

Mise en sécurité des carrières souterraines

Tanguy Collet, Farimah Masrouri, Christophe Didier

▶ **To cite this version:**

Tanguy Collet, Farimah Masrouri, Christophe Didier. Mise en sécurité des carrières souterraines. Colloque International Après-mine 2003, Feb 2003, Nancy, France. pp.NC. ineris-00972404

HAL Id: ineris-00972404
https://ineris.hal.science/ineris-00972404

Submitted on 3 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MISE EN SECURITE DES CARRIERES SOUTERRAINES

COLLET Tanguy [1], MASROURI Farimah [1], DIDIER Christophe [2]

[1]Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages, Ecole Nationale Supérieure de Géologie, Institut National Polytechnique de Lorraine. Rue du Doyen Marcel Roubault – BP 40 – 54501 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex - France. tanguy.collet@ensg.inpl-nancy.fr, farimah.masrouri@ensg.inpl-nancy.fr.

[2] Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques. Parc technologique ALATA - BP n°2 - 60 550 Verneuil en Halatte, France. christophe.didier@ineris.fr.

RESUME : *Les manifestations en surface des désordres se produisant dans les carrières souterraines peuvent engendrer de graves conséquences en termes de sécurité publique, de dégâts sur le bâti et d'impacts sur l'environnement. Dans ce contexte, différentes techniques de prévention et de protection, telles que le remblayage des vides, sont alors à mettre en œuvre pour maîtriser et traiter les risques induits par ces travaux. Le choix entre ces différentes méthodes dépend des conditions générales d'accessibilité et de stabilité du site, de la destination de l'ouvrage souterrain, du niveau de protection souhaité et du coût de l'opération. Cet article présente une synthèse des techniques de traitement des cavités souterraines, en indiquant leurs avantages et leurs inconvénients, autant d'un point de vue technique qu'économique.*

MOTS-CLEFS : Prévention, protection, remblayage, carrières souterraines.

ABSTRACT : Pillar failure in underground quarries can generate surface subsidence with public safety and environmental implications can be severe. In this context, various preventing and protecting methods such as the backfilling of cavities, should be used to control and to settle the hazards linked to underground quarries. The lines to select the most appropriate solution are the cost of the operation, the technical data (accessibility and stability of the site), the planned land use, the aims of the prevention. This article synthesizes the economical and technical advantages or disadvantages for each preventing or protecting method.

KEY-WORDS : Prevention, protection, backfilling, underground quarries.

1. Introduction

Des milliers d'hectares sont, sur le territoire français, sous-minés par des carrières souterraines pour bon nombre abandonnées. Les risques potentiels résultant des manifestations en surface des désordres à l'aplomb de ce type de cavités doivent être pris en considération : ces évènements accidentels peuvent en effet, dans des contextes défavorables, engendrer de graves conséquences en termes de sécurité publique, de dégâts sur le bâti et les infrastructures de surface et d'impacts sur l'environnement.

Lorsque les carrières souterraines sont connues et localisées avec précision, plusieurs méthodes peuvent être employées pour maîtriser et traiter le risque induit par les vides. Nous citerons principalement les techniques de la prévention et de protection.

Les méthodes de prévention consistent à avertir de l'imminence du danger sans s'opposer au phénomène proprement dit pour éviter l'accident, tandis que les méthodes de protection consistent à minimiser voire à supprimer tout mouvement de terrain.

Cet article présente une synthèse des méthodes de mise en sécurité des terrains situés sous-minés par des carrières souterraines.

2. Méthodes de prévention

Compte tenu de la surface importante de zones urbaines ou périurbaines sous-minées par l'exploitation des carrières souterraines, il n'est pas économiquement envisageable de traiter de façon radicale et systématique tous ces vides par des solutions de confortement. La surveillance par inspection, visuelle ou à l'aide de mesures *in* situ, permet de prévoir l'évolution de l'ouvrage et d'alerter, à l'imminence d'un danger tel que la ruine d'un pilier. Divers modes d'inspection et de surveillance peuvent être utilisés dans les carrières souterraines (Delporte *et al.*, 1987).

