

INDICES KARSTIQUES ET FONDATIONS EN TERRAIN CARBONATE

par

Christian MANGAN ¹

(8 figures)

RESUME. – En site carbonaté, les indices karstiques peuvent avoir des répercussions financières importantes sur le coût des fondations d'ouvrages par le biais des travaux de recherche, des délais de chantier et des adaptations spécifiques.

Ces difficultés sont particulièrement aiguës lorsqu'elles ne sont pas envisagées préalablement, surtout dans le cas des petits ouvrages qui disposent souvent de budgets d'études modestes.

La question est abordée à propos de l'aménagement en cours du Parc International d'Activités de Valbonne – Sophia-Antipolis, engagé depuis dix ans dans la région niçoise (06 – France) et confronté régulièrement à ce type de problème.

La présentation des conditions naturelles du site et l'examen de quatre exemples-types de chantiers permettent de souligner les principales contraintes liées à la reconnaissance et au traitement des indices karstiques dans le cadre des travaux.

ABSTRACT. – Karst Phenomena and Foundations on Carbonate Terrain.

For building sites located on carbonate terrain, karst phenomena can have important financial effects on the cost of structure foundations due to the research operations, the construction delay and the necessary specific adjustments.

These problems are particularly acute when they are not considered in advance, especially in the case of small structures which often have small budgets.

This question is dealt with in connection with the development of the International Activity Park of Valbonne – Sophia-Antipolis, which has been taking place for ten years in the Nice area (06 – France) and which is regularly confronted with this kind of problem.

The presentation of the natural conditions of the site, and the study of four typical examples of building locations, show the major obligations related to the prospection and the treatment of karst phenomena for foundation works.

Dans le cadre des travaux d'aménagement en sites karstiques, la fondation des ouvrages de génie civil peut poser de sérieuses difficultés et entraîner des surcoûts notables.

On constate, en outre, trop souvent sur ces chantiers, l'ignorance et la crainte qui entourent la découverte d'une cavité. Sa visite est rarement effectuée; elle est fréquemment masquée ou colmatée par des cailloutis ou du coulis. Le traitement n'est pas toujours à l'échelle de l'hétérogénéité rencontrée : parfois nul, d'autres fois trop confortable, souvent mal adapté aux conditions locales.

Ce problème est évoqué à propos de l'aménagement en cours d'un secteur très karstifié de la région niçoise (plateau de Valbonne), à travers quatre exemples distincts qui caractérisent assez bien les conditions locales.

Cette note se propose de souligner les principales difficultés rencontrées dans la reconnaissance et le traitement des indices karstiques, à travers l'expérience acquise dans ce domaine par le C.E.T.E. MEDITERRANEE dans le Sud-Est de la France.

1. – LE SITE

Le secteur considéré est situé au Sud des Alpes-Maritimes (France), à cheval sur plusieurs communes (fig. 1).

Géologiquement, il s'agit d'une ossature carbonatée d'âge jurassique, reposant sur le socle cristallin des

¹ C.E.T.E. Méditerranée, Laboratoire de Nice (06- France).

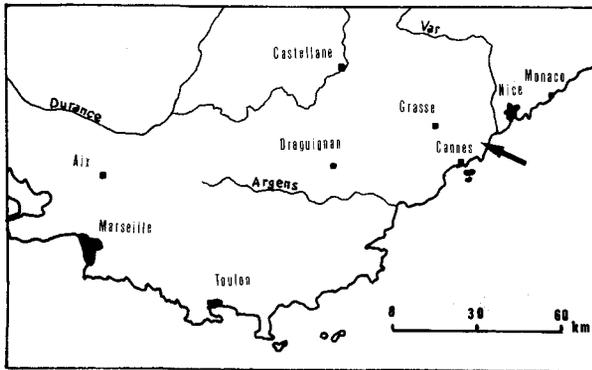


Figure 1. - Situation.

Maures et du Tanneron par l'intermédiaire d'une puissante assise argilo-marneuse du Trias.

La région est profondément marquée par une structure très complexe, liée à des tectoniques superposées, et une histoire sédimentaire variée, au cours de laquelle l'alternance de transgressions et de régressions marines a déterminé une succession d'épisodes de karstification et de périodes de remblaiement.

