

RECONNAISSANCE ET TRAITEMENT DE CAVITES NATURELLES OU ARTIFICIELLES DANS LE DOMAINE FERROVIAIRE

SURVEYING AND GROUTING NATURAL OR ARTIFICIAL CAVITIES IN RAILWAY CIVIL ENGINEERING WORKS

ROQUES Guy*, ERLING Jean-Claude**

Résumé

L'existence de cavités souterraines et de réseaux karstiques peut poser des problèmes de stabilité des plate-formes, tant pour des projets de voies nouvelles que sur les réseaux de lignes S.N.C.F. existantes. Après une enquête préliminaire, il est mis en œuvre une méthodologie de reconnaissance et de traitement donnant des garanties satisfaisantes en regard des risques de fontis. Une prospection microgravimétrique complétée par des sondages mécaniques destructifs avec enregistrement de paramètres est le moyen actuellement le mieux approprié à ce type de problème, permettant d'optimiser un programme de confortement par injections. La méthode est illustrée par quelques exemples d'études réalisées à Massilly sur la ligne TGV Paris-Lyon en cours de travaux, ainsi que sur trois sites de lignes S.N.C.F. existantes.

Summary

The presence of underground quarries and networks of karstic voids may generate stability problems concerning the existing or projected S.N.C.F. platforms. Following a preliminary inquiry, a line of survey and handling is set up securing against the risk of collapse at the surface of natural ground. A micro-gravity survey is run, completed with a campaign of tricone drilling, enhanced through the recording of drilling parameters. This is the logical approach to optimize the grouting program. The method is illustrated by a few examples of survey done at Massilly on the new TGV track between Paris and Lyon, and also on three sites on already existing S.N.C.F. tracks.

1. Les problèmes posés

Parmi les mouvements de terrain qui peuvent compromettre la stabilité des infrastructures ferroviaires existantes, les effondrements occupent une place importante en raison des désordres graves et soudains qu'ils risquent d'occasionner aux ouvrages.

De par sa nature même, le chemin de fer possède une exploitation très rigide et les répercussions des conséquences de ce genre d'accident sur la régularité de la circulation sont toujours source de tracas pour les cheminots. De plus, contrairement aux autres instabilités pouvant être décelées par des mouvements précurseurs et contrôlées au niveau de la voie, ce genre de phénomène est si brutal qu'il entraîne des risques certains pour les circulations.

Confrontée depuis toujours à ce type de problème, la S.N.C.F. a tenté depuis quelques années, de maîtriser davantage la détection des cavités au sens large, et aussi d'apporter les solutions les mieux adaptées au confortement de son infrastructure.

Contrairement au réseau routier, le chemin de fer est beaucoup plus vulnérable, en raison de l'absence de structure rigide et imperméable au sommet des plate-formes. Ils sont cependant tous deux soumis aux mêmes problèmes liés à l'évolution dans le temps des cavités souterraines, naturelles ou artificielles. Nous vous proposons donc d'examiner les méthodes généralement utilisées par la S.N.C.F., de re-

cherche de cavités, dans le cas d'infrastructures existantes ou de construction de lignes nouvelles.

Les stratégies appliquées dans ces deux cas seront totalement différentes. Il est en effet beaucoup plus aisé d'appliquer des méthodes rationnelles de diagnostic lors des différentes phases de l'étude de la construction d'une infrastructure que dans l'entretien d'un réseau existant. Il ne suffit pas cependant, pour résoudre le problème, de localiser les vides, d'en connaître l'origine, la géométrie et l'évolution potentielle, il faut aussi trouver les méthodes prolongeant les reconnaissances initiales, afin de régler définitivement les désordres rencontrés. Nous schématiserons ci-après les différentes démarches appliquées par la S.N.C.F. et la C.P.G.F., afin de traiter les problèmes de cavités du domaine ferroviaire.

2. Le rappel des méthodes préliminaires utilisées dans la recherche des cavités

Le but principal des méthodes préliminaires consiste à définir le contexte du site et les différents facteurs pouvant être à l'origine des anomalies du substratum. Elles comprennent différents moyens basés essentiellement sur les recherches d'archives, la géologie et la photo-interprétation et peuvent être complétées -- dans le cadre de ligne nouvelle -- par tous les renseignements d'observation ou de travaux de l'infrastructure.

* S.N.C.F. - Études Générales et Projets, Paris-France.

** Compagnie de Prospection Géophysique Française - Rueil-Malmaison - France.

Les recherches bibliographiques et les enquêtes

Ces enquêtes administratives et locales apportent des renseignements précieux sur l'orientation des études ultérieures, ainsi que sur la nature et la forme des cavités situées autour du lieu de l'incident.

Dans le Nord et l'Est de la France, où le réseau ferroviaire est particulièrement marqué par toute une variété de formes de cavités artificielles, ces recherches bibliographiques apportent souvent une réponse quant à l'origine de ces effondrements ("catiches", sapes de guerre ou autres exploitations anciennes de minerais...).

Les attachements d'incidents

D'une manière générale, tout incident de terrain sous les voies ou à leur proximité, est répertorié et fait l'objet d'un rapport. Dans les secteurs particulièrement sensibles à ces mécanismes d'instabilité, il existe dans les registres des services locaux S.N.C.F. - des graphiques de relevé sur les caractéristiques des effondrements et leur historique.

Ce sont des histogrammes :

- indiquant la répartition géographique des effondrements dans un secteur de ligne (voir ex. fig. 1),
- donnant les caractéristiques des fontis (diamètre-profondeur) (voir ex. fig. 2),
- précisant la fréquence des effondrements en fonction du temps et liés à un relevé des précipitations.

Ces renseignements précisent souvent les caractéristiques sommaires des terrains d'où proviennent les désordres et les mécanismes de rupture.

Les études géologiques et hydrogéologiques

Les caractères lithologiques des terrains, la puissance et la répartition spatiale des couches, leur profondeur par rapport au sol et leur position vis-à-vis de la nappe phréatique, sont autant de facteurs importants à considérer. Ces premières observations des terrains permettent déjà par exemple, de définir un type d'exploitation dans le cas de cavité artificielle ou de processus de dissolution qu'il est possible de déceler, si des forages industriels viennent perturber le milieu.

La photointerprétation

Cette méthode de détection indirecte permet de déceler rapidement, après contrôle sur le terrain, les principaux traits géomorphologiques d'un site potentiellement favorable à des phénomènes de dissolution. Elle se mène parallèlement aux études géologiques et hydrogéologiques et son efficacité est particulièrement remarquable lors de l'étude d'un tracé sur un substratum calcaire, par exemple (voir fig. 3).

