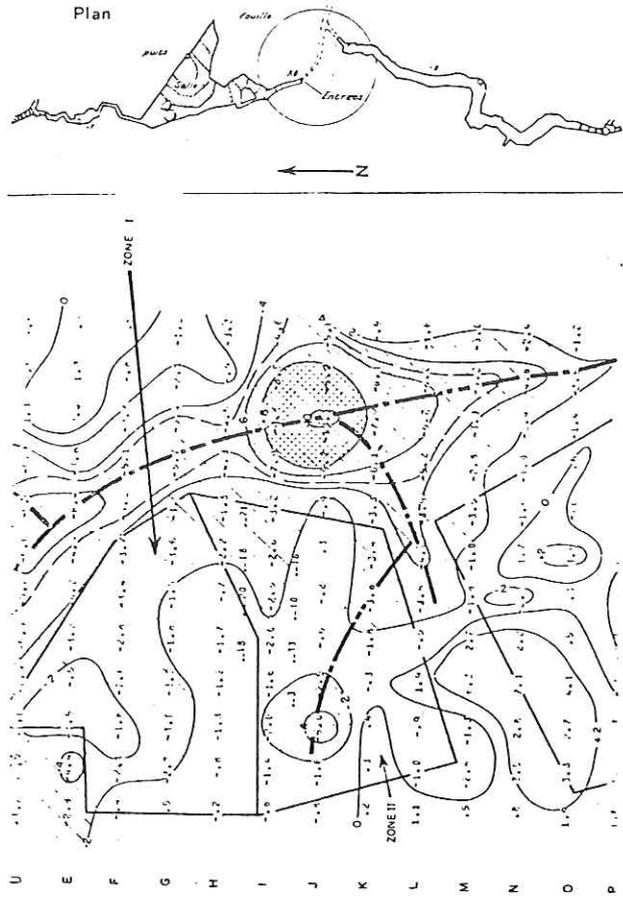


Figure 2

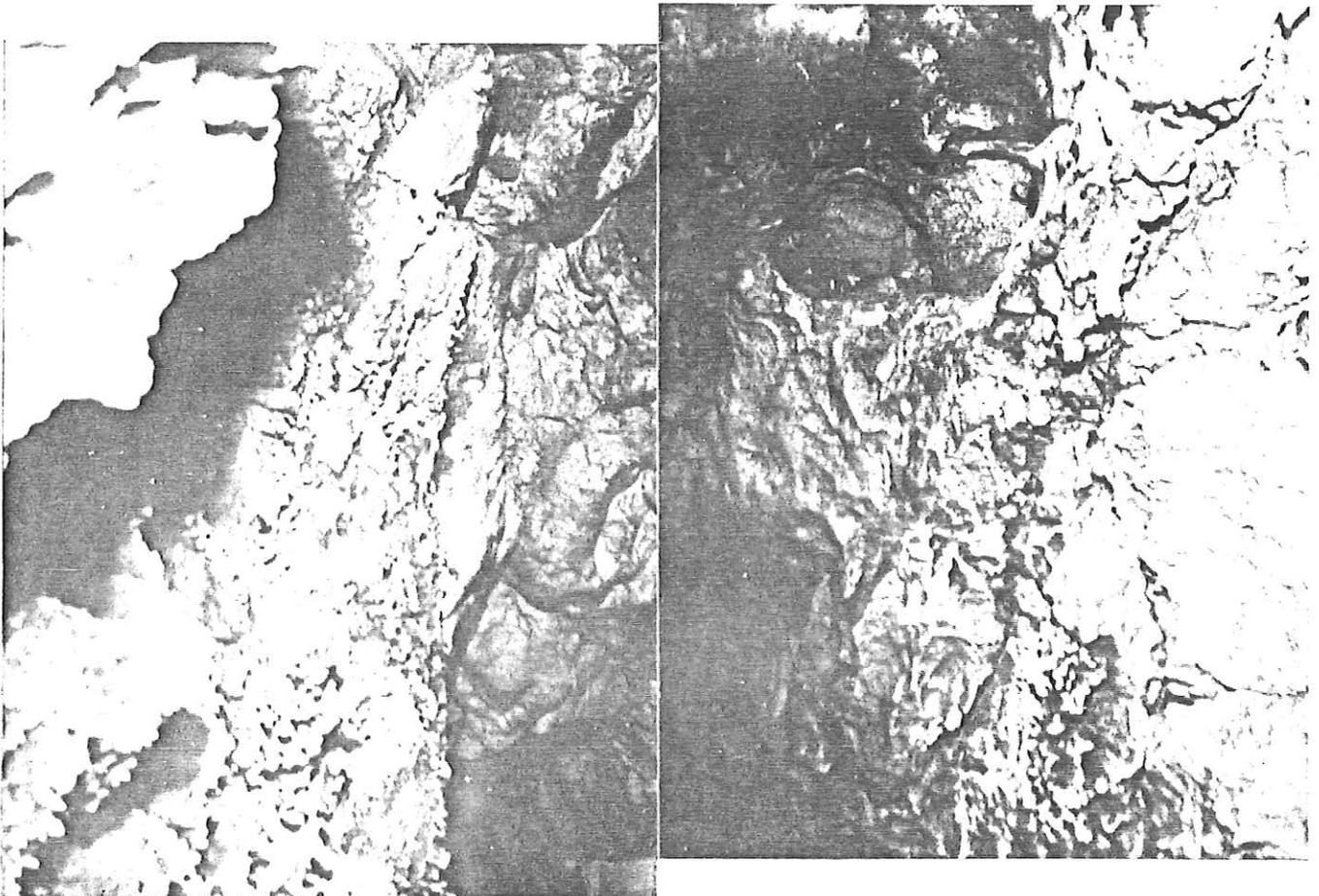