A noter enfin, l'intercalation, au sein des formations calcaires concernées, d'un horizon argileux étanche qui détermine deux aquifères superposés : un aquifère inférieur, d'âge Bajocien, et un aquifère supérieur, d'âge Bathonien.

2. - L'AMENAGEMENT

Les plateaux de Valbonne sont l'objet d'un aménagement intensif, engagé depuis une dizaine d'années (Parc International d'Activités de Valbonne-Sophia Antipolis).

Les réalisations sont multiples et variées : axes routiers, réseaux divers, équipements publics, établissements industriels, centres de recherches, bâtiments d'habitations, ...

Nombreuses sont les contraintes d'intégration au site et de protection du milieu naturel, parmi lesquelles l'incidence des phénomènes karstiques sur la fondation des ouvrages a très vite pris une place importante : ce problème s'est en effet posé sur la majorité des chantiers et sa résolution a nécessité des adaptations spécifiques.

3. - PREMIER EXEMPLE : SITE A (ANTIBES)

Il s'agit d'un terrain de 25 ha sur lequel était programmée la réalisation de 900 logements en bâtiments collectifs et individuels.

Une reconnaissance préliminaire du site a permis :

- d'une part, de préciser sa structure géologique et de reconnaître un affleurement médian d'argile séparant

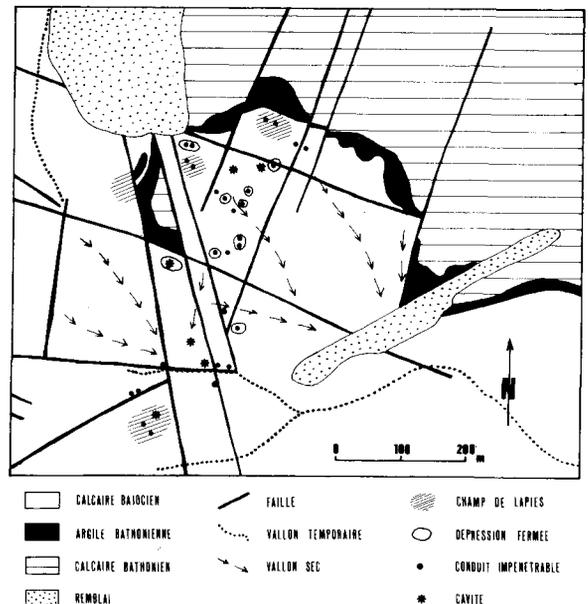


Figure 2. - Site A : Géologie et indices karstiques.

Figure 2. - Site A : Geological map showing karst phenomena

les deux aquifères;

- d'autre part, de déterminer l'état de karstification du soubassement carbonaté qui constitue l'ossature principale de la propriété (fig. 2).

L'aquifère supérieur (Bathonien) s'est révélé peu karstifié, du fait de l'intercalation de niveaux argilo-marneux caractérisant la base de la série sur les dix mètres qui surmontent directement son radier argileux.

L'aquifère inférieur (Bajocien) indiquait par contre une karstification très avancée, bien que les indices superficiels soient fréquemment masqués par un sol résiduel et un couvert végétal dense. Les formes exokarstiques étaient variées : lapiés, conduits verticaux, vallons secs, petites dépressions fermées (3 à 10 m de ϕ), effondrements de lapiaz. La pénétration souterraine s'est avérée difficile en raison de l'étroitesse des conduits et de l'importance du colmatage superficiel; la désobstruction des points les plus favorables a néanmoins permis de visiter plusieurs cavités et de reconnaître des formes endokarstiques typiques.

Cette simple analyse précoce du terrain a fourni des renseignements précieux permettant de hiérarchiser les divers secteurs en fonction du degré de karstification du milieu et, par là-même, d'orienter efficacement le plan-masse du projet. On retiendra en particulier :

- la différenciation entre un Bathonien septentrional à karstification négligeable et un Bajocien central et méridional à karstification omniprésente;
- au sein même du Bajocien, l'individualisation d'une bande subméridienne d'environ 200 m de large, intensément karstifiée et calée sur un axe tectonique majeur;
- au niveau de la zone la plus karstifiée, un caverne-

ment important, correspondant à un réseau ancien très colmaté et démantelé en nombreux tronçons discontinus.