Le suivi des chantiers de terrassement

Après les divers essais et sondages, il faut aussi, au cours des chantiers de terrassement, faire un suivi rigoureux des

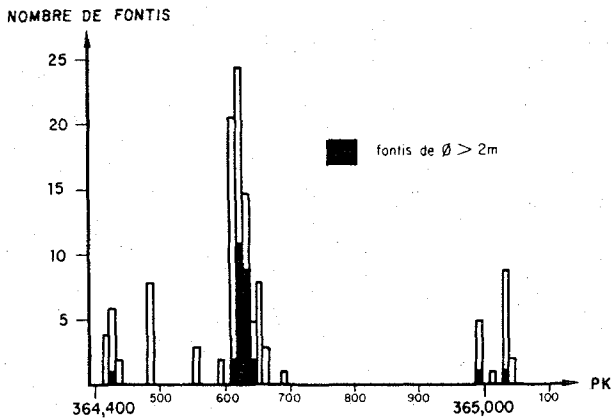


Fig. 1 : Histogramme sur les fréquences d'effondrements en un lieu donné de l'infrastructure existante.

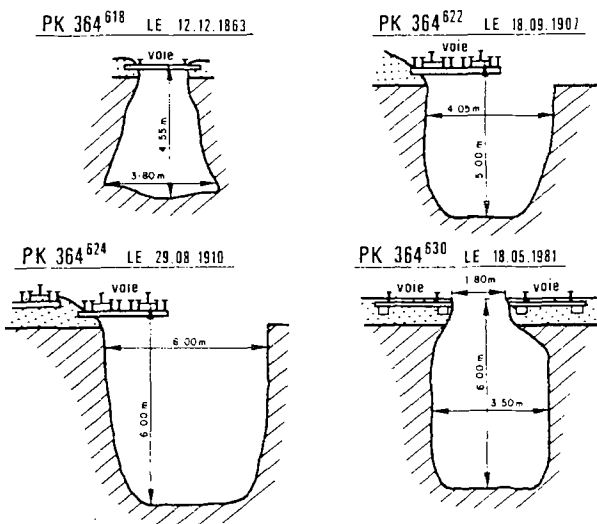


Fig. 2 : Attachements d'incidents - Site de Varangeville - Ligne Paris-Strasbourg.

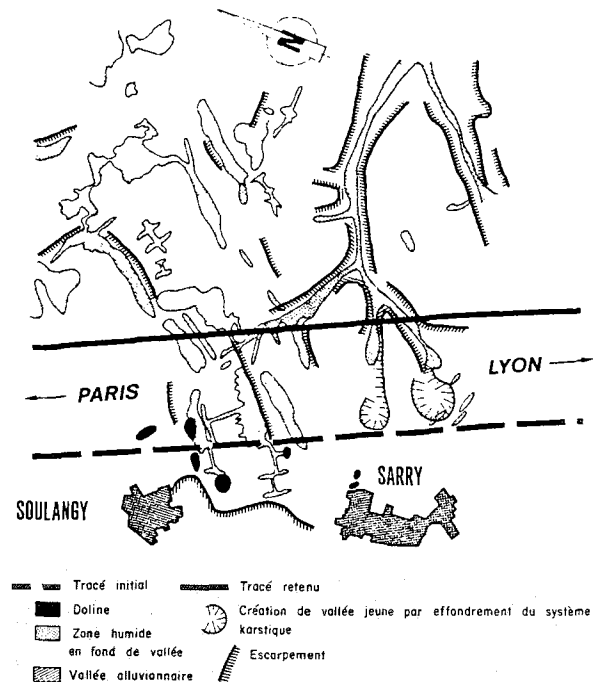


Fig. 3 : Schéma photo-interprétatif avec localisation des dolines et interprétation du réseau karstique sur un plateau calcaire. Recherche de tracé avec risque limité.

secteurs reconnus sensibles et ouvrir un dossier de recollage des différents incidents (diaclyse ouverte, cavités en talus ou en plate-forme, poche de remplissage. . .)

Après juxtaposition et critique des deux types d'études, une prospection complémentaire au niveau du fond de fouille sera lancée.

En résumé, ces méthodes préliminaires sont complémentaires et indispensables avant tout lancement de techniques



Fig. 4 : Gravimètre Lacoste et Romberg modèle D.

d'investigation plus sophistiquées. La compréhension du milieu, de son contexte et de son évolution possible facilite l'interprétation géotechnique et permet un diagnostic fin du traitement ultérieur.

3. Définition d'une méthodologie de reconnaissance

La recherche de cavités, quel que soit le domaine d'application, ne connaît pas de méthode miracle. Elle se réclame seulement d'un enchaînement logique fondé sur une prospection qui tient compte des enquêtes de terrain, du contexte géologique et des risques encourus. De plus, la nature linéaire de l'infrastructure, ainsi que les impératifs techniques liés à l'exploitation du réseau ferré, font que les méthodes de prospection nécessitent une adaptation constante, en fonction de chaque problème ponctuel à résoudre.

On serait tenté, dans le cas d'effondrement sur lignes existantes, d'aller droit au but, c'est-à-dire de chercher après les enquêtes préliminaires d'usage, de circonscrire la cavité et son évolution possible par des méthodes géotechniques performantes. En réalité, pour s'affranchir de ces problèmes sur infrastructure nouvelle, il faut franchir des étapes plus nombreuses avec des méthodes d'investigation plus globales destinées à localiser et bien préciser la nature des risques et les zones à traiter. Il convient d'examiner dans chacun des cas, la méthodologie de reconnaissance appliquée.

3.1. Etudes systématiques à l'occasion de construction de lignes nouvelles

A. Elements de base

Dès l'origine de l'étude, on appliquera à la recherche de tracé, des méthodes de détection appropriées, afin de déter-

miner un choix de tracé sans risque majeur. Ce ne sont pas là les propos de cet article, mais il convient de signaler que c'est là l'opération la plus déterminante. Quatre étapes fondamentales seront à franchir pour définir les secteurs de roches sensibles, tels que calcaire, craie, ou autre gypse.

(a) Calage du tracé à partir de méthodes préliminaires (enquêtes locales, géologie et hydrogéologie, photointerprétation).

(b) Etude géotechnique et technique des terrassements avec définition des zones à surveiller ou à conforter dans le cadre des travaux.