Photo a

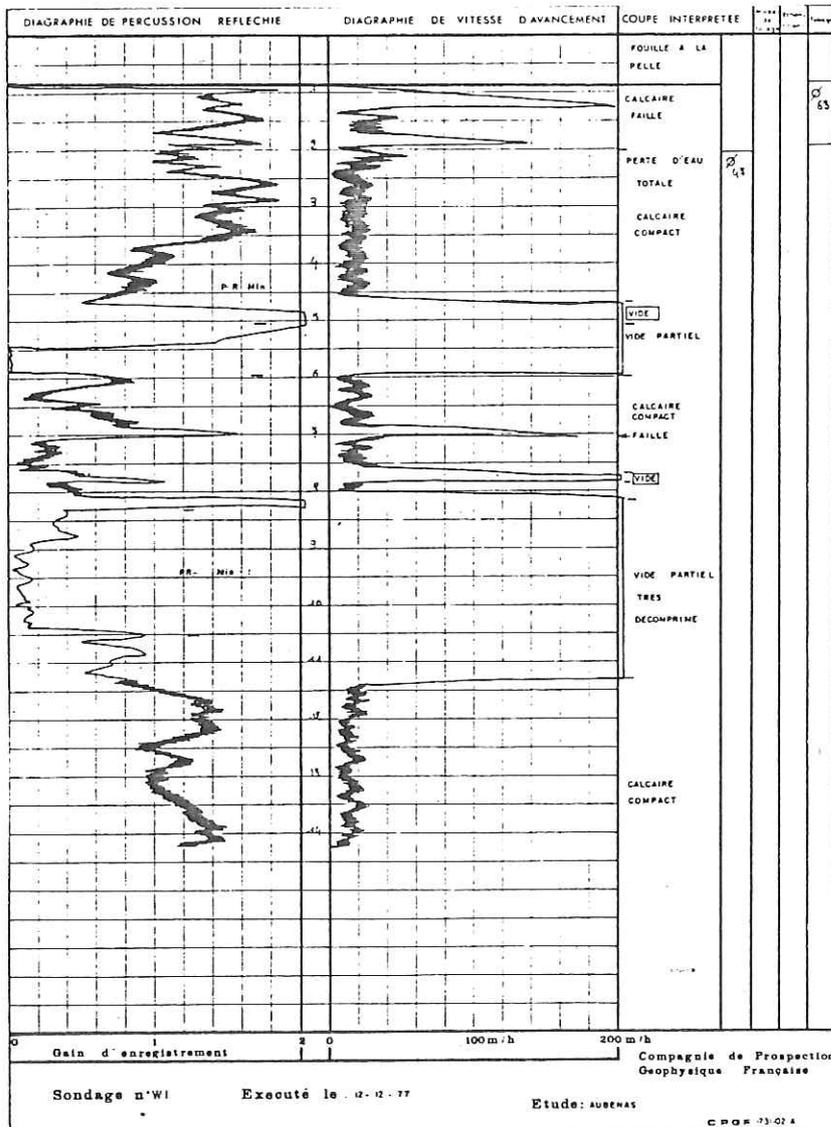
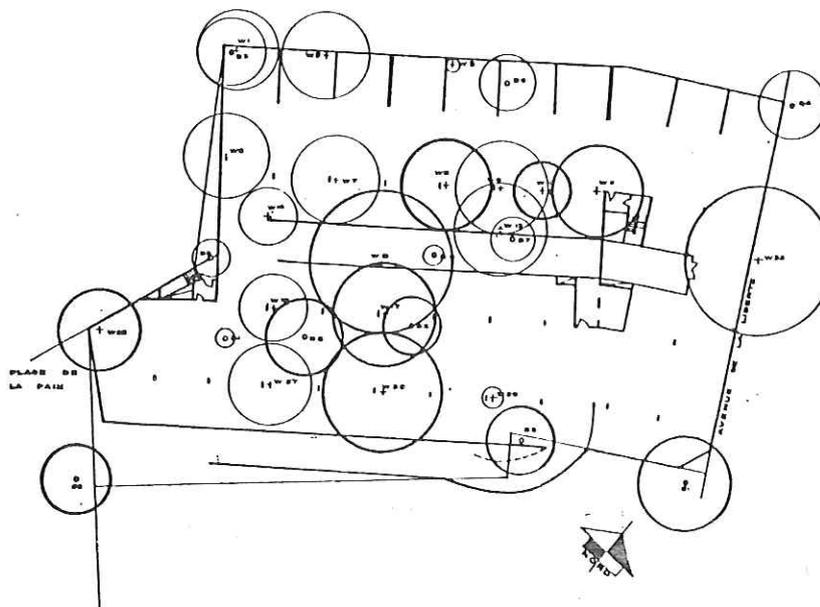