4. - DEUXIEME EXEMPLE : SITE B (VALBONNE)

Lors de l'implantation d'un laboratoire de recherches, les travaux de terrassement ont mis à jour plusieurs cavités et divers indices moindres, tant en fond de fouille que dans les talus.

Le bâtiment envisagé comprenait deux niveaux, dont un partiellement en sous-sol. La fouille a été réalisée essentiellement en déblai par création de deux plates-formes étagées (fig. 4).

Géologiquement, l'ossature du site est constituée par les calcaires du Bajocien (aquifère inférieur).

Les indices karstiques pénétrables ont été visités et topographiés au fur et à mesure de leur découverte et de l'avancement du chantier, parfois après des opérations de déblayage.

Néanmoins, devant l'importance du cavernement reconnu et les fréquents obstacles à la pénétration humaine, il a paru nécessaire de procéder à des vérifications en fond de fouille sous l'emprise des bâtiments; 85 forages de 4 à 7 m de profondeur ont ainsi été réalisés au wagon-drill en fonction de la répartition des descentes de charge et de l'extension des principaux vides décelés;

Ces investigations tant directes qu'indirectes ont permis d'obtenir les renseignements suivants :

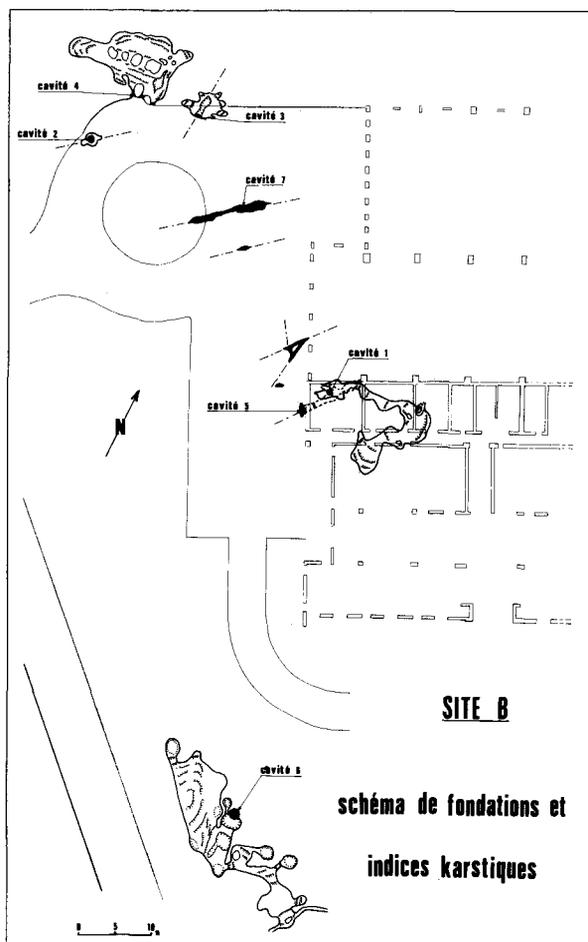


Figure 3. - Site B : Schéma de fondations et indices karstiques.
Figure 3. - Site B : Diagram of foundations and karst phenomena