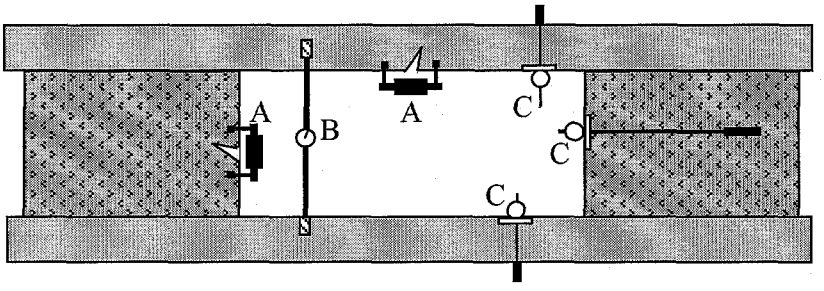
2.1. Inspection visuelle

Cette méthode d'investigation simple et économique permet de signaler, avant leur aggravation, les désordres affectant certains ouvrages. Cette surveillance peu coûteuse peut s'accompagner d'observations effectuées à partir de témoins (plâtre par exemple) posés en travers de fissures mécaniques, ou à partir de relevés d'indices comme les chutes de blocs (grâce à des moyens de repérage tels que la peinture projetée). Essentiellement basée sur l'observation, cette méthode n'est pas suffisante lors de l'évolution trop rapide ou trop peu perceptible d'une instabilité.

2.2. Surveillance instrumentée

La mise en place de dispositifs et d'appareillages de mesure peut s'opérer de différentes façons selon les besoins économiques et pratiques :

- la lecture directe de dispositifs de mesures s'effectue à partir d'instruments portables, et les relevés se font généralement avec une fréquence mensuelle, semestrielle ou annuelle. Ces instruments sont nombreux et diversifiés (fig. 1) : on peut citer les extensomètres, les fissuromètres, les convergencemètres qui sont les appareils les plus couramment utilisés ;



A : fissuromètres : mouvements de fissures.

B : convergencemètre.

C : extensomètres : expansion du mur, du toit ou du pilier.

Figure 1 : Instrumentation de surveillance *(d'après Tritsch, 1995).*

- la télémesure simple consiste à utiliser des capteurs électriques raccordés à une unité de mesure unique et d'accès facile. La fréquence des relevés est journalière, hebdomadaire voire mensuelle ;
- la télémesure automatique permet d'interroger chaque capteur à distance et de transmettre les informations à un poste central. La fréquence des mesures dépend de la rapidité d'évolution des phénomènes surveillés, le plus important étant plutôt la fréquence d'exploitation des mesures qui conditionne les décisions.

La difficulté majeure de ces modalités de surveillance réside dans la pertinence du choix de l'implantation des instruments, car ils fournissent des résultats ponctuels, localisés à une zone particulière. Ces méthodes de surveillance deviennent en conséquence rapidement prohibitives par le coût, par les précautions de mise en œuvre nécessaires pour assurer la fiabilité du système, et par l'organisation de la sécurité en définissant précisément les seuils d'alerte et la responsabilité de chacun.

L'accent va maintenant être mis sur les méthodes de protection qui se divisent en mesures de protection passives adoptant des dispositions spécifiques en terme de gestion de l'urbanisme (inconstructibilité, dispositions constructives particulières), et en mesures de protection actives consistant à s'opposer au phénomène pour minimiser le danger jusqu'à le supprimer définitivement.

3. Méthodes de protection passives

Les techniques de protection passives ont pour principal objectif d'adapter l'occupation du sol aux dégradations prévisibles résultant de l'évolution des vides souterrains. Elles s'appliquent notamment au cas de galeries inaccessibles ou jugées telles en raison de conditions de sécurité inacceptables (Durville & Hameroux, 1995).