(c) Définition des zones sensibles après étude de toutes les anomalies rencontrées après suivi de chantiers.

(d) Contrôle de vérification par campagne géotechnique adaptée aux points réputés suspects.

Le dernier point est à rapprocher dans la stratégie de reconnaissance, des méthodes ponctuelles utilisées sur lignes existantes.

B. Techniques d'investigations

Avant d'examiner l'éventail des méthodes opérationnelles, il convient de préciser que l'application de certaines méthodes s'avère difficile, voire même impossible, du fait de certaines difficultés liées à leur mise en œuvre, à l'efficacité actuelle de certaines d'entre elles, ainsi qu'à des contraintes apportées par le contexte ferroviaire.

Pour une intervention sur les lignes existantes, les méthodes électriques sont *inopérantes*, du fait de la présence de "courants vagabonds" dans le sol, résultant de fuites dans le réseau d'électrification. La *prospection microsismique* est d'une mise en œuvre souvent délicate et n'est applicable que dans certains cas. Pour les travaux neufs, les *panneaux sismiques* (J. Lakshmanan *et al*, 1982) permettent l'étude de points de détail. L'auscultation par *radar* est une méthode très prometteuse pour la recherche de vides à faible profondeur, mais elle n'est encore qu'à un stade expérimental.

Les *diagraphies différées* (après forage) comprennent, entre autres :

- le rayonnement γ naturel
- le γ - γ (densité)
- le neutron-neutron (teneur en eau)
- le carottage sismique

Elles ne sont mises en œuvre que dans certains cas et en complément d'autres techniques. Les *méthodes les plus opérationnelles* sont la *microgravimétrie* et les contrôles par *sondages mécaniques avec enregistrements instantanés*. Elles ont été décrites en détail dans les articles mentionnés en référence.

Microgravimétrie

Cette méthode est basée sur des mesures de variation de pesanteur à l'aide d'un gravimètre (fig. 4). On procède dans un premier temps à une prospection microgravimétrique systématique des zones concernées, aboutissant à une *cartographie du terrain*, mettant en évidence les zones d'anomalies de masse, en relation avec d'éventuelles cavités. Suivant le contexte géologique, il peut être adopté un maillage de mesure allant de 10 m (phase de dégrossissage) à 3-4 m (phase de détail). Un maillage de départ de 4 à 5 m est plus généralement admis pour repérer des cavités de quelques dizaines de m³ à moins de 10 m sous un fond de fouille. Les profils de mesures sont calés de préférence sur l'axe des voies S.N.C.F. Un traitement sur ordinateur permet de transformer les cartes gravimétriques en cartes de densité, mettant mieux en évidence dans certains cas, des contrastes de masse (ex. fig. 5).

Sondages mécaniques avec enregistrements instantanés : Ce type de sondage est mis ensuite en œuvre pour contrôler

les anomalies suspectes. On utilise le plus souvent une sondeuse de type "wagon drill" et on enregistre en cours de forage, les paramètres de vitesse d'avancement et de percussion réfléchie (voir fig. 6). L'implantation, la profondeur et la quantité des sondages à réaliser sont définis en fonction de l'interprétation des anomalies gravimétriques. En cas de vides importants nécessitant de s'orienter vers un confortement du terrain, des forages peuvent être immédiatement équipés de tubes à "manchettes" en vue de travaux d'injections.



Fig. 6 : Foreuse avec enregistreur de paramètres - Déblai de Milly-la-Martine.

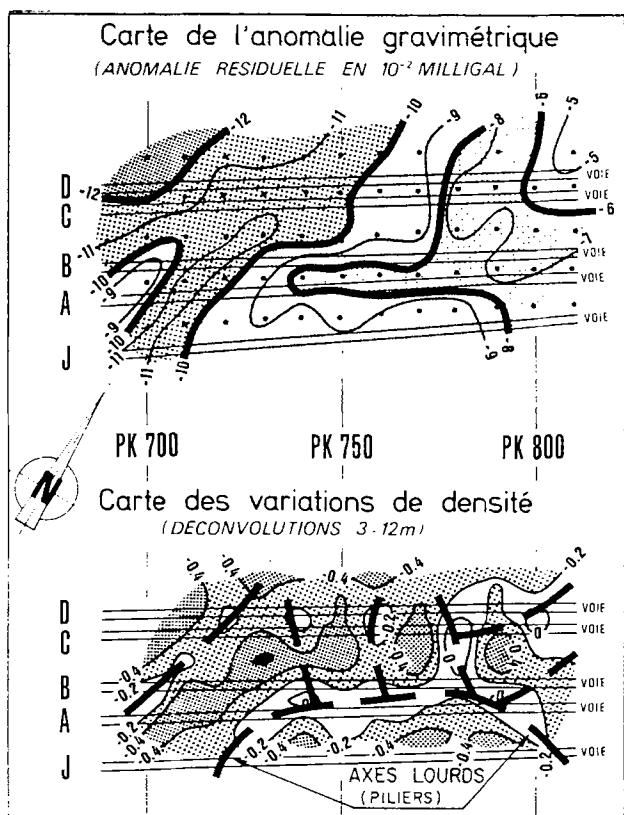


Fig. 5 : Gare d'Arras - Repérage de carrières souterraines remblayées. Transformation de la carte des anomalies gravimétriques en carte de variations de densité.

Photographies en forage :

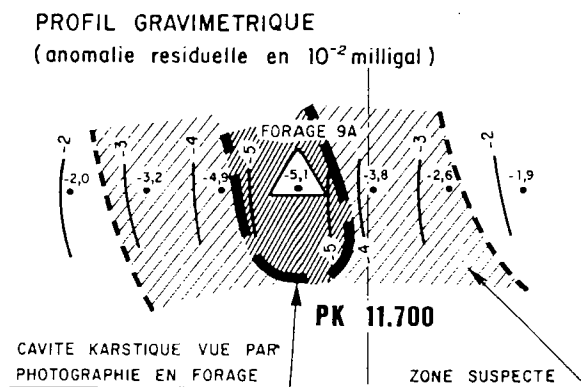
Pour préciser l'importance des vides décelés par les diagrapies instantanées en forage, il est possible d'effectuer immédiatement après l'exécution du forage, des photographies panoramiques des vides à une cote précise, définie par les diagrapies (voir fig. 7 et 8).

3.2. Reconnaissances ponctuelles de fontis sur lignes existantes

A.