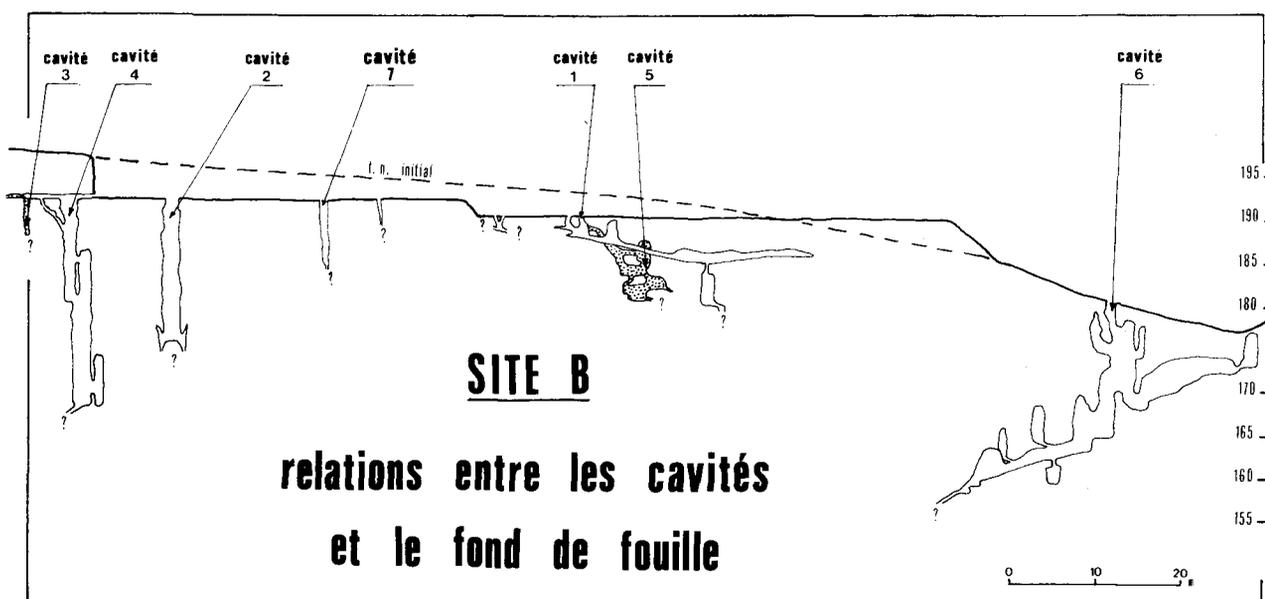


Figure 4. - Site B : Profil montrant les relations entre les cavités et le fond de la fouille.
Figure 4. - Site B : Cross section showing relationship between the cavities and the excavation floor.

- a) les indices souterrains directement gênants pour le projet sont tous situés en bordure sud-ouest du site, le long d'un axe tectonique majeur reconnu par ailleurs (fig. 3);
- b) il s'agit de tronçons disséminés d'un même réseau très colmaté dans lequel on reconnaît les principales formes élémentaires : puits, galeries et salles (fig. 4);
- c) le drainage pérenne est profond et s'effectue une centaine de mètres plus bas en direction du Nord. Ce réseau présente pourtant des écoulements temporaires et transfère vers la profondeur les ruissellements issus des argiles périphériques et les pertes du vallon bordier (surcreusements du remplissage des galeries, nettoyage total des puits);
- d) les parois et la voûte des galeries ne montrent aucune trace de désordre. Les puits ouverts par les terrassements sont par contre systématiquement bouchés plus ou moins profondément par éboulement de leur toit (cavités 2, 3 et 7).

Au niveau du traitement, nombre d'indices n'intéressent que la voirie et les parkings (cavités 2, 3, 4 et 7) et présentent un développement essentiellement vertical; ils ont été remblayés par du matériau drainant compacté et recouvert d'une galette de béton.

Les vides développés sous le bâtiment étaient par contre plus contraignants :

- pour les indices isolés facilement accessibles, le niveau de fondation des semelles a été descendu au-delà des anomalies;
- dans les autres cas, il a fallu modifier le schéma de fondation (semelles filantes rigidifiées) et (ou) remplir les conduits souterrains majeurs après réalisation in situ de bouchons colmatants en tête du puits de la cavité 1 et au niveau du premier ressaut de la cavité 5, ceci afin de ne traiter que les zones de risque pour le bâtiment sans perturber les parties les plus profondes du réseau.

5. - TROISIEME EXEMPLE : SITE C (VALBONNE)

L'analyse de ce problème a été faite tardivement, après que l'entreprise eut tenté sans succès l'injection de plusieurs indices karstiques.

Les travaux concernaient la construction d'un centre de recherche à 2 et 3 niveaux, ayant nécessité l'ouverture d'une fouille de plusieurs mètres de profondeur.