3.1. Renforcements de structure

Les méthodes de renforcement par radiers, longrines, poutres, etc. permettent de rendre la structure rigide pour assurer un mouvement d'ensemble en cas d'affaissement localisé. Elles sont utilisées lors de la présence de petits vides (dimension inférieure à 1/5^{è} de la plus grande dimension de l'ouvrage, limitée à 5 m) à répartition inconnue, ou sur des terrains décomprimés dans une zone anciennement effondrée.

3.2. Renforcements en sous-œuvre

Le renforcement en sous-œuvre est utilisé pour assurer une bonne stabilité des constructions, soit par des injections améliorant la surface d'appui, soit par des ancrages ou vérins afin de remplacer progressivement la poussée des terrains enlevés.

3.3. Fondations profondes

Elles permettent de reporter les charges en profondeur, sous le niveau d'exploitation, pour isoler les structures des mouvements du terrain (photo 1). Pour cela sont mis en place des puits bétonnés terrassés à la main et ceinturés lors de la traversée des cavités, ou des pieux par forage ou battage avec chemisage lors de la traversée des cavités.
Ces méthodes, applicables quel que soit le type de cavité, pour des ouvrages neufs ou pour une reprise en sous-œuvre de bâtiments existants, n'empêchent cependant pas la remontée de fontis : il y a donc danger aux abords de la construction et risque de frottement négatif sur les pieux.

3.4. Adaptation des réseaux et des voiries

L'objectif est de limiter le risque de rupture des réseaux souterrains, par l'utilisation de raccords souples (adaptation aux déformations) ou par renforcement de l'ouvrage (résistance aux déformations).
Des géotextiles peuvent être incorporés dans les structures de chaussée pour les renforcer, dans le cas de vides soupçonnés, non identifiés ni localisés. D'autres méthodes de protection passives sont envisageables telles que les géogrilles (Gouge, 2002). En effet, cette technique est souvent utilisée en Afrique du Sud et aux Etats-Unis pour sécuriser le sol au-dessus des mines. En France, elle a, par exemple, été utilisée sous une portion de la ligne TGV dans le Nord de la France. Il s'agit d'une grille en polymère enterrée à 1 m – 1,5 m de profondeur, ne renforçant pas le sol mais servant d'antichute en cas d'arrivée d'un fontis en surface.

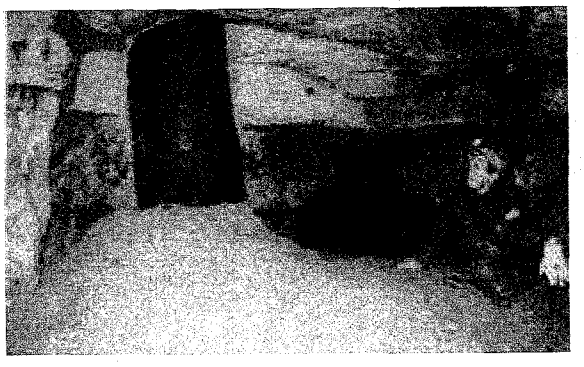


Photo 1. Mise en sécurité par réalisation de pieux (photo INERIS)

Si les mesures de protection passives consistent à conforter les infrastructures elles-mêmes, les mesures actives font appel à des techniques de traitement des cavités souterraines qui se décomposent en trois catégories :

- les techniques de renforcement ponctuel ;
- les techniques de suppression des cavités par foudroyage ;
- les techniques de remplissage des vides par remblayage total ou partiel des cavités.

Le choix entre ces différentes méthodes dépend des conditions générales d'accessibilité et de stabilité du site, de l'utilisation ultérieure ou non de la cavité souterraine, du niveau de protection souhaité et du coût de l'opération.

