

Thème III

mouvements de terrains induits d'origine anthropique à l'exclusion de leur seule détection

Dans leur ensemble, ces vides souterrains représentent un danger à cause des risques d'instabilité des terrains environnants qu'ils peuvent provoquer. Dans des cas extrêmes, cette instabilité peut entraîner des catastrophes comme celle de Clamart en 1961, mais ce serait une erreur grave d'associer systématiquement l'existence de ces vides avec l'éventualité d'une telle catastrophe, ne serait-ce que parce que, en dehors de la région parisienne, les anciennes carrières reconnues sont souvent situées sous des terrains agricoles.

Il est vrai que souvent ces vides souterrains sont situés au voisinage d'agglomérations importantes (Lille, Caen, ...) dont ils gênent l'extension. Mais, même dans ces cas, le comblement aveugle et systématique de ces vides n'est pas forcément la meilleure solution, d'abord parce qu'il n'est pas forcément réalisable immédiatement, en raison des volumes considérables impliqués (de l'ordre du million de m³ pour les grandes carrières du Nord par exemple), ensuite parce qu'il ne garantit pas nécessairement qu'il n'y ait plus de tassement de la surface, et enfin parce que si ces vides s'avéraient stables, ils pourraient constituer, moyennant des aménagements, des volumes utilisables à des fins de stockage, de culture, d'abris, etc.

Dans la suite de ce rapport, nous examinerons les trois questions de fond que posent ainsi ces vides souterrains, à savoir :

- comment en évaluer la stabilité à un moment donné et préciser les éventuels risques d'instabilité;
- comment contrôler l'évolution de cette stabilité;
- enfin, comment stabiliser les terrains.

1 Comment évaluer la stabilité des anciennes exploitations souterraines à un moment donné

Ce problème a fait l'objet de nombreux travaux, en particulier par le Cerchar, et M. Schwartzmann présente dans sa publication un ensemble complet de moyens d'étude in situ et une méthode de travail qui sont maintenant tout à fait opérationnels.

Bertrand et al., dans leur étude de stabilité d'une carrière soumise à l'influence du trafic routier lourd, utilisent la même méthode de travail.

Dans son principe, cette étude de stabilité consiste à évaluer d'une part la sollicitation tolérable pour le matériau, et d'autre part la charge qui lui est imposée afin de comparer ces deux termes.

La difficulté du problème réside dans la détermination de ces deux grandeurs.

En effet, les sollicitations régnant dans le massif sont variables parce que les dimensions des chambres et piliers sont elles-mêmes variables et parce que les discontinuités et hétérogénéités des terrains provoquent parfois des concentrations d'efforts dans certaines zones et des détentes en d'autres points. La figure 2 illustre ce dernier point en montrant les répartitions de contraintes verticales qui peuvent être obtenues sur un pilier selon les caractéristiques de fracturation du toit (Bonvallet [1]). Ces sollicitations régnant dans le matériau peuvent être évaluées soit au moyen de modèles (aire tributaire, poutre, plaque, modèles de blocs, etc.) ou mesurées in situ par les méthodes du vérin plat ou de surcarottage présentées dans la communication de R. Schwartzmann. Dans tous les cas, cette évaluation doit reposer sur un grand nombre de mesures pour être crédible.

La sollicitation tolérable dans le matériau est difficile à déterminer; en outre c'est une grandeur dispersée.

Ainsi, pour un matériau et un ouvrage donnés, il importe de préciser laquelle des grandeurs mécaniques suivantes sera prise en compte dans le calcul :

- la limite de fluage, ou résistance ultime,
- la limite élastique,
- la résistance instantanée.

Suivant le type d'exploitation et la nature du matériau, les conceptions varient avec les auteurs. Il s'agit là d'un sujet d'étude certainement à développer, car, si le choix de la résistance instantanée conduit à des résultats optimistes, la prise en compte de la limite de fluage peut être critiquée d'un double point de vue : d'une part sa détermination expérimentale pose des problèmes en raison de l'absence de normalisation, de la durée toujours courte des essais et de la taille faible des échantillons vis-à-vis des durées et grandeurs réelles des piliers; d'autre part, on constate que certaines exploitations de craie, à fort taux de défruitement, où règnent des contraintes qui ont été mesurées in situ et qui sont largement supérieures à la limite de fluage, sont stables depuis plusieurs siècles.

La dispersion de ces grandeurs de résistance a été étudiée par de nombreux auteurs (Coates [2] par exemple) et son étude a fait l'objet d'autres journées géotechniques.

La comparaison de la résistance du matériau et de la sollicitation qui lui est imposée est un problème simple pour les statisticiens, et Bonvallet et Chambon [3] ont proposé de construire l'histogramme de tous les rapports possibles entre les résistances mesurées et les valeurs des sollicitations calculées ou mesurées. Sur un tel histogramme, comme sur la figure 3, on peut déterminer le plus petit coefficient de sécurité, en lui attachant, en outre, une probabilité de mise en défaut.