Le site s'inscrit au sommet d'une petite butte entièrement constituée par les formations calcaires bathoniennes de l'aquifère supérieur. Le soubassement argileux est situé vers 35 m de profondeur et étanche le fond d'une gouttière synclinale, barrée transversalement par des accidents injectés d'argile. Bien qu'un exutoire pérenne existe en pied de versant, la nappe

est relativement haute et montre des fluctuations importantes, en raison de la perméabilité moindre des assises de base qui constituent une véritable masse-tampon (intercalation de niveaux argileux et marneux). Des piézomètres mis en place précocement ont permis de suivre le niveau statique qui se situe généralement 20 à 25 m sous le fond de fouille; lors des épisodes pluvieux soutenus, l'amplitude des remontées dépasse 10 m et un exutoire temporaire évacue le trop-plein.

Les indices observés en fond de fouille sont, pour l'essentiel, représentés par des conduits horizontaux colmatés par des argiles résiduelles et des diaclases verticales faiblement élargies par la dissolution. Nombre de ces indices ont été remblayés initialement par bétonnage, mais trois points ont néanmoins permis une investigation souterraine (fig. 5).

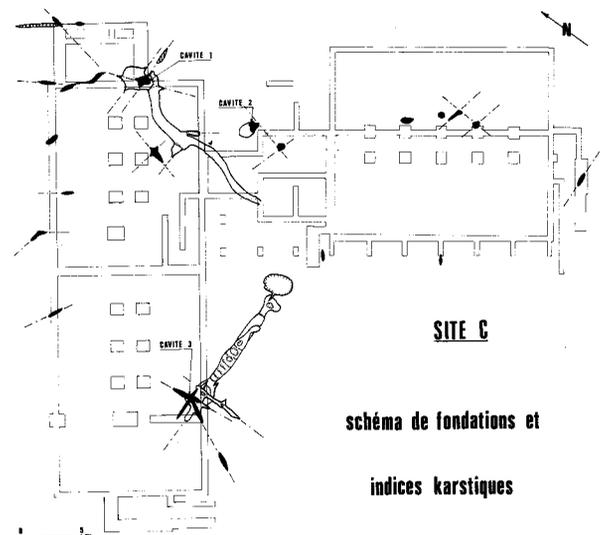


Figure 5. - Site C : Schéma de fondations et indices karstiques.
Figure 5. - Site C : Diagram of foundations and karst phenomena

Si les cavités 1 et 2 sont de simples puits obturés à faible profondeur par les produits d'écroulement de leur toit, la cavité 3 fournit par contre un véritable regard sur la nappe souterraine. Les conduits sont calés sur le réseau de diaclases et sont organisés en ressauts successifs assurant le transfert vertical des infiltrations jusqu'à la zone noyée. A noter également l'existence de galeries horizontales très colmatées, telle celle de la cavité 2 qui se développe 3 m à peine sous le fond de fouille (fig. 6).

La reconnaissance a été complétée par des perforations de contrôle sous les appuis mais, en raison des impératifs de délais, le traitement de l'assise a été mené en parallèle sur la base des options suivantes :

- suppression de tous les appuis ponctuels et liaison par des semelles filantes;

- prise en compte d'une condition de fontis de 3 m ;
- remplissage par du béton cyclopéen des 3 cavités, après mise en place d'un bouchon en tête du premier ressaut de la cavité 3 afin d'éviter tout colmatage des

conduits actifs profonds et tout accroissement de la mise en charge du massif lors des épisodes de crue.

6. - QUATRIEME EXEMPLE : SITE D (VALBONNE)

Ce cas concerne l'incidence des indices karstiques sur la fondation d'un gros bâtiment à 3 niveaux dont un sous-sol.

Les travaux ont nécessité des tirs de mine très importants pour ouvrir une fouille de 4 à 11 m de profondeur dans les calcaires du Bathonien (aquifère supérieur).

Une étude préalable avait montré que l'horizon argileux se situait vers 25 à 30 m de profondeur et que la nappe susjacente était stabilisée à - 17,50 m avec des fluctuations relativement faibles (amplitude de quelques mètres).

La karstification s'est rapidement avérée très importante, ce qui a imposé la réalisation systématique de perforations de contrôle sous les appuis.