Figure 3

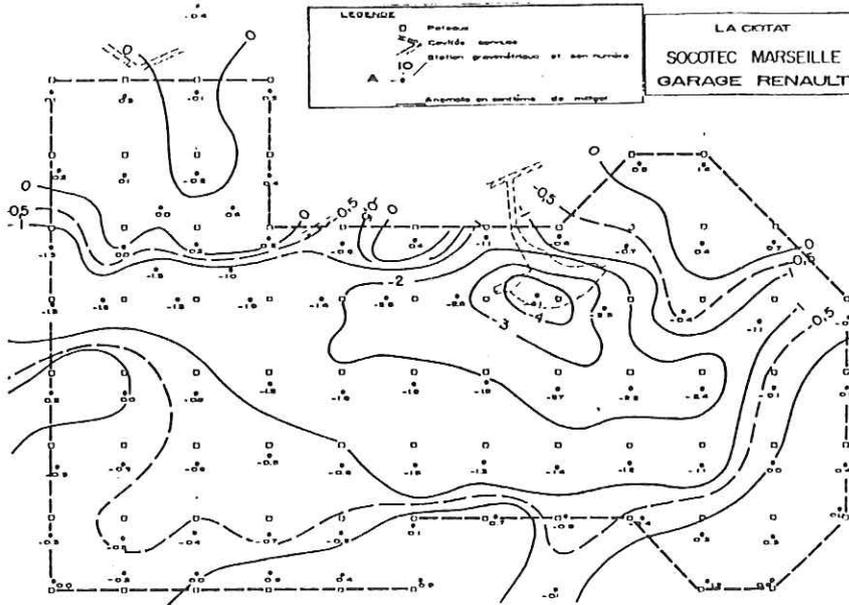


Figure 4

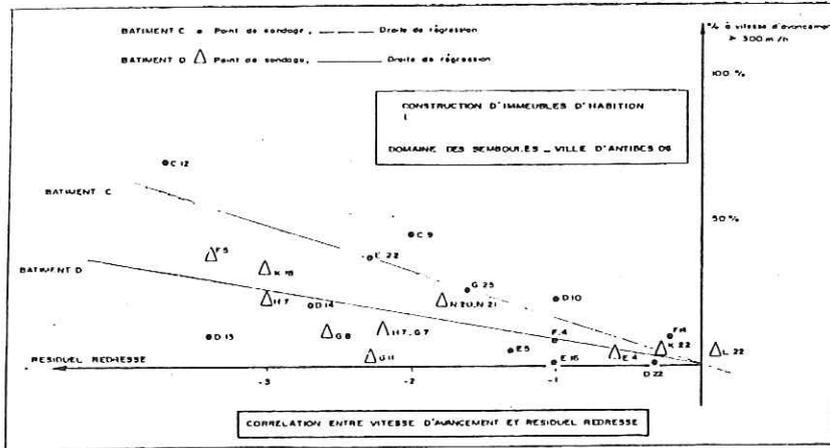


Figure 5

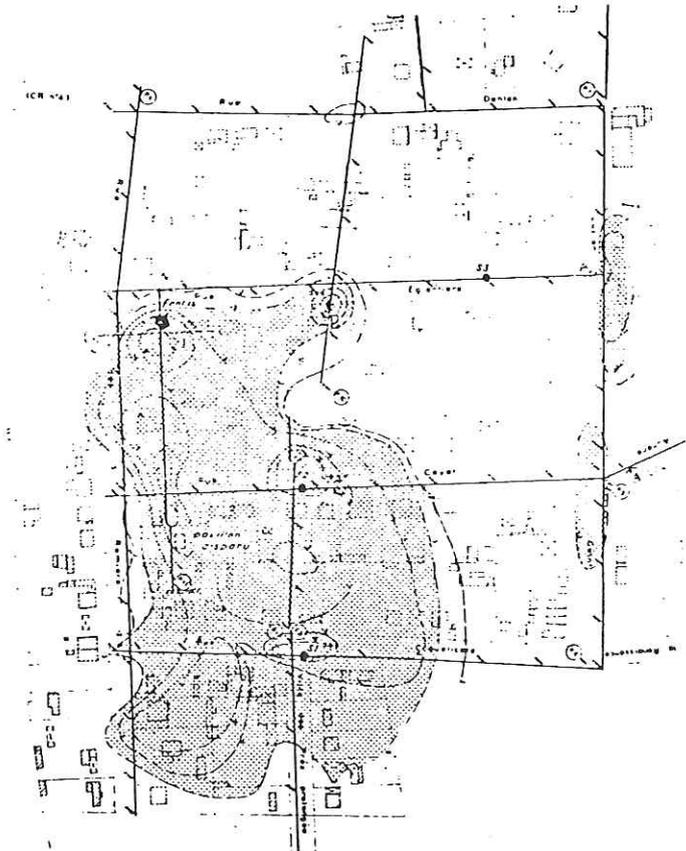


Figure 6

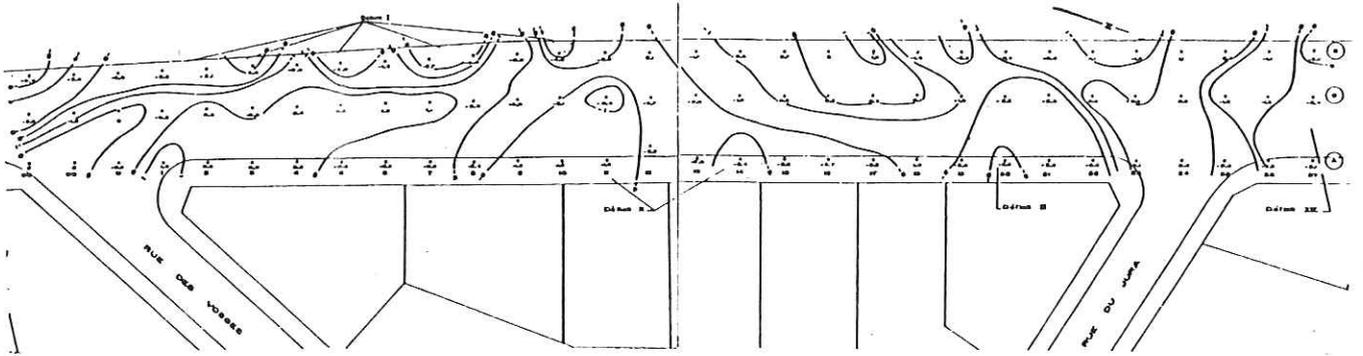


Figure 7

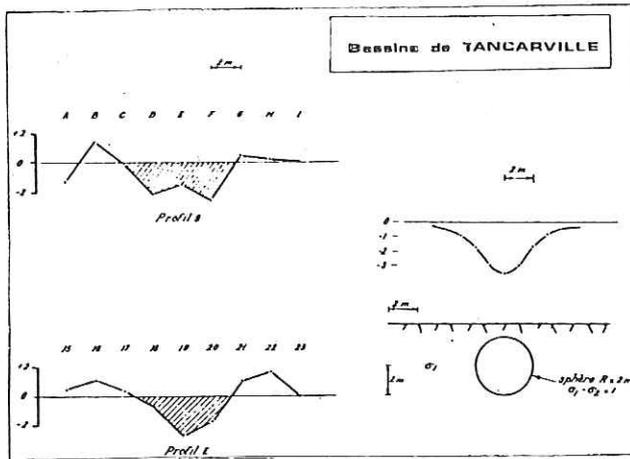


Figure 8

ZI de St Jean de Braye
Boulevard Marie Stuart
—
ETUDE GRAVIMETRIQUE
—
CARTE DES VARIATIONS
DE DENSITES RECONSTITUEES