Chronologiquement, une étude de stabilité peut être découpée en quatre phases faisant intervenir les moyens d'étude de plus en plus performants au fur et à mesure qu'on cherche à affiner le diagnostic final. Le schéma de principe en est le suivant, tel que proposé par Bonvallet [1] (fig. 4).

Étape 1 : connaissance du problème posé par la carrière.

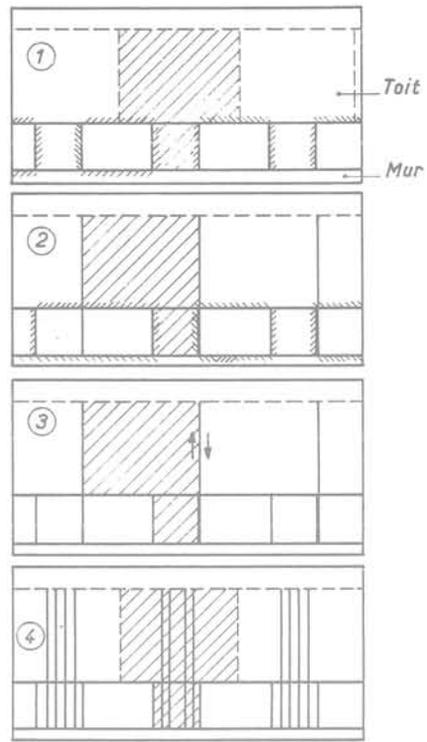
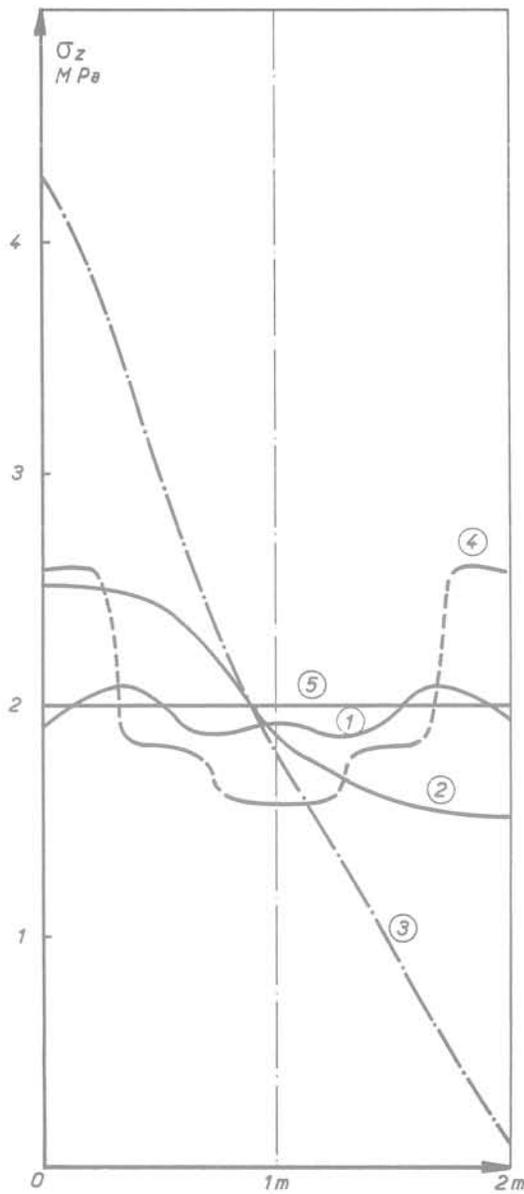
C'est une phase d'enquête, de visites du fond et d'information sur l'environnement.

Étape 2 : estimation grossière de la stabilité.

Après la mesure des caractéristiques géomécaniques du matériau, l'évaluation de sa continuité à différentes échelles, et le report sur plan de la géométrie générale de l'exploitation, un calcul utilisant des modèles simples, permet de déterminer un coefficient de sécurité global pour l'exploitation. Les mesures de contraintes in situ sont souhaitables pour contrôler la validité de ces modèles.

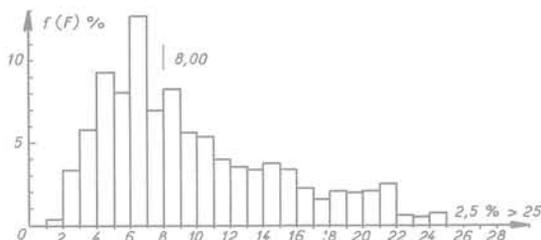
Étape 3 : détermination de coefficients de sécurité locaux.