A. Analyse des différents problèmes

L'infrastructure ferroviaire, vieille de cent à cent cinquante ans, a modifié grandement les cheminements et l'écoulement de l'eau superficielle et de sub-surface. Il y a parfois concentration d'eaux zénithales à l'amont des remblais, créant ainsi une réactivation de karsts fossiles avec des effondrements localisés... Ce type de phénomène est représentatif des terrains crayeux avec leur manteau d'argile à silex (voir ex. fig. 9). D'autres fois, la vidange brutale de



FORAGE DESTRUCTIF AVEC DIAGRAPHIES INSTANTANÉES

PERCUSSION REFLECHIE	PROF	VITESSE AVANCEMENT	COUPE INTERPRETEE
	0		remblai
	2		calcaire
	4		compact
ARRET PERCUSSION			calcaire
	6		vide franc
	8		fracture avec vides
	10		calcaire
	12		compact

0 50m/s² 0 500m/h FORAGE 9A

Fig. 7 : Voie express longeant la ligne TGV Paris-Lyon. Prospection microgravimétrique et contrôle par forage avec enregistrement de paramètres (vitesse d'avancement - percussion réfléchie).

champs d'inondation sur un substratum calcaire débouche les réseaux karstiques sous-jacents. Cette infrastructure S.N.C.F. rapportée a donc modifié le milieu, et elle vieillit et évolue avec son contexte naturel. Mais ces incidents

GROTTE DETECTEE PAR GRAVIMETRIE

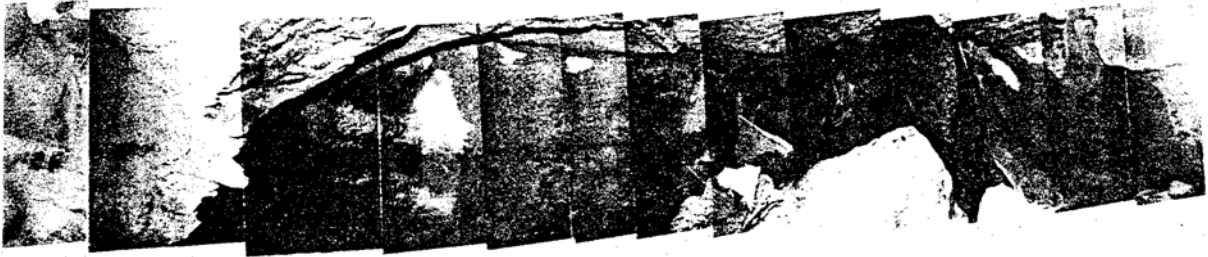


Fig. 8 : Photographie panoramique de la cavité karstique repérée par microgravimétrie et contrôlée par forage (fig. 7).

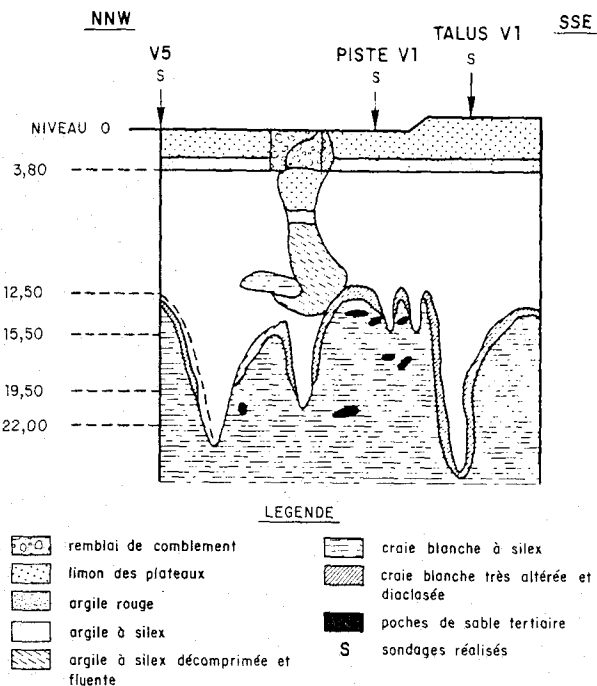


Fig. 9 : Réactivation du réseau karstique le long d'une plate-forme ferroviaire.

classiques et ponctuels se produisent sans obéir à des lois rigoureuses. Il faut donc procéder au coup par coup pour traiter ces apparitions souvent imprévisibles de fontis.

B. Techniques d'investigation

Les moyens de reconnaissance sont les mêmes que ceux décrits pour les lignes nouvelles. Il est à noter toutefois quelques remarques concernant la méthodologie et les moyens mis en œuvre.

Microgravimétrie

- Sur l'emprise S.N.C.F., exécution de 2 à 4 profils de mesure avec des points généralement espacés de 4 à 5 m, et resserrés localement de 2 à 3 m sur les zones suspectes.
- Dans le cas de mesures sur un remblai, exécution en complément de 1 à 2 profils en pied de remblai pour mieux localiser l'origine de la zone perturbée (dans le remblai ou dans la couche d'assise).

Sondages mécaniques avec enregistrements

Pour une intervention sur les voies nécessitant d'intervenir dans des intervalles de temps restreints, on utilisera de préférence une unité de sondage légère (ex. Wagon

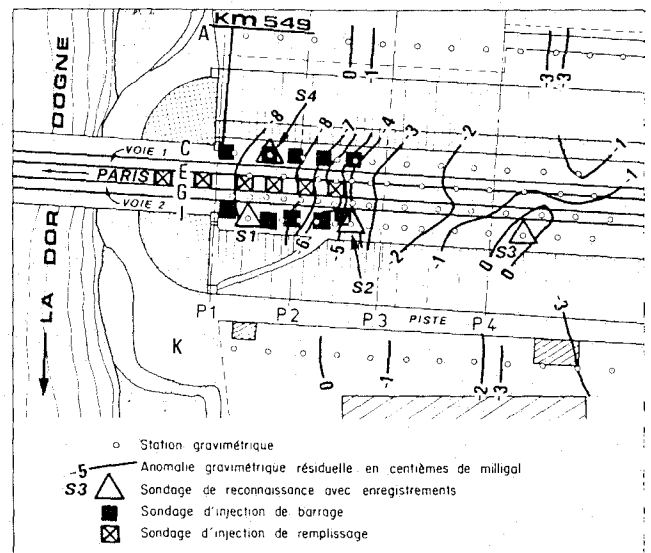


Fig. 10 : Pont S.N.C.F. sur la Dordogne à Libourne - Repérage de vides dans un remblai par microgravimétrie et forages avec enregistrements de paramètres - Confortement du remblai par injections.