4. Méthodes de protection actives : techniques de renforcement ponctuel

Les techniques de traitement par renforcement ponctuel des sites accessibles que l'on veut conserver ouverts consistent à rétablir une stabilité suffisante à moyen terme des sites souterrains au travers de la mise en œuvre, par le fond, de traitements ou de renforcements, tout en conservant les espaces en quasi-totalité (fig. 2). La mise en place de ces techniques est sujette, à l'exception des piliers artificiels injectés depuis la surface, à deux conditions essentielles : l'accessibilité du site souterrain et les conditions de sécurité et de stabilité des ouvrages.
Deux principes généraux guident ces méthodes :

- il faut améliorer la tenue ou l'état des ouvrages dégradés par des techniques de solidarisation ou de confinement visant à augmenter les caractéristiques intrinsèques du matériau : boulonnage, cerclage, ceinturage, béton projeté, etc. (Panet, 1973 ; A.F.T.E.S, 1982 ; Siwak, 1984 ; Pera, 1985 ; Wojtkowiak *et al.*, 1985) ;
- il faut augmenter la portance par des techniques de reprise des efforts qui ont pour but de soulager la structure d'ensemble : piliers artificiels, ceinturage-cerclage avec élargissement du pilier (groupe de travail C.S. 78, 1979 ; Durville & Hameroux, 1995).

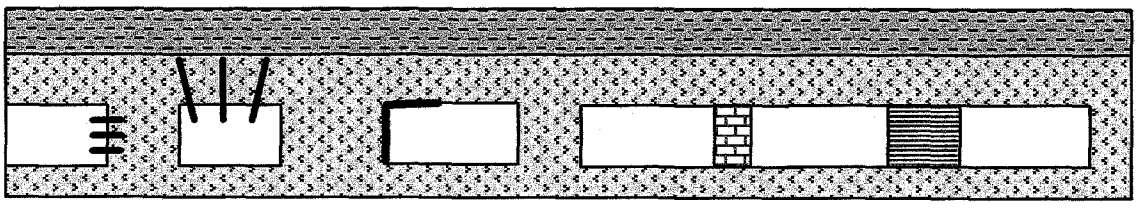


Figure 2. Méthodes de renforcement

4.1. Boulonnage

La mise en place du boulonnage répond à trois objectifs : soutenir les zones susceptibles de s'effondrer, confiner la paroi et renforcer le massif. Trois types de boulons peuvent être utilisés :

- boulon à ancrage ponctuel : la force longitudinale est appliquée sur le terrain dès la pose, par la mise en serrage du boulon. Il assure le rôle de suspension et de confinement, mais il n'est pas recommandé pour le renforcement car l'espace tige-paroi est vide : il n'y a donc pas d'opposition aux mouvements des discontinuités. Ces boulons sont cependant les plus utilisés du fait de leur simplicité de mise en œuvre, même si les types de boulonnage ci-dessous présentent *a priori* une plus grande efficacité ;
- boulon à ancrage réparti : scellé au mortier ou à la résine, il y a apparition d'une force longitudinale appliquée au boulon dès la mise en serrage de la plaque surtout par son effort de réaction. Il assure le rôle de suspension et de confinement et est bien adapté au renforcement car la résistance du boulon est mobilisée. Ce type de boulon est considéré comme bloquant car sa capacité d'allongement est inférieure à 1% ;
- boulon à ancrage réparti sans scellement : il adhère aux parois du trou par contact direct par gonflement du boulon ou par fonçage. La force longitudinale est assurée par les réactions de frottement. Ils sont peu utilisés dans les carrières souterraines.

Le boulonnage est utilisé dans les opérations de renforcement de carrières accessibles si les piliers ne sont ni trop fracturés, ni trop peu résistants et si l'agressivité du milieu et les venues d'eau sont limitées (photo 2).