Dans cette étape, on cherche à prendre en compte les singularités des travaux, après avoir identifié les zones à caractéristiques homogènes. Pour mener à bien cette partie de l'étude, de nombreuses mesures de caractérisation du matériau, et de nombreuses mesures in situ sont nécessaires.

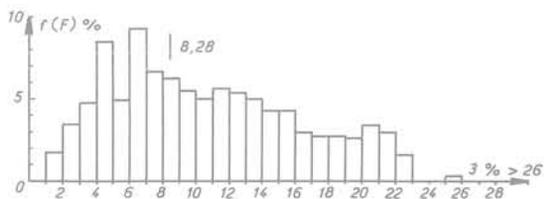


- ① Toit homogène
- ② Une diaclase verticale fermée
- ③ Une diaclase verticale ouverte
- ④ 4 diaclases par pilier
- ⑤ Niveau moyen des contraintes

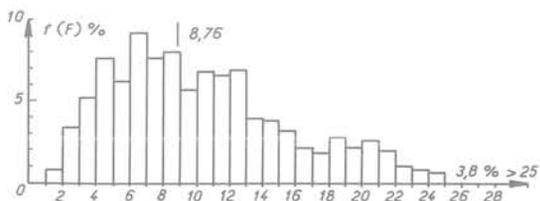
Fig. 2 Distribution de σ_v au sein d'un pilier suivant différentes hypothèses ($\tau = 90\%$)



a) Distribution expérimentale de $F = R/S$ dans la zone pilote



b) Distribution théorique de $F = R/S$ dans la zone pilote



c) Distribution théorique de $F = R/S$ pour l'ensemble de la carrière (CD 146)

Fig. 3 Détermination de $F = R/S$

Etape 1 — Poser le problème de la carrière
 Connaître l'environnement
 Connaître l'histoire de son exploitation

Etape 2 — Estimation grossière de la stabilité

Stratigraphie.
 Lithologie
 Pétrographie
 Tectonique

Caractérisation physique et géomécanique

Continuité du matériau à différentes échelles

Calcul du taux de défrètement et
 du volume excavé au mètre carré

Connaissance
 du
 matériau

Connaissance
 de la
 géométrie

Interprétation grossière de la stabilité globale
 à l'aide d'un modèle simple

Aire tributaire

$$\frac{q}{1-\tau} / R_c$$

Modèle de poutre

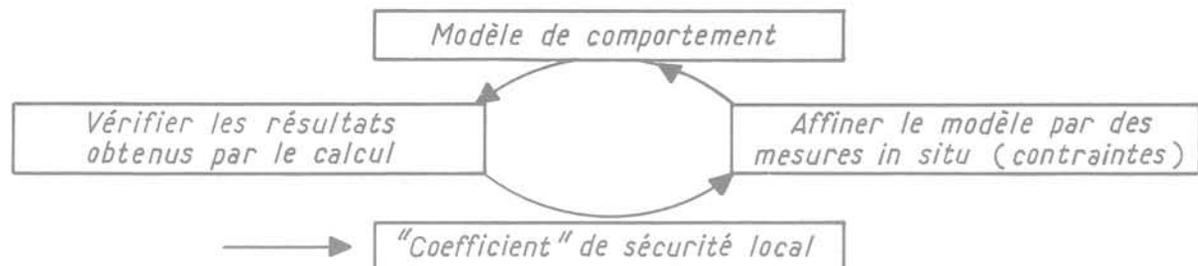
$$\frac{3ql^2}{h^2} / R_t$$

Modèle monolithique

$$\beta \frac{6qa^2}{h^2} / R_t$$

Etape 3 — Estimation locale du coefficient de sécurité

- Affiner la connaissance du matériau et du milieu
- Rechercher les zones homogènes dans la carrière
- Localiser les singularités et les caractériser
- Qualifier les conditions aux limites



Etape 4 — Corriger le diagnostic en fonction du temps

- Etude de l'influence des surcharges dynamiques et statiques (modèle et in situ)
- Analyser les processus de dégradation : diagnostic corrigé
 - montées de voute
 - fissuration des piliers
 - évolution des déformations