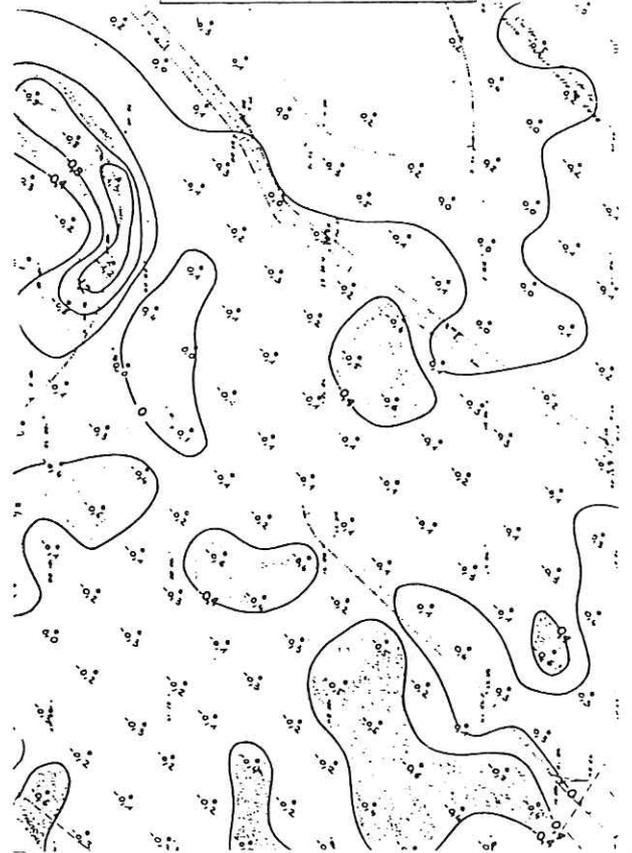


Figure 9

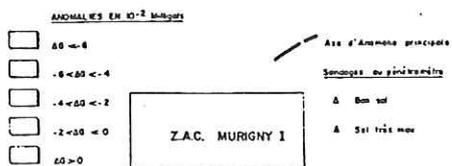
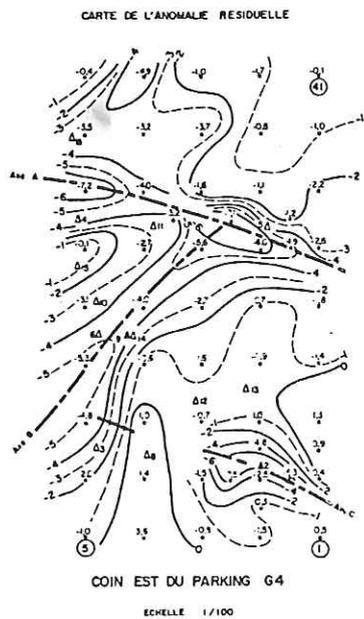
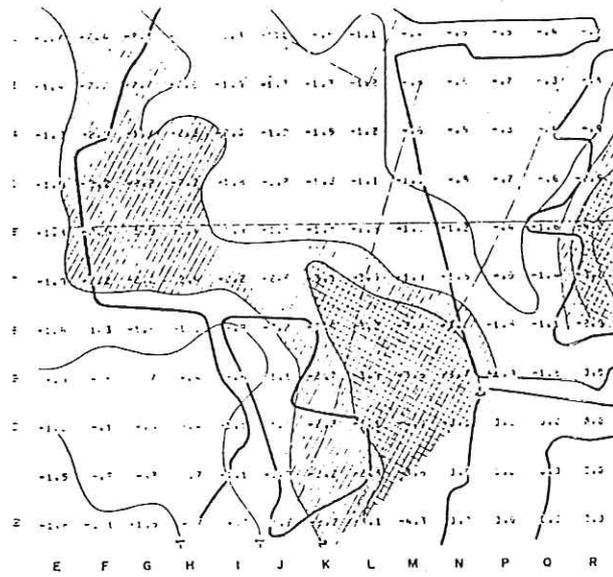


Figure 10



Régie Autonome des Transports Parisiens

RESEAU FERRE - LIGNE II^o5

CARRIERES SOUTERRAINES A VITRY-sur-SEINE

CARTE DES HAUTEURS DE VIDE

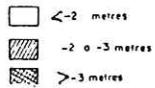


Figure 11

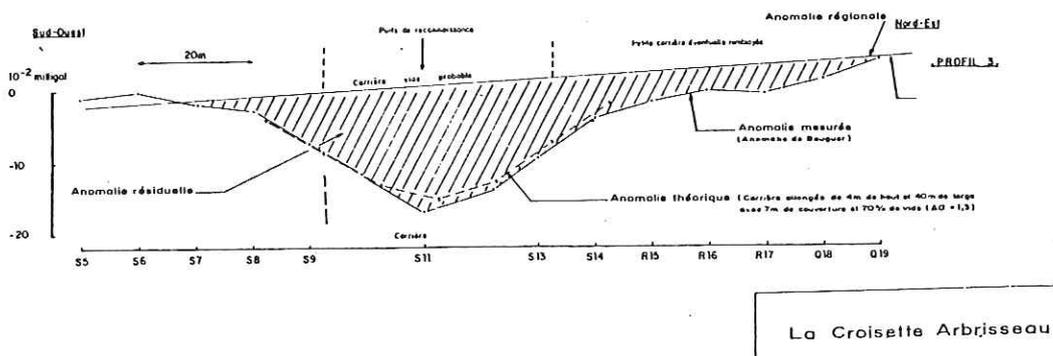
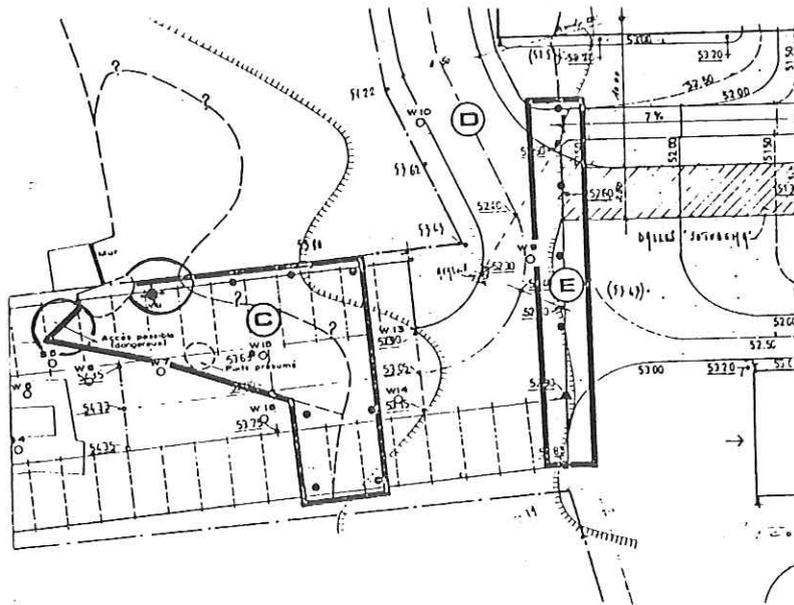