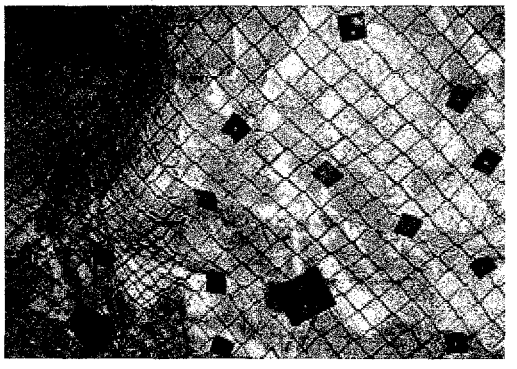


Photo 2. Boulonnage d'un pilier et filet de protection (photo Collet, carrière de gypse de l'Est parisien, 2001)

4.2. Ceinturage

Le ceinturage d'un pilier permet de bloquer ses déformations en exerçant une pression de confinement inférieure à 1 MPa (Tritsch, 1995), d'améliorer les caractéristiques de résistance et d'augmenter éventuellement la portance de la surface d'appui. Il consiste à mettre en place des panneaux métalliques jointifs appliqués par cerclage ou des revêtements périphériques bétonnés mis en place à partir de différents types de coffrage : ces opérations sont longues, coûteuses et délicates à mettre en œuvre. Elles sont principalement utilisées dans les carrières avec accès facile, pour des piliers de petite dimension fortement fracturés ou ruinés pour lesquels la restauration est impérative, et si l'intérêt de maintenir ces ouvrages ouverts est justifié.

4.3. Béton projeté

Le béton projeté ou le gunitage permet de minimiser les déformations excessives du massif rocheux en exerçant un confinement et un renforcement. Il est généralement mis en œuvre par refoulement dans une conduite et projeté sur les parois par jet d'air comprimé, sur une épaisseur moyenne de 5

cm. L'épaisseur du revêtement peut atteindre 15 à 20 cm, l'effet est alors semblable au ceinturage des piliers décrit précédemment. Le drainage du système est impératif en cas de venues d'eau.
Il est principalement utilisé lorsque les piliers sont ruinées ou très fracturés, le boulonnage étant dès lors inefficace ou difficile à mettre en œuvre. Dans le cas de piliers très altérés, le béton peut être armé, renforcé par des armatures (treillis, grillage) voire associé à du boulonnage.

4.4. Piliers artificiels

Les piliers artificiels transmettent le poids des terrains de recouvrement et des surcharges éventuelles au plancher de la carrière. On distingue les piliers mis en place depuis le fond (piliers maçonnés ou bétonnés coffrés) et ceux coulés depuis la surface (piliers bétonnés ou injectés) :

- piliers maçonnés : parpaings en agglomérés pleins ou blocs de béton liés au mortier (photo 3) ;

- piliers bétonnés coffrés : béton coulé à l'intérieur d'un coffrage réalisé par un muraillement en maçonnerie ou des panneaux ;

- piliers bétonnés : coffrage en chaussette en géotextile (« coffrage synthétique ») ou traditionnel en bois ou métallique, généralement circulaires pour des sections de pilier entre 1 et 2,5 m ;

- piliers injectés : injection gravitaire de coulis cimenté avec un adjuvant silicaté pour assurer une prise rapide (angle de frottement de 45 à 70°) sans coffrages, à partir de forages.

Les piliers doivent avoir une déformabilité voisine des piliers naturels, et un clavage est souvent nécessaire pour assurer un contact parfait avec le toit de la galerie. Leur superficie totale est fonction de la charge à supporter : cependant, les piliers de renforcement doivent représenter au minimum 20% de la surface de l'ouvrage en surface, de laquelle peut être déduite celle des piliers déjà existants. Pour les carrières de calcaire dans le bassin parisien, l'Inspection Générale des Carrières recommande que la résistance à la compression des matériaux utilisés soit supérieure à 6 MPa, et que la largeur des piliers soit supérieure à 1/3 de la hauteur sans être inférieure à 1,2 m et d'élancement supérieur à 3.
La mise en place de piliers artificiels présente un avantage pratique et économique car cela est plus simple et moins cher que la restauration de piliers ruinés, et permet également le positionnement précis des points de portance. Cette méthode de traitement est utilisée dans les carrières accessibles présentant un ciel en bon état, située sous une épaisseur de recouvrement excédant rarement 10 m, dont la hauteur d'exploitation est limitée à 5 m (Durville & Hameroux, 1995).