→ Carte géotechnique
 Interventions nécessaires

Fig. 4 Méthodologie d'étude des carrières souterraines

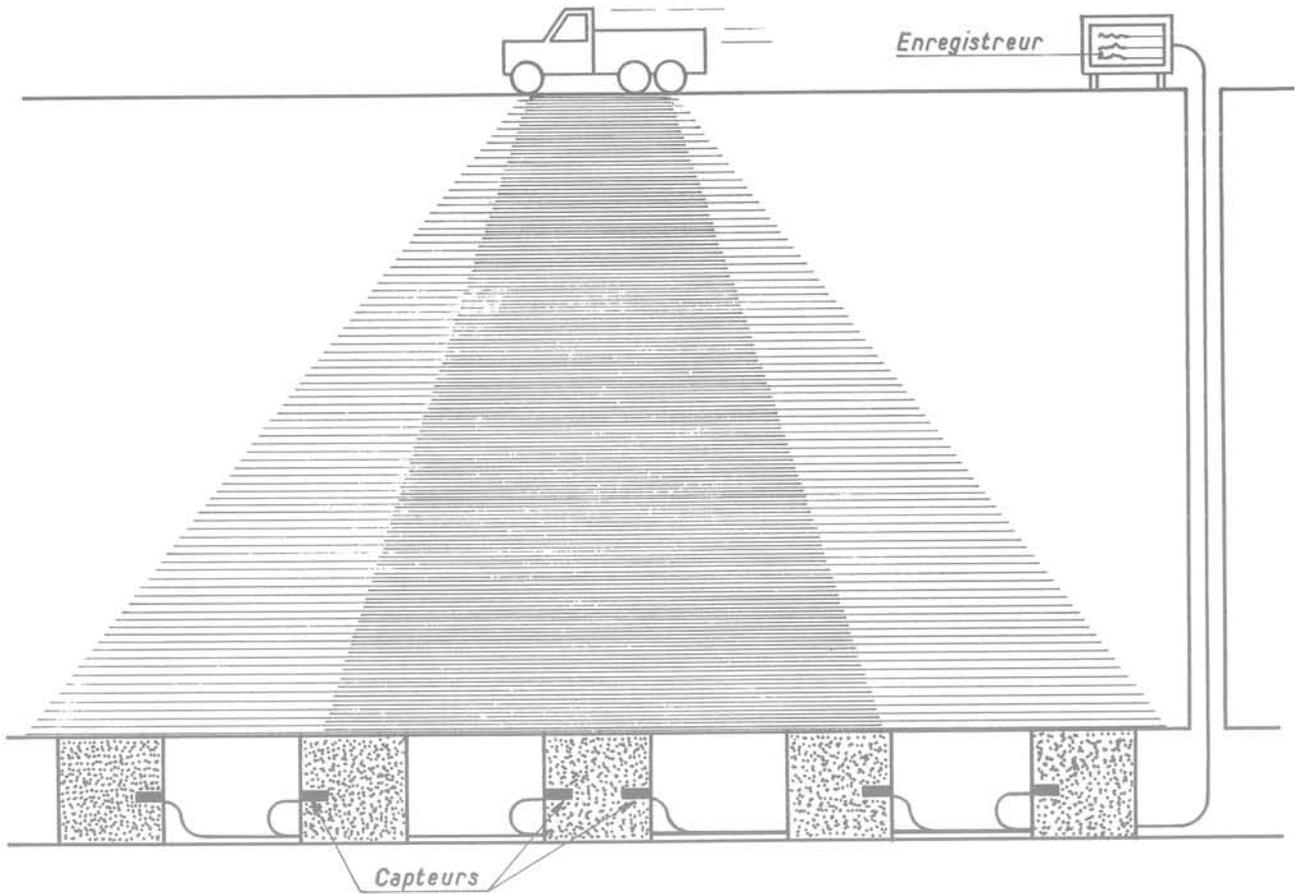


Fig. 5 Principe de la mesure des surcontraintes

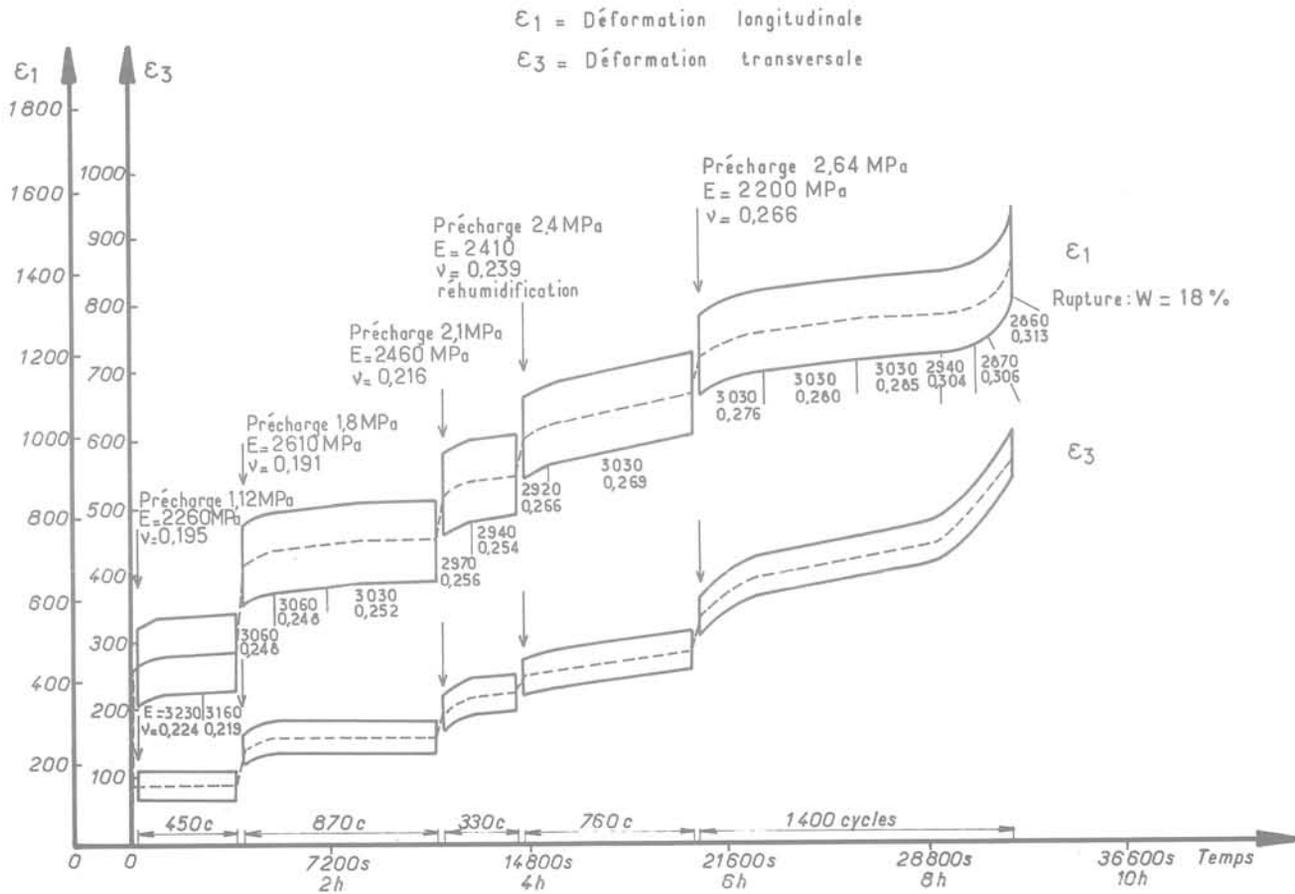


Fig. 6 Essai de fatigue sous sollicitation cyclique sur éprouvette cylindrique

Étape 4 : prise en compte des facteurs exogènes.

Dans cette étape, on s'attache à quantifier l'effet de différents facteurs, en particulier l'hydrologie, les surcharges, les vibrations...

Les phénomènes pris en compte dans cette dernière étape sont certainement parmi les plus importants, en tout cas ceux sur lesquels le maximum d'effort devrait être porté actuellement. On sait mesurer par exemple les sollicitations imposées au matériau des piliers et du toit par la circulation routière au-dessus d'un vide souterrain, comme le montre la figure 5. Bertrand et al. ont effectué de telles mesures dans une carrière souterraine située sous une route, et ont pu évaluer les effets de ces sollicitations dynamiques sur la résistance du matériau par des essais de variation cyclique de charge. La figure 6, extraite de leur communication, montre que ces sollicitations peuvent accélérer notablement la rupture du matériau.