Drill Montabert type CFL 67), équipée d'un enregistreur de paramètres de forage (vitesse d'avancement, percussion réfléchi). Dans le cas d'une étude en zone de remblai, des contrôles mécaniques, visant à reconnaître surtout le sol d'assise, pourront être effectués avec des moyens plus puissants à partir du pied de remblai (sondages inclinés à 45°). Les figures 10, 11 et 12 montrent un exemple d'étude réalisée sur un remblai à Libourne sur la ligne S.N.C.F. Bordeaux-Paris, où des vides et niveaux décomprimés ont été repérés par forages, suite à l'étude microgravimétrique, et confortés par injections. Ces méthodes d'investigation sont actuellement les méthodes les plus performantes pour une intervention sur le réseau S.N.C.F. existant.

4. Définition d'une méthodologie de traitement et de contrôle des travaux d'injection

Les diverses informations fournies par la prospection microgravimétrique, complétée par des sondages mécaniques avec enregistrement de paramètres, permettent de définir les zones nécessitant des travaux d'injections et

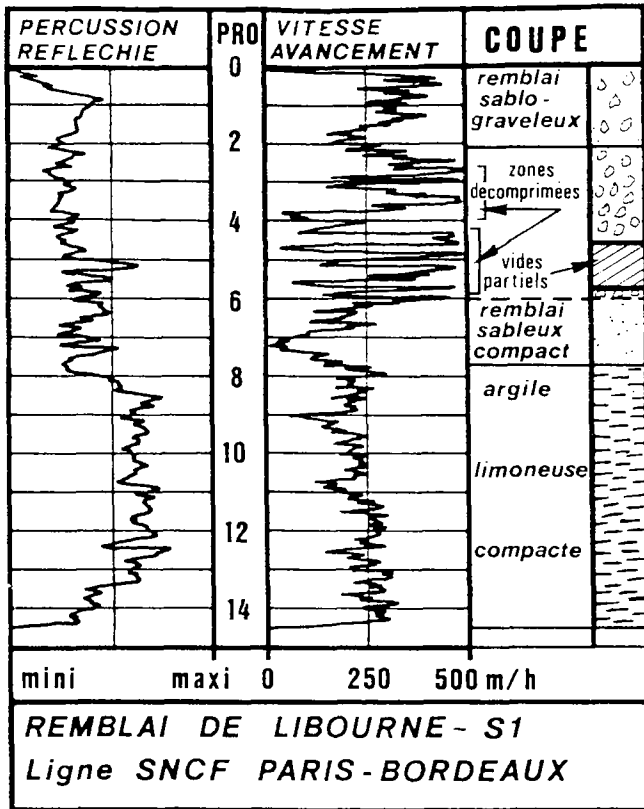


Fig. 11 : Remblai S.N.C.F. de Libourne - Diagraphie instantanée de forage en zone d'anomalie gravimétrique.

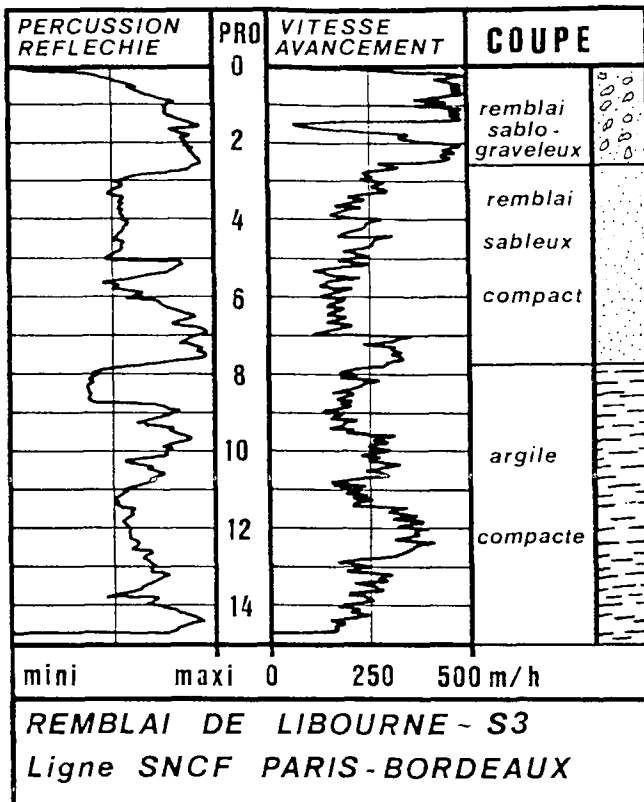


Fig. 12 : Remblai S.N.C.F. de Libourne - Diagraphie instantanée de forage hors anomalie gravimétrique.

de mettre au point un programme optimal de travaux. L'interprétation des enregistrements permet en particulier, de ne livrer à l'injection que les trous utiles à injecter et de mieux prévoir les quantités et les caractéristiques des coulis à mettre en œuvre.

4.1. Traitement des cavités

A. Prédiction des quantités à injecter

Un examen détaillé des diagraphies de forage permet au préalable de faire un estimatif sur les quantités à mettre en place, en se fixant une certaine superficie et une hauteur de terrain à traiter par point de forage. Ces informations peuvent être prises en compte dans l'établissement des marchés d'injections. L'exemple de la figure 13 montre sur un point de sondage de la campagne de confortement par injections d'un remblai S.N.C.F., les quantités injectées par rapport aux prévisions et compte tenu des pressions d'injection adoptées. Dans le cas de vides francs au sein d'un massif rocheux compact, l'observation de la vitesse d'avancement corrélée avec la percussion réfléchi, suffit en général pour estimer les pourcentages de vides. Dans le cas de terrains décomprimés ou remblayés où on peut envisager de monter en pression, il convient de prendre en compte plusieurs paramètres. On calcule à cet effet pour chaque forage, un indice ou "coefficient de vide" défini par la formule suivante (exemple d'un terrain essentiellement calcaire) :

$$I = \frac{(e_0 I_0 + e_1 I_1 + e_2 I_2 + e_3 I_3) \times 100}{(e_0 + e_1 + e_2 + e_3)}$$

avec $I_0 = 1,5$ (vide plus ou moins remblayé)
 $I_1 = 0,6$ (remblai)
 $I_2 = 0,4$ (terrain décomprimé)

Une telle analyse permet de cerner au mieux les quantités à mettre réellement en place. L'exemple figure 14 montre les corrélations obtenues entre un "coefficient de vides" calculé et des volumes réellement injectés, dans le cadre d'une opération de confortement effectuée dans le Tuffeau de Touraine.