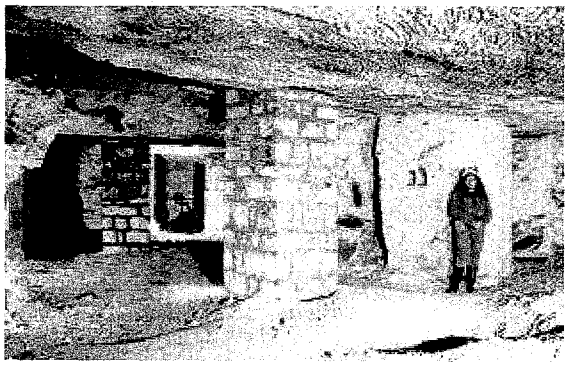


Photo 3. Piliers maçonnés (carrière de pierre à bâtir, Aisne)

5. Suppression des vides par foudroyage

Cette technique consiste soit à décaisser, soit à supprimer les vides souterrains par abattage des terrains de couverture ou des piliers des carrières. On distingue essentiellement la méthode par

comblement-terrassement et celle par foudroyage contrôlé des piliers. La méthode de comblement-terrassement permet un remblayage des cavités à partir des matériaux de couverture abattus mécaniquement. Cette méthode est applicable à tous les types de cavité avec un recouvrement maximal d'environ 20 m (limite de capacités techniques des pelles mécaniques).

Le foudroyage se caractérise par un abattage systématique des piliers dans le but de provoquer l'effondrement des terrains de couverture. Deux méthodes de foudroyage sont possibles : la méthode d'affaissement dirigé qui n'est applicable que si elle est planifiée dès le départ dans le schéma d'exploitation et la méthode de foudroyage post-exploitation, encore au stade expérimental, dont le but est de provoquer l'effondrement total des anciennes carrières souterraines par torpillage des piliers.
Ces méthodes destructrices, très délicates à mettre en œuvre et potentiellement dangereuses génèrent de nombreuses nuisances sonores, hydrologiques, environnementales ; elles ne sont évidemment pas utilisables dans les zones urbanisées.

6. Suppression des vides par remblayage

Les méthodes de traitement par remplissage des vides représentent des solutions de traitement ultime des instabilités potentielles du sol induites par la présence de cavités souterraines. L'objectif de ces méthodes est de limiter les mouvements de terrain en surface voire d'interdire tout déplacement dans les zones destinées à la construction en réduisant le plus possible le volume des vides ou en les supprimant totalement jusqu'à restituer la compacité initiale du matériau (Groupe de travail C.S. 78, 1979 ; Filliat, 1981 ; A.F.T.E.S, 1987 ; Camelan, 1994 ; Durville & Hameroux, 1995 ; Tritsch, 1995).
Dans le cas de carrières souterraines abandonnées, les méthodes de remblayage sont préférentiellement utilisées lorsqu'il est nécessaire d'éliminer les risques susceptibles de provoquer des dommages sur l'environnement, lorsque les solutions de traitement par confortement des ouvrages souterrains ne sont pas retenues pour des raisons pratiques ou économiques.
Différentes méthodes peuvent être envisagées pour assurer le remplissage des cavités. On peut les classer en trois groupes distincts :

- le remblayage direct à partir du fond, par engins mécanisés ;
- le remblayage par déversement gravitaire depuis la surface ;
- le remblayage par injections de mortiers ou de coulis sous-pression.