D'autres problèmes restent à résoudre dans le domaine de l'évaluation de la stabilité des vides souterrains abandonnés, par exemple celui de l'évaluation de la stabilité des vides souterrains dans lesquels le matériau qui constitue les piliers est fracturé et a apparemment un comportement post-rupture. Le sujet fait l'objet d'une étude du Cerchar dans le Nord de la France.

Un autre problème doit être examiné, c'est celui du risque d'effondrement spontané. En fonction des mécanismes que l'on peut supposer initiateurs de ces effondrements, en particulier ceux proposés par Tincelin en 1962 [4] et par Maury en 1979 [5] on peut évaluer les risques et même proposer des mesures préventives, comme le drainage des toits. Une autre solution est proposée : la surveillance des sites que nous allons examiner maintenant. Mais le sujet des effondrements brutaux mérite encore de longues études.

2. Comment contrôler l'évolution de la stabilité

Lorsqu'une ancienne exploitation a été identifiée comme stable par une étude de stabilité, cela a pour conséquence pratique de permettre de dire que ce vide n'est pas le plus urgent à traiter ou à conforter, et même que la surface peut être utilisée immédiatement pour en faire des espaces verts, des terrains de sports ou de jeux, le vide lui-même peut être utilisé. Encore faut-il s'assurer de la pérennité de cette stabilité, par une surveillance du site.