B. Choix des matériaux à injecter

Dans tous les cas où on craint les extensions latérales de coulis, il convient de mettre en place en périphérie de la zone à traiter, un coulis plus dense, généralement à base de sablon, ciment, bentonite et silicate, avec une forte proportion de bentonite et de silicate. Pour le remplissage des vides et le colmatage des terrains décomprimés, on passe ensuite à un coulis plus fluide en diminuant les proportions de bentonite et de silicate (coulis de remplissage). En présence de vides francs importants, il est souhaitable dans certains cas, d'édifier des piliers résistants (coulis riche) au sein d'un remplissage initial plus pauvre, de manière à diminuer le coût des injections tout en assurant une tenue suffisante du terrain.

C. Mode de traitement

Injections profondes

La technique la plus souvent employée est la mise en place d'un coulis de barrage en périphérie de la zone à traiter (coulis plus dense) avant de passer à la phase de remplissage. Un tel procédé est indispensable, pour le traitement d'une zone karstifiée dont on connaît mal son extension latéralement et verticalement (zone faillée - Ex. déblai de Massilly - voir fig. 15). Dans un tel cas, on limite le traitement à l'emprise du projet en se fixant une hauteur

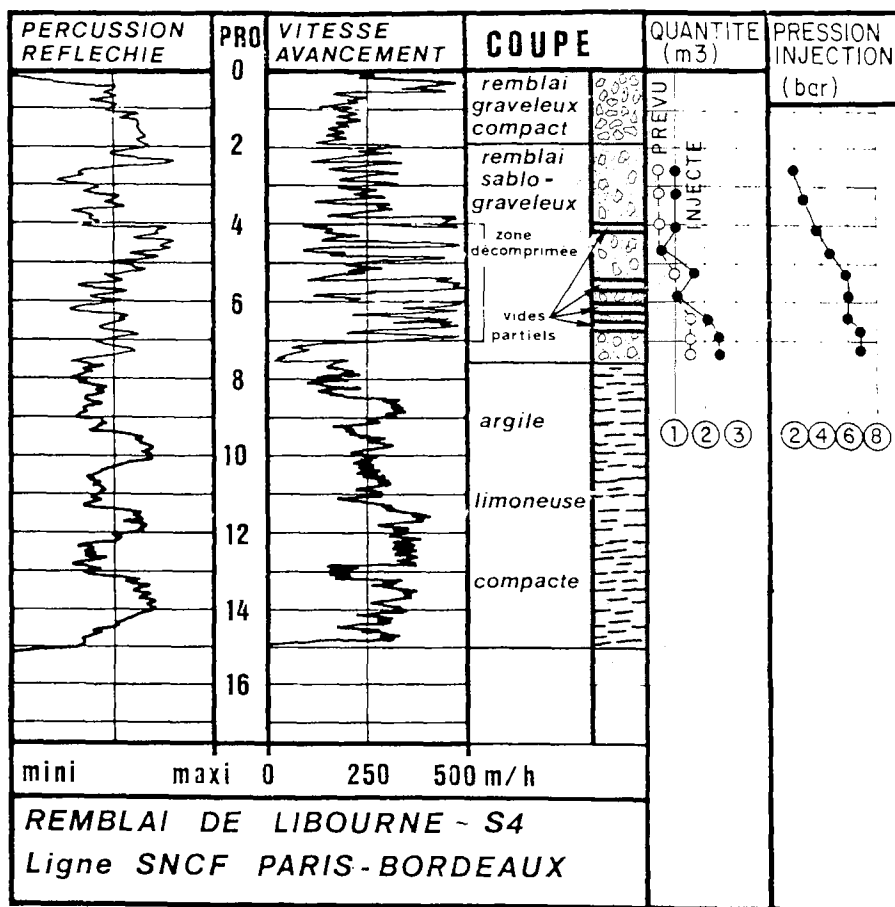


Fig. 13 : Remblai S.N.C.F. de Libourne - Exemple de diagraphie instantanée en forage exploitée pour la conduite des injections (pressions adoptées et quantités mises en oeuvre).

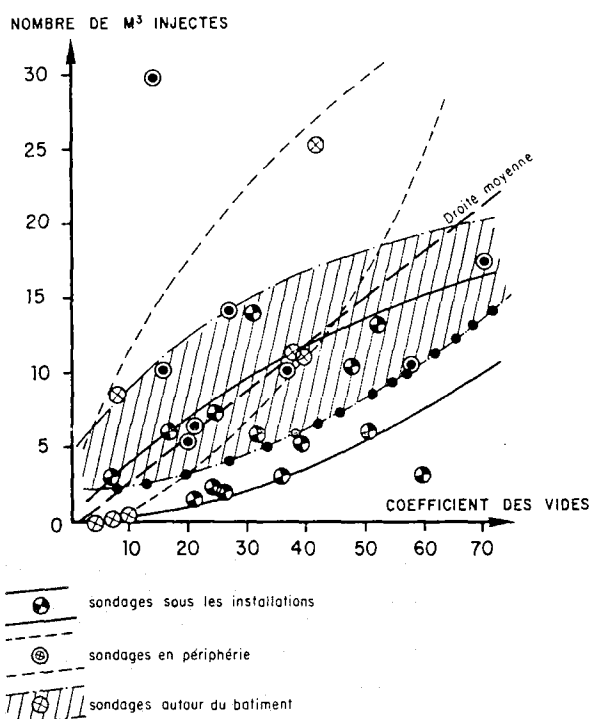


Fig. 14 : Confortement de galeries dans le Tuffeau de Touraine - Corrélation entre "coefficient de vides" et "volumes injectés".

de terrain à traiter. Les injections sont effectuées le plus souvent dans un tube à "manchettes" en démarrant du fond et en remontant par passes de 30 à 60 cm, en insistant en particulier au niveau des zones les plus décomprimées (niveaux indiqués par les diagraphies instantanées). On peut être amené à faire plusieurs passes d'injection à certains niveaux, jusqu'à atteindre la pression d'injection souhaitée. Les pressions d'injections sont fixées en fonction de la profondeur et du type de terrain. Pour le confortement de remblais S.N.C.F. sablo-graveleux, on adopte des pressions de 10 à 2 bars environ, lorsqu'on passe de 8-10 m à 2-3 m sous les voies. Un exemple de ce type est donné par la figure 13.