La majorité des indices ainsi décelés a pu être analysée de visu (fig. 7) :

- les talus ont révélé plusieurs cavités entièrement comblées par des formations plus récentes (marne caillouteuse oligocène, argile résiduelle plio- quaternaire) ;
- un puits subcirculaire de 3 m de diamètre et 15 m de profondeur a été ouvert par le terrassement en bordure amont de la fouille ; il donnait accès à une courte galerie parcourue par un filet d'eau (cavité 1) ;

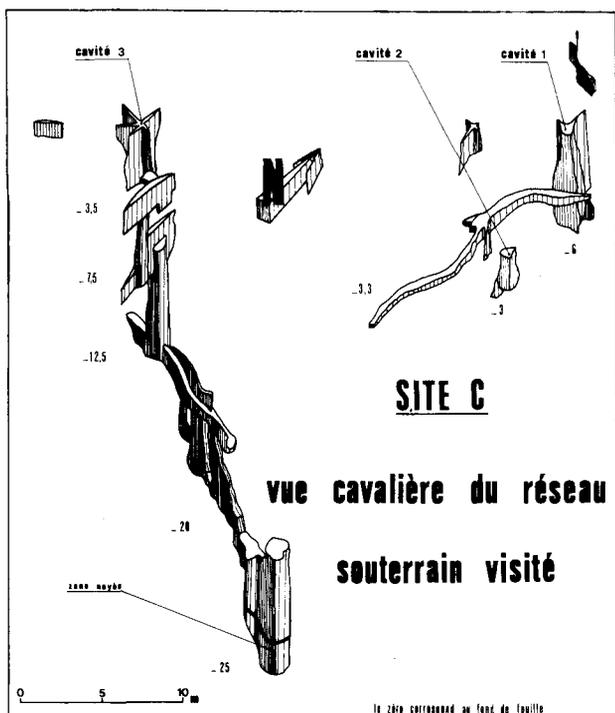


Figure 6. - Site C : Vue cavalière du réseau visité.

Figure 6. - Isometric projection of the explored underground network.

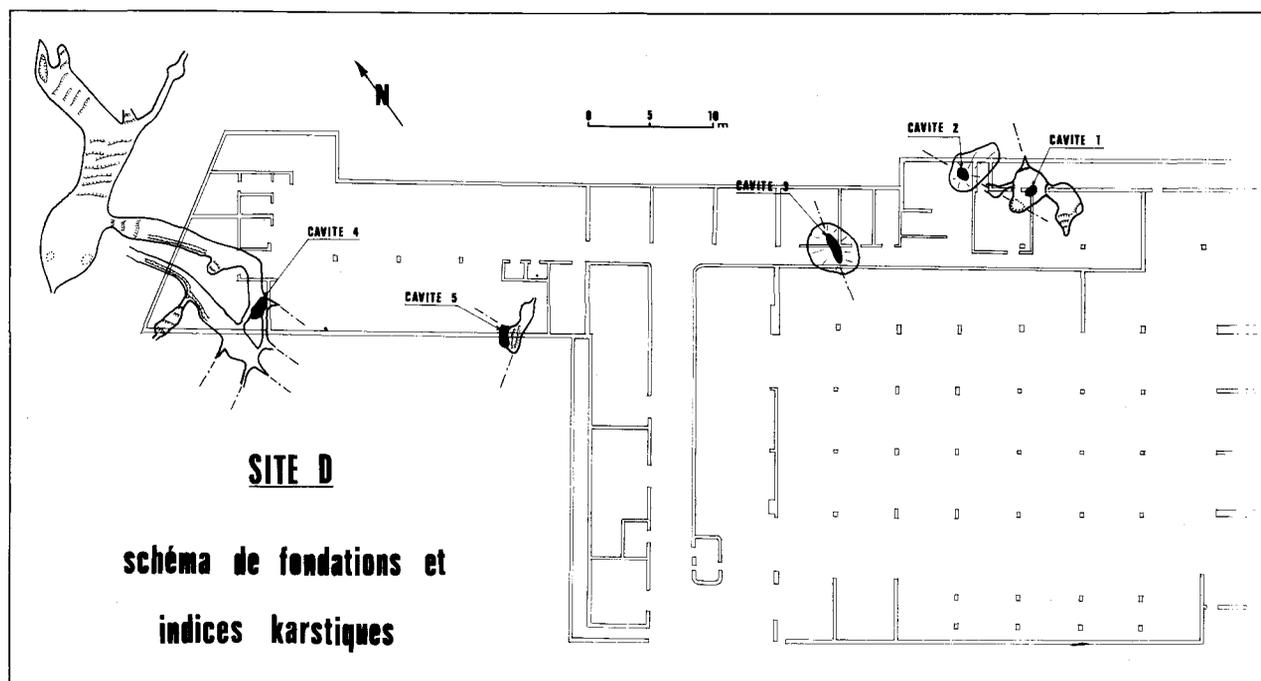


Figure 7. - Site D : Schéma de fondations et indices karstiques.