Cette surveillance doit porter a priori sur les facteurs susceptibles de modifier le comportement des terrains, et sur le comportement des terrains eux-mêmes. Il est important de noter ici qu'une surveillance n'est pas un renforcement : son objectif est seulement de permettre de prévoir l'évolution vers la ruine de l'édifice souterrain assez longtemps à l'avance soit pour permettre de mettre en place des renforcements nécessaires pour empêcher cette ruine de se produire, soit pour minimiser ses conséquences et empêcher que l'effondrement ne soit une catastrophe.

La surveillance de l'évolution de l'environnement des vides est simple dans son principe; cela consiste essentiellement à s'assurer que le régime hydrologique n'est pas modifié, que les caractéristiques d'atmosphère du vide (ventilation, humidité, teneur en gaz divers susceptibles d'altérer les roches) restent constantes et que les terrains ne sont pas soumis à des

surcharges statiques (constructions, dépôts divers) ou dynamiques (vibrations en particulier) dont l'influence n'aurait pas été prise en compte dans l'étude de stabilité initiale.

Dans la pratique, la réalisation d'une telle surveillance est facile dans le cas où ces carrières sont utilisées. Des progrès sont à faire pour faciliter cette même surveillance dans le cas des vides abandonnés.

La surveillance du comportement des terrains repose sur le principe suivant, qui a été proposé ou repris par de nombreux auteurs : lorsque les roches constituant un édifice sont soumises à des efforts qui conduisent à la ruine, les déformations de l'ouvrage présentent une phase d'accélération quelque temps avant la ruine. Ceci a été observé dans de très nombreuses situations, et la figure 7 qui montre l'accélération par paliers des convergences observées dans une ancienne carrière de craie avant l'effondrement de la zone surveillée en est une illustration parmi beaucoup d'autres.

D'une manière plus générale, la surveillance des déformations dans les vides souterrains permet également de compléter l'étude de la stabilité. Car, par opposition à l'accélération des mouvements qui traduit un risque de ruine imminent, la diminution de la vitesse de déformation pendant une longue période est un indice de stabilité.

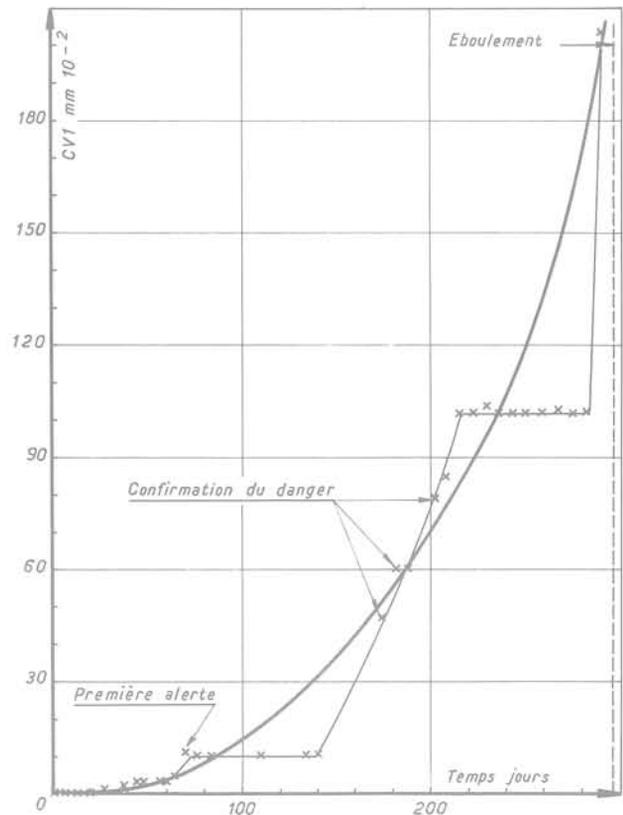


Fig. 7 Accélération des convergences avant un éboulement

Des systèmes complets de télémessure et de télésurveillance des déformations sont maintenant au point, qui fonctionnent à l'aide de micro-ordinateurs du commerce sans autre intervention humaine directe qu'un entretien périodique, et sont capables de signaler à distance, par exemple par un composeur téléphonique automatique, toute anomalie significative dans l'évolution des déformations, ou toute panne grave du système.

3 Comment stabiliser les terrains

En pratique, il est nécessaire de stabiliser les terrains lorsque :

- les résultats de l'étude de stabilité ou la surveillance précédente ne permettent pas de garantir la stabilité,
- l'utilisation des sols que l'on envisage exige une stabilité totale du sous-sol. Il est utile de signaler à ce sujet que la construction sur pieux chemisés pour être protégés contre les frottements négatifs, comme ceux présentés sur la figure 8, permet l'édification de bâtiments importants sur des terrains imparfaitement consolidés, voire sur des vides, à condition de prendre toute précaution pour parer à l'éventualité d'une destruction par cisaillement.