Figure 12



ACL CONSTRUCTIONS
 SCI DI Route de Chérou - CARRIÈRES - sur - SEINE
 SONDAGE N° W8 EXECUTE AU WAGON DRILL
 CPDF 1966

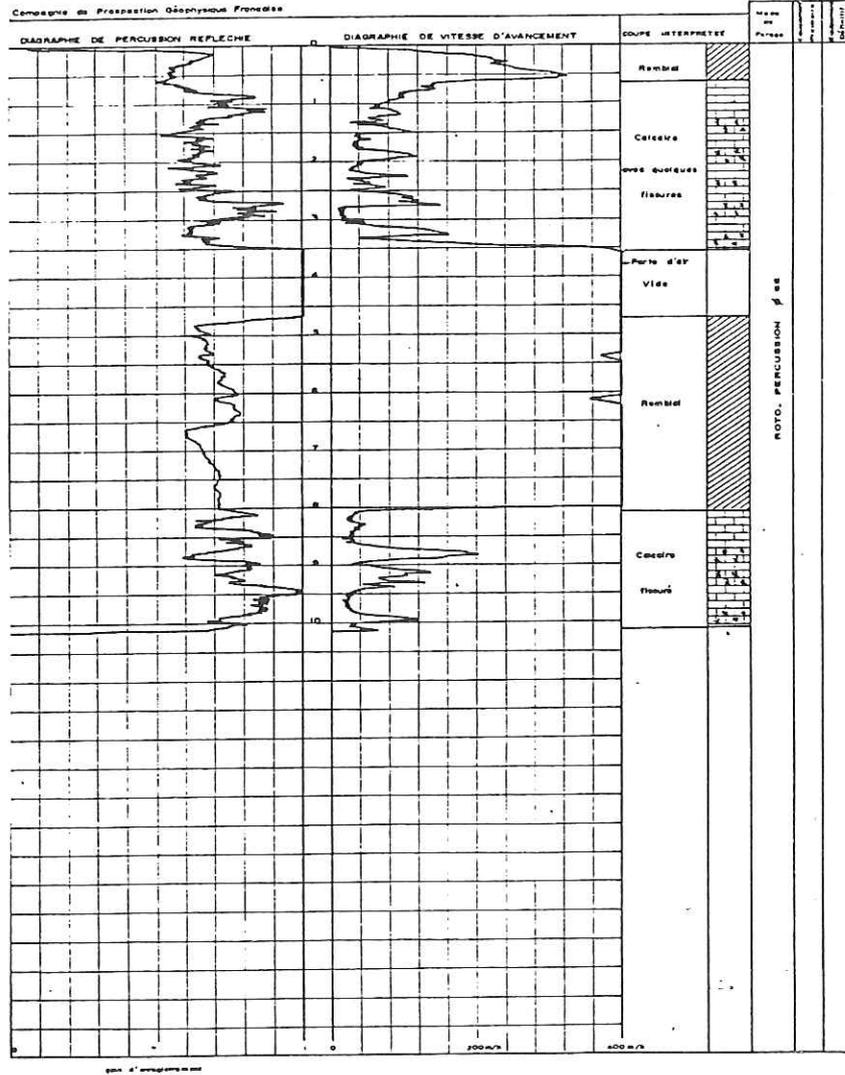


Figure 13

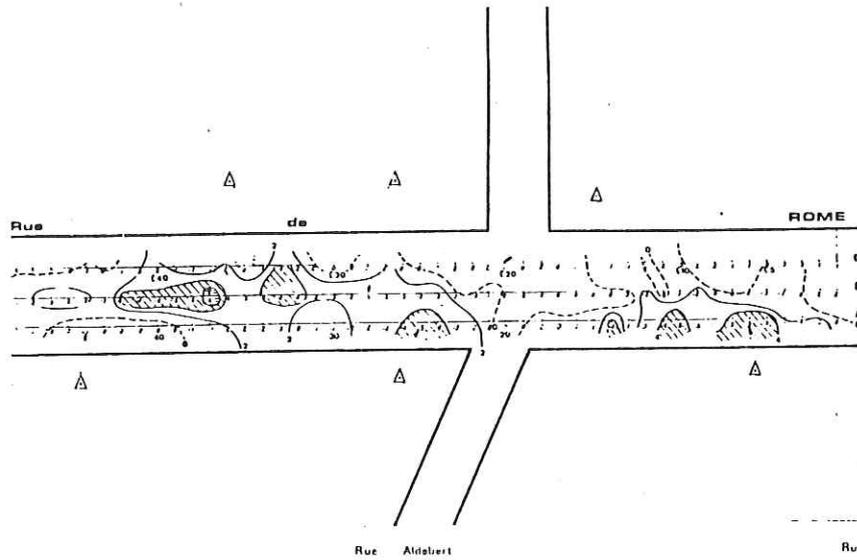


Figure 14

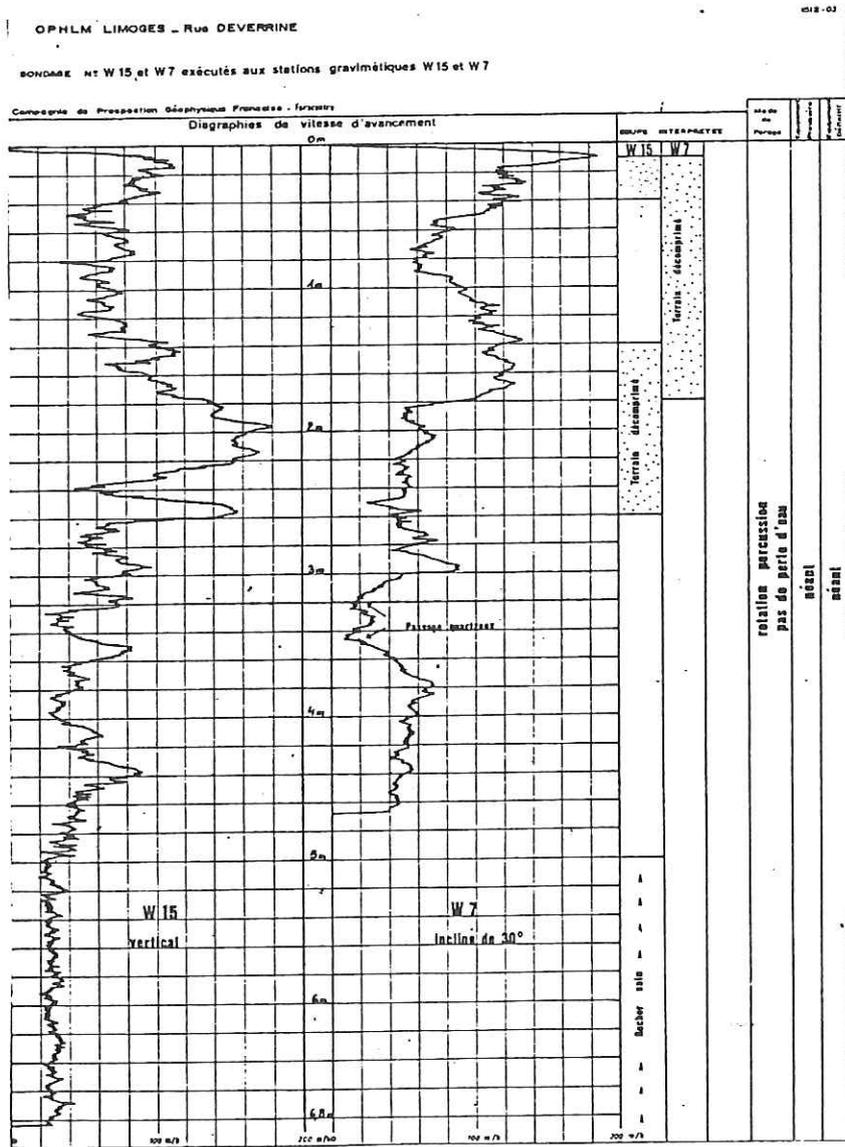


Figure 15

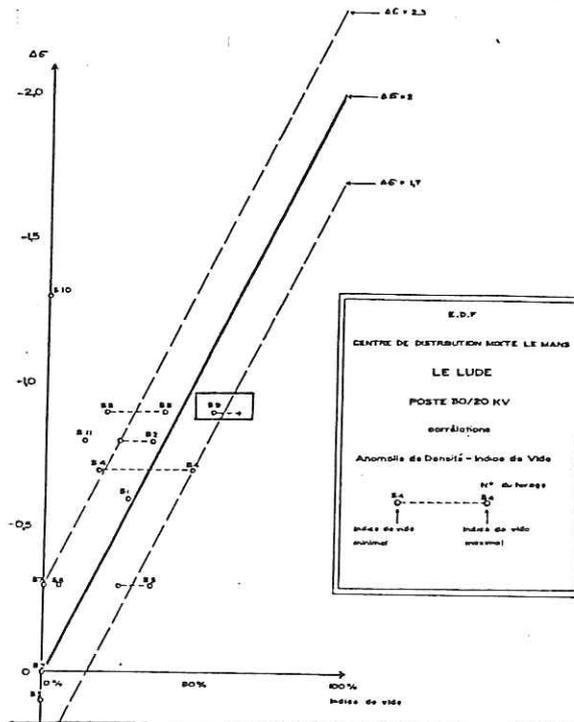
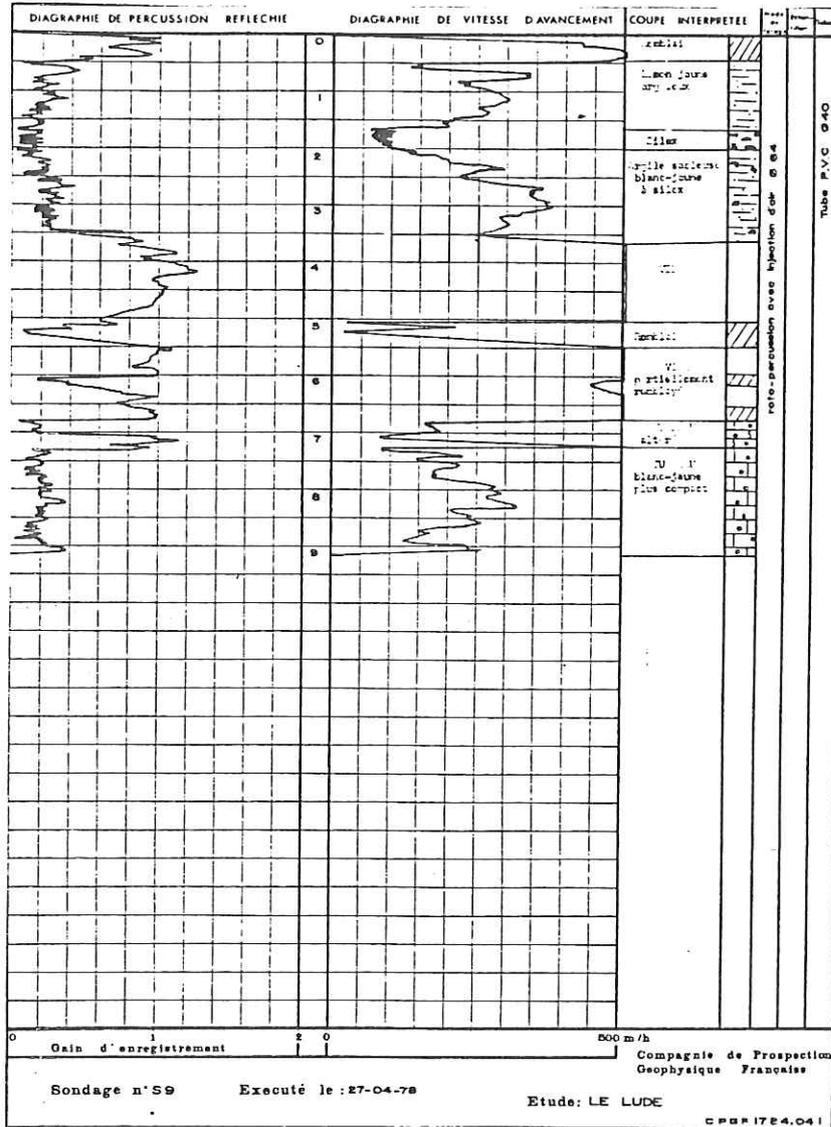


Figure 16

- R E F E R E N C E S -

- (1) - "Détection des cavités souterraines" - Ensemble de cinq articles
Bulletin de liaison des Ponts & Chaussées n° 92 (Novembre-Décembre 1977) :
- FRAPPA M., HORN R., MURAOUR P., et PERAGALLO J. -