Clavage superficiel

Pour cette opération, on met en place un réseau de forages d'injections dont le maillage est défini en fonction du type de terrain et de l'épaisseur de la zone à traiter. Dans le cas d'une intervention sous des voies existantes, il est procédé à une injection par passes successives en contrôlant soigneusement la pression. Il est habituellement effectué des forages de 2,5 m en ϕ 42 à une maille de 2 m, la pression d'injection étant limitée à 2 bars.

4.2. Contrôles d'injection

Contrôle immédiat par forages

Après injections, il peut être procédé à des forages destructifs avec enregistrement de paramètres, ce qui permet de voir l'évolution du terrain, par comparaison avec les enregistrements effectués avant injection.

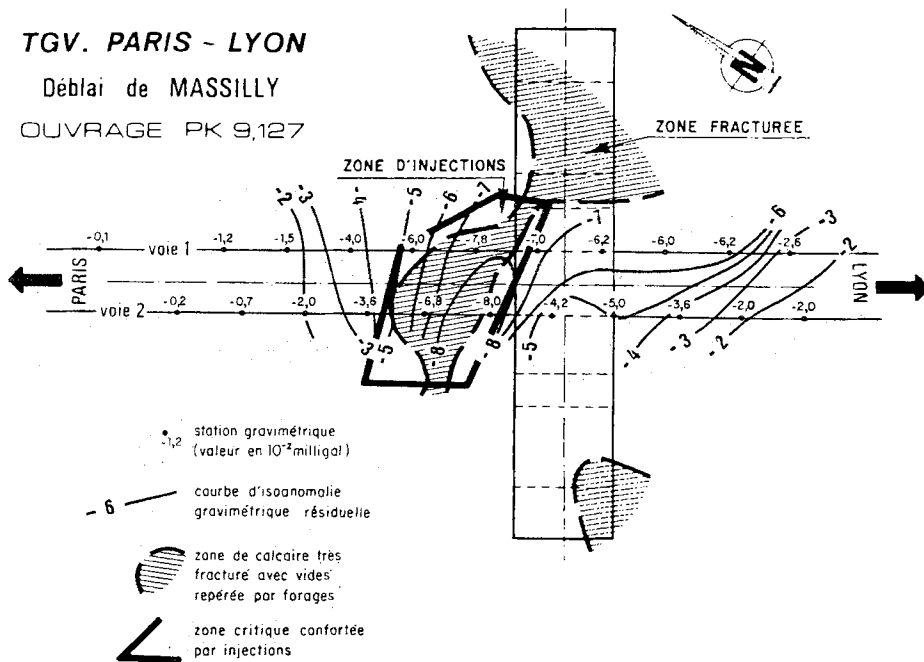


Fig. 15 : Ligne TGV Paris-Lyon - Déblai de Massilly - Repérage d'un réseau karstique à proximité d'un ouvrage, par microgravimétrie et traitement par injections.

Analyse plus détaillée

En plus des forages de contrôle, il peut être effectué des mesures gravimétriques après injections, permettant de localiser les zones insuffisamment injectées ou trop injectées (ex. remblai S.N.C.F. de Barsac - fig. 16). Un calcul sur ordinateur à partir d'un modèle géologique donné par des forages (calcul à densités variables) permet :

- de reconstituer une anomalie gravimétrique théorique avant injections, qui peut être comparée avec l'anomalie mesurée après injection,
 - d'évaluer les volumes à mettre en place, qui peuvent être comparés avec les volumes réellement injectés.
- L'exemple figure 17 montre un traitement effectué après injections, à Varangeville sur la ligne S.N.C.F. Paris-Strasbourg.

5. Exemples d'application

Etude de la karstification dans un déblai calcaire à proximité d'un ouvrage

L'exemple cité concerne la recherche de zones karstiques dans le fond d'un déblai de calcaire bathonien, à proximité d'un ouvrage existant, à Massilly, sur la ligne TGV Paris-Lyon. Comme l'indique la figure 15, il a été procédé au préalable à une prospection microgravimétrique du fond de déblai, qui a mis en évidence sur la bordure Nord de l'ouvrage, une anomalie suspecte de -6 à -8 centièmes de milligal. Cette anomalie correspondait, comme l'on montré ensuite des contrôles par sondages destructifs avec enregistrements de paramètres, à une zone de calcaire très fracturé avec des petits vides et du remplissage argileux (zone faillée

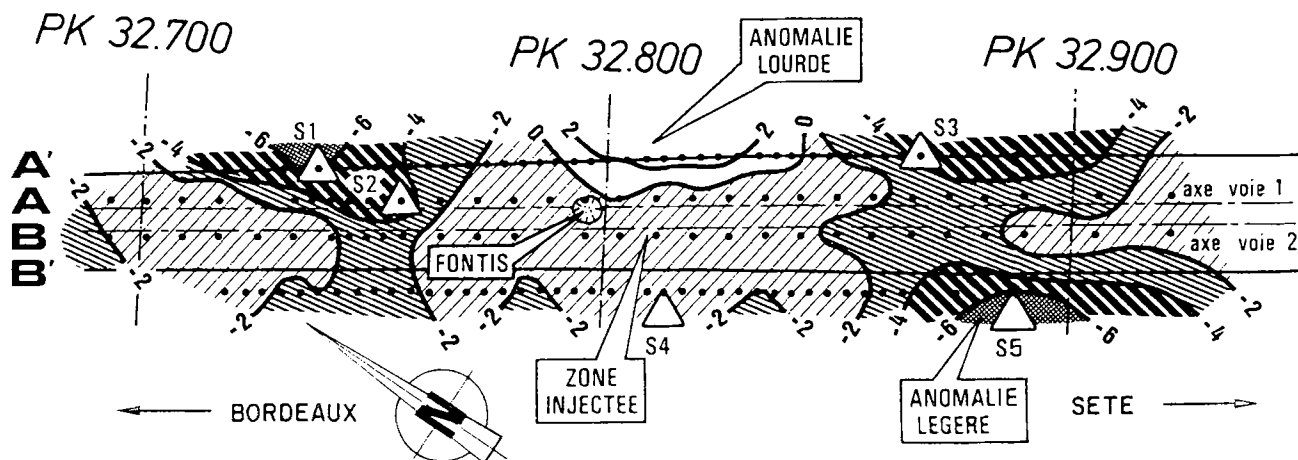


Fig. 16 : Barsac - Ligne S.N.C.F. Bordeaux-Sète - Repérage et traitement de cavités karstiques sous remblai.

recoupant le projet). La zone jugée critique a été traitée ensuite par injections.