Fig. 8 Exemple de pieux chemisés dans une carrière souterraine (Nord de la France)

Cette stabilisation des terrains peut être envisagée de trois manières :

- par confortement direct, c'est-à-dire par substitution du matériau;
- par confortement indirect, c'est-à-dire par renforcement des structures portantes existantes (renforcement des piliers et du toit);
- enfin, par effondrement contrôlé.

3.1 Confortement direct

Lastabilisation des terrains par confortement direct, c'est-à-dire par mise en place d'un matériau de substitution est une solution définitive, mais très onéreuse*. Une application est présentée dans la communication de Dufour, sur le cas de la colline d'Issy-les-Moulineaux, où il est montré qu'elle était la seule possible. Le principe de cette méthode consiste à réaliser, en général par injection, des piliers artificiels, de position et de dimensions contrôlées, ou bien un remblai *portant*. Cette notion de portance du remblai est importante, car seul un remblai injecté permet de réaliser un tel confortement, par opposition à un remblai pneumatique par exemple qui, n'étant pas précontraint, tolérera des tassements avant d'exercer une réaction directement portante sur les terrains.

* (=100 F/m³.)

Par ailleurs, on peut, par des méthodes d'injection dans les terrains déconsolidés au toit des cavités, ou dans les éboulis mal consolidés de foudroyage, réaliser des confortements directs qui empêcheront tout tassement ultérieur. Le problème majeur qui se pose alors est celui de l'identification des vides et des consolidations. Il semble que les techniques de diagraphies employées par Erling en particulier soient bien au point et tout à fait efficaces. Dufour a réalisé des contrôles semblables par des essais de perméabilité. Il serait intéressant de comparer les résultats obtenus par les deux techniques.

3.2 Confortement indirect

L'idée de base du confortement indirect est de renforcer les structures portantes existantes, c'est-à-dire les piliers et les bords fermes, d'une part, et le toit d'autre part pour garantir leur stabilité. Cela peut être fait soit par du remblayage simple, qui, à défaut de soutenir activement le toit, réalise un confinement très efficace des piliers, et en garantit sûrement la pérennité.

Ce mode de traitement coûte ce que coûte tout remblayage, c'est-à-dire fort cher en général (plus de 50 F/m³), à l'exception de certaines régions (comme la région parisienne) où des matériaux de remblayage comme les cendres volantes sont disponibles en quantité suffisante à très bas prix.

Mais le confortement des piliers peut être réalisé par des moyens moins radicaux que le remblayage, par du cerclage, du boulonnage (figure 9) ou des constructions de renfort. Ces derniers confortements permettent une utilisation industrielle des vides, moyennant certains aménagements. Toutes les techniques qui permettent une réutilisation des vides nous paraissent des moyens de stabilisation à encourager, car en même temps qu'ils peuvent permettre de restituer des terrains de surface utilisables, ils procurent des espaces qui autrement auraient été irrémédiablement perdus.

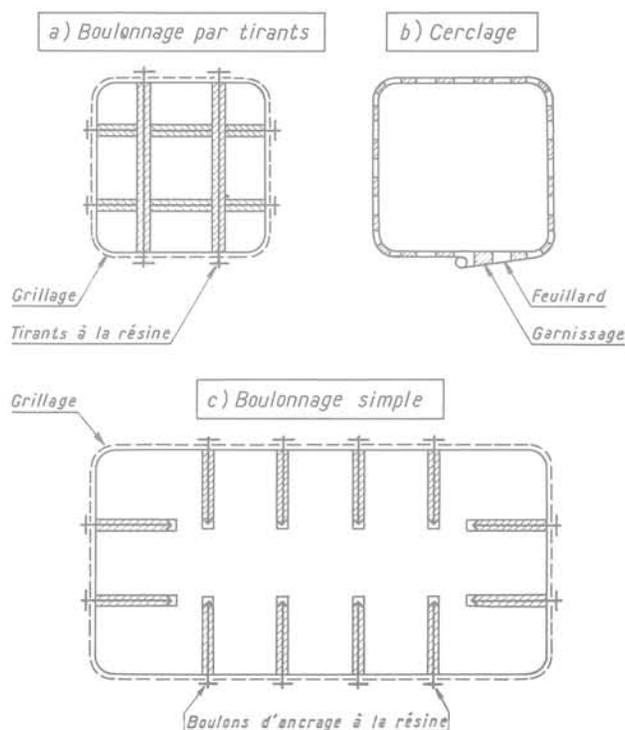


Fig. 9 Renforcement des piliers

3.3 Effondrement du vide souterrain

Enfin les terrains peuvent être stabilisés en supprimant le vide, c'est-à-dire en provoquant un foudroyage contrôlé. L'idée n'est certes pas nouvelle, puisqu'entre 1780 et 1840 on a torpillé à la poudre les piliers des anciennes carrières de gypse de Montmartre, de Ménilmontant et des Buttes-Chaumont. Mais peut-être mal conduites, ces opérations se sont traduites par des effondrements irréguliers et parfois très largement différés. Beaucoup plus récemment une méthode de foudroyage en masse a été mise au point et utilisée avec succès dans les exploitations de gypse de Port-Marion situées à l'aplomb de la forêt de l'Hautil, dans les Yvelines, comme le rapporte Vidal [6].