"Contribution à la détection par sismique réflexion des cavités
souterraines de faible profondeur"
 - DUPUIS A. - "Localisation des cavités par la méthode magnéto-tellurique
artificielle (M.T.A.)"
 - GABILLARD R., DUBUS J.P., BAVANDI R., RATM. et LAGABRIELLE R.
"Détection des cavités souterraines par une méthode électromagnétique
entre surface et forage".
 - LAKSHMANAN J., BICHARA M. et ERLING J.C.
"Etudes de fondation en terrain caverneux. Place de la gravimétrie"
 - GABILLARD R. et DUBUS J.P.
"Procédé électromagnétique par focalisation des courants"
- (2) - Rapport C.P.G.F./D.G.R.S.T. - Inédit (1977).
- (3) - BICHARA M., LAKSHMANAN J.
"Automatic deconvolution of gravimetric anomalies"
Colloque EAEG LA HAYE - (1976)
- (4) - LAKSHMANAN
"Cartographie micro-gravimétrique et radioactive des zones de dissolu-
tion du gypse du Lutétien au Nord-Est du Bassin de Paris"
Colloque IAEG HANOVRE (1973)
- (5) - DOLFUSS G.F.
"Les effondrements de la plaine de Sevrans"
Acad. SC. PARIS, 137, (1903)
- (6) - LAKSHMANAN J., et KUTKAN E.
"Le fontis de Sevrans, étude gravimétrique"
Journée de Géologie Appliquée - Association des Géologues du Bassin
Parisien - PARIS (1966)