Recherche et confortement de cavités sous un remblai

La figure 16 montre les résultats d'une prospection microgravimétrique effectuée à Barsac sur un remblai S.N.C.F. de 5 m et en pied de remblai. Cette étude met en évidence au centre de la zone, un terrain localement plus dense (anomalies atteignant +3 centièmes de milligal), correspondant à un secteur traité anciennement par injections, sans études particulières, suite à l'apparition brutale d'un fontis. On remarque en particulier, une migration du coulis en pied de talus côté voie 1. Aux deux extrémités de la zone, deux anomalies négatives de -2 à -6 centièmes de milligal, apparaissent en pied de talus et se prolongent sous le remblai. Une interprétation de ces anomalies et des contrôles par forages avec enregistrements de paramètres ont conclu à la présence de cavités karstiques localisées dans le sol d'assise calcaire, principalement entre 3 et 6 m sous le remblai.



Fig. 17 : Barsac - Ligne S.N.C.F. Bordeaux-Sète - Forage d'injection.

Pour stopper une éventuelle remontée de fontis, il a été effectué un confortement de ces deux zones de circulations karstiques, par des injections dans le sol calcaire sous la plate-forme à partir de sondages obliques en pied de remblai (voir photo figure 17) et en procédant au préalable à la mise en place de "rideaux d'injections" verticaux en pied de talus (injections de barrage).

Contrôle après injections en vue de compléter un traitement

L'exemple cité concerne la ligne S.N.C.F. Paris-Strasbourg sur le secteur de Varangeville, où il a été répertorié de nombreux incidents de sol, suite à des phénomènes de dissolution dans les formations sous-jacentes (dolomie, marnes à gypse...), qui montrent encore un caractère évolutif, malgré plusieurs opérations de traitement de sols par injections. Il a été procédé pour cela à une prospection microgravimétrique et à des forages de contrôles, avec enregistrement de paramètres, en vue d'orienter au mieux une nouvelle phase de travaux d'injections. La planche de la figure 18 montre, dans une zone déjà injectée, l'évolution d'une anomalie gravimétrique (anomalie mesurée) par rapport à une anomalie théorique calculée sur ordinateur

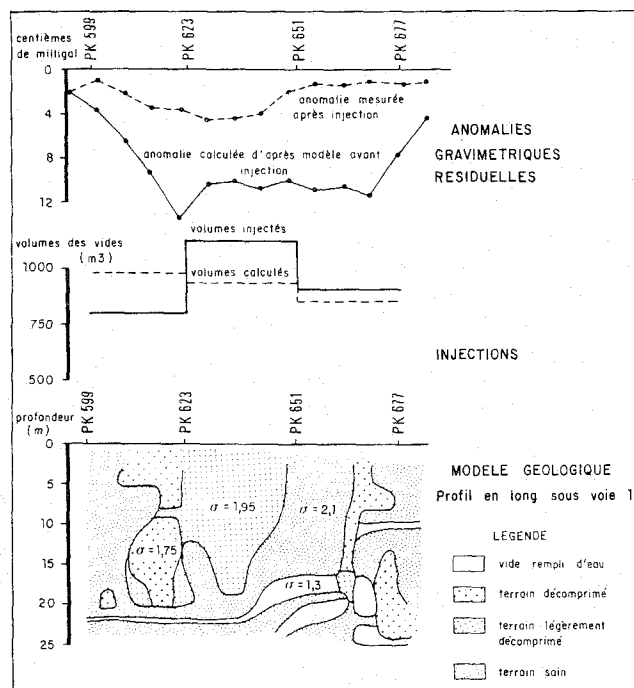


Fig. 18 : Varangeville - Ligne S.N.C.F. Paris-Strasbourg - Analyse à l'ordinateur d'une zone d'anomalie gravimétrique - Corrélations avec les injections.

à partir du modèle indiqué (modèle géologique établi d'après forages avant injections).

En corrélant les diagrammes de volumes injectés et estimés avant injections avec les profils gravimétriques, on constate très nettement :

- Dans la partie centrale du terrain, la subsistance après injections, d'une anomalie importante, alors que les injections réalisées sont supérieures aux prévisions (pertes vraisemblables de coulis à l'extérieur de l'emprise S.N.C.F.).
- Une injection satisfaisante pour la partie droite de la zone (injections conformes aux prévisions et absence d'anomalie gravimétrique).
- La présence d'une anomalie gravimétrique résiduelle, en partie gauche du modèle, se corrélant avec une zone insuffisamment injectée.

Cet exemple montre qu'une prospection microgravimétrique réalisée avant et après travaux d'injections peut constituer un moyen de contrôle efficace, en complément de sondages destructifs avec enregistrement de paramètres.

Références

- BARDOT F., ERLING J.C., GIROUSSE L., SIWERTZ E. (1979) : Les problèmes de cavités en milieu urbain. Colloque National, Lyon, mars 1979 : Connaître le sous-sol, un atout pour l'aménagement urbain.
- BERTRAND Y., BORDET C., DELETIE P., LAKSHMANAN J., PECKER A., SIGISMOND J. (1982) : Détermination *in situ* des propriétés dynamiques des roches pour les projets de centrales nucléaires. Association Internationale de la Géologie de l'Ingénieur, 4ème Congrès International New Delhi 1982.
- ERLING J.C., LAKSHMANAN J., ROUGE J. (1981) : Apport des diagraphies pour la réalisation d'injections de carrières effon-

- drées - Journées Nationales Géotechniques, Nantes, mars 1981.
- GRUPE DE TRAVAIL par HABIB M. et comprenant notamment LAKSHMANAN J. et ERLING J.C. (1979) : Recommandations sur le traitement des cavités souterraines et notamment des carrières (C.S. 78) - Annales de l'I.T.B.T.P. n° 370, mars 1979.
- LAKSHMANAN J., BICHARA M., ERLING J.C. (1977) : Etude de fondation en terrain caverneux. Place de la gravimétrie. Bulletin de Liaison, Laboratoire des Ponts et Chaussées, nov-déc 1977.
- MUDET M. (1977) : Méthodes d'étude et de détection de cavités souterraines. Application aux plate-formes ferroviaires. Thèse ingénieur CNAM.