Ce foudroyage en masse est intéressant dans la mesure où il permet de livrer, après coup, des terrains en bon état et assez rapidement disponibles pour la construction. Cela exige en particulier :

- que la surface des travaux torpillés en une fois soit la plus grande possible, de façon à obtenir une descente d'un seul bloc des terrains sus-jacents;
- que le torpillage des piliers ne laisse subsister aucun « point dur ». Cela implique une réalisation extrêmement soignée du tir;
- que les tassements différentiels soient réduits au minimum.

Mais la plus grande prudence est nécessaire sur ce sujet. En effet, les techniques du foudroyage ont bien donné les résultats attendus lorsque celui-ci était réalisé sur une exploitation prévue à cet effet (exemple de Port-Marion), mais avant d'être appliquée à n'importe quel vide, l'ensemble des opérations doit faire l'objet de mises au point et de contrôles très soignés portant en particulier :

- sur le tir lui-même en raison de la précision des résultats attendus;
- sur la délimitation des zones foudroyées lorsque l'ensemble du vide n'est pas traité en une fois, pour pouvoir continuer l'opération dans de bonnes conditions;
- sur le tassement des terrains, dont la réutilisation dépend de la vitesse à laquelle ils se stabilisent. A ce sujet, il est intéressant de noter qu'à Port-Marion on n'observait plus d'affaissement notable après un an environ. Ce mode de traitement est en pleine évolution, et nul doute que des progrès considérables dans les réductions des nuisances qu'il provoque conduiront à son développement.

3 Conclusion

Le problème majeur que pose la présence d'exploitations souterraines abandonnées est bien celui de leur stabilité et, de manière plus immédiate, celui de l'utilisation des sols au-dessus de ces vides. Des solutions peuvent lui être apportées dans de bonnes conditions techniques en faisant appel aux moyens

modernes de stabilisation qui ont été décrits. Mais ces moyens doivent être choisis au vu de leur coût, en fonction des problèmes posés dans chaque cas.

Ainsi, dans les zones urbaines, la mise en place d'un matériau de substitution (remblai cimenté et clavé) permet de rendre utilisables des sols qui auparavant n'avaient aucune valeur. La valeur prise par les terrains ainsi récupérés doit permettre en général de payer le traitement qui est nécessaire.

En dehors des zones urbaines, le problème est différent et il est nécessaire de se demander si une solution acceptable pour l'utilisation des sols ne peut pas être obtenue par une étude de stabilité et la surveillance de l'évolution de cette stabilité. Par ailleurs, des moyens financiers supplémentaires pour stabiliser ces vides peuvent être procurés par la valeur qu'ils acquièrent s'ils peuvent être utilisés. Cette solution pose de nombreux problèmes techniques et juridiques, mais elle mérite d'être encouragée. Enfin, si la stabilité des vides apparaît comme menacée, leur foudroyage par torpillage des piliers pourrait devenir, moyennant la mise au point de contrôles au moment de sa mise en œuvre, une solution intéressante.

Mais d'une manière générale, lorsque l'on constate la difficulté des problèmes posés par les vides incontrôlés, on se dit que le mieux est certainement de ne pas en créer, c'est-à-dire, plus simplement, de les traiter au moment de leur creusement par un foudroyage partiel ou total lorsque cela est possible.

Références bibliographiques

- [1] J. Bonvallet
« Critères de stabilité des exploitations souterraines à faible profondeur. » Thèse I.N.P.L. Nancy, 1978.
- [2] D. F. Coates
« Principes de la mécanique des roches », monographie 874. Direction des Mines, Ottawa, Canada.
- [3] C. Chambon et J. Bonvallet
« Détermination d'un coefficient de sécurité dans les exploitations par chambres et petits piliers abandonnés. » Revue Française de Géotechnique, n° 13.
- [4] E. Tincelin et P. Sinou
« Effondrements brutaux et généralisés, coups de toit. » Revue de l'Industrie Minière, avril 1962.
- [5] V. Maury
« Effondrements spontanés. Synthèse d'observations et possibilité de mécanisme initiateur par mise en charge hydraulique. » Revue de l'Industrie Minière, octobre 1979.
- [6] V. Vidal
« Foudroyage dans l'exploitation de gypse de Port-Marion. » Revue de l'Industrie Minière, 9/1970.