Figure 7. - Site D : Diagram of foundations and karst phenomena.

- les cavités 2, 3 et 5 ont été mises à jour par éboulement de leur toit sous l'effet des tirs de mine; il s'agit de puits bouchés à quelques mètres de profondeur par les produits éboulés;
- la cavité 4 a été découverte par une tranchée creusée dans une zone très suspecte mise en évidence par les forages de vérification, au nord-ouest de la fouille. 100 m de galeries de bonne dimension ont été visitées et topographiées sous 1 à 4 m de couverture seulement (fig. 8). Cette cavité a en outre fourni d'autres renseignements d'intérêt :

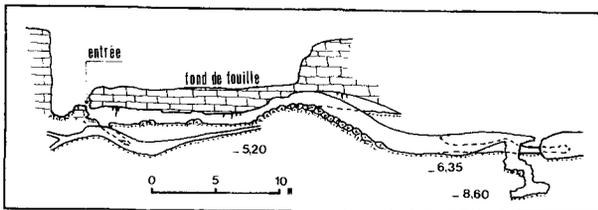


Figure 8. - Site D : Profil développé de la cavité n° 4.
 Figure 8. - Site D : Developed cross-section of cavity nr 4.

1. le sol des galeries est recouvert d'un épais remplissage argileux (1 à 2 m);
2. dans plusieurs sections, les tirs de mine ont engendré une intense fracturation de la voûte et d'importants éboulements;
3. dans la partie la plus profonde de la cavité (-5 à -9 m), des surcreusements du remplissage et des traces d'ennoyage du puits terminal témoignent du rôle temporairement actif de cette zone.

A l'issue de cette reconnaissance, les adaptations suivantes ont été retenues :

- a) remblaiement des puits (cavités 1, 2, 3 et 5) par du matériau drainant recouvert de 2 m de béton;
- b) ouverture de la voûte des deux galeries de la cavité 4 situées sous le projet et remblaiement total par du béton après curage de l'argile colmatant le radier;
- c) modification du schéma de fondation dans les secteurs où subsiste un doute.

7. - CONCLUSIONS

Dans un tel site où coexistent à la fois une karstification ancienne et très évoluée, une grande complexité structurale et des conditions lithologiques particulières, il est difficilement envisageable de recourir de façon économique et fiable aux moyens classiques d'investigation pour prévoir l'importance et le positionnement des indices karstiques dans l'espace.

Une analyse préalable de surface permet, dans certains cas, de bien sérier le problème et d'envisager une optimisation de la reconnaissance avant l'aménagement (site A).

La plupart du temps, il faut pourtant attendre le début des travaux pour suivre les terrassements, pratiquer des perforations de contrôle sous les appuis et visiter les cavités mises à jour.

La visite in situ est très importante car elle permet de situer précisément l'extension des indices par rapport au projet, de vérifier leur développement et leur importance et de faire tous les relevés et observations nécessaires à l'élaboration du traitement (nature et puissance du remplissage, stabilité des voûtes et des parois, structure interne, rôle hydrologique des divers tronçons).

On peut en outre tirer les enseignements suivants pour des cas similaires :

- a) prévoir, si possible dès l'origine, un temps de décalage entre la phase terrassement et la phase construction, afin de ne pas retarder l'avancement du chantier lors des reconnaissances karstiques;
- b) limiter les tirs de mine, afin de ne pas aggraver le problème de fondation;
- c) ne pas niveler trop tôt le fond de fouille, afin de permettre une analyse du terrain à l'état brut;
- d) faire intervenir sur le site un géologue ayant l'expérience des phénomènes karstiques;
- e) adapter le traitement aux conditions locales; se méfier en particulier du contexte hydrogéologique.