6.1. Remblayage par déversement gravitaire

Cette méthode de comblement des vides consiste à déverser, gravitairement ou sous faible pression, à partir de forages, des matériaux pour réduire le volume des vides souterrains, supprimer les risques d'effondrement à long terme et bloquer les mouvements du sol par un remplissage quasi-total des vides, s'il est complété par des opérations de clavage.
Les performances de ce traitement dépendent du choix de la technique de mise en place, de la qualité des opérations de foration et de la nature des matériaux.
On distingue :

- le remblayage gravitaire par voie sèche :

Il consiste à déverser, sans addition d'eau, des granulats de grande dimension, à partir de forages de diamètre compris entre 400 et 1000 mm. La densité de maillage des forages est déterminée en fonction de l'angle de frottement des matériaux variant de 30 à 45°, la distance maximale entre deux d'entre eux devant rester inférieure à deux fois l'ouverture de la carrière.

Les matériaux utilisés sont essentiellement des produits bon marché constitués de déblais tout-venant, déchets de carrière, terres de fouilles, stériles miniers ou plus nobles comme les sables ou les sablons pour une augmentation des caractéristiques de compactage et une minimisation des tassements après évacuation de l'eau. Sont exclus les matériaux argileux, les débris végétaux et les produits organiques. La préparation de ces matériaux nécessite normalement un criblage par grille et éventuellement un lavage. Cette méthode, dont le coût important dû au grand nombre de forages nécessaires est principalement utilisée lors de problèmes d'alimentation en eau, les tassements après mise en œuvre pouvant être importants et provoquer des vides résiduels métriques ;

- le remblayage gravitaire par voie semi-humide :

Un mélange en proportion 50/50 de matériaux identiques à ceux utilisés par le remblayage par voie sèche et d'eau est mis en œuvre par des forages de diamètre de 400 à 800 mm généralement tubés. Cette boue permet une plus grande dispersion du remblai : la distance entre les forages est donc plus importante, le maillage doit être adapté à la géométrie de l'exploitation, le centre des carrefours des galeries étant l'implantation idéale. Afin d'augmenter les caractéristiques mécaniques du remblai, l'ajout d'une faible quantité de ciment est possible.
Cette méthode permet une meilleure répartition du remblai pour un nombre de forages moindre, et la hauteur du vide résiduel est classiquement de l'ordre de 10 à 30 cm. Cependant, des dégradations peuvent être engendrées par la présence d'eau : des barrages d'arrêt sont donc nécessaires ;

- le remblayage gravitaire par voie humide :

Il s'agit de déverser un mélange de cendres volantes ou de sablons et d'une très forte quantité d'eau et éventuellement d'une faible quantité de ciment par des forages de diamètre 100 à 200 mm et tubés. Le maillage varie généralement de 7x7 m à 10x10 m. Le tableau 1 montre la composition de quelques mortiers types. Le taux de remplissage des cavités est voisin de 95 % et la hauteur du vide résiduel ne dépasse pas les 30 cm. Des problèmes dus à l'eau peuvent cependant apparaître s'il n'y a pas de liant hydraulique : tassement, consolidation longue.

Tableau 1: Composition de quelques mortiers types *(d'après Tritsch, 1995).*

	Mortier de type 1		Mortier de type 2	
Ciment (kg)	75	75	100	100
Cendres volantes humides (kg)	800	-	800	-
Sablons (kg)	-	1000	-	1000
Eau (l)	600	600	600	580
Bentonite (kg)	-	-	-	15

Ces méthodes de remblayage gravitaire sont principalement utilisées pour les vides souterrains totalement inaccessibles, mais elles sont également très concurrentielles pour les vides accessibles car on s'affranchit du problème de la sécurité du personnel. Les méthodes de remblayage par voie sèche et par voie semi-humide sont plutôt destinées au comblement des travaux à une profondeur maximale de 30 à 35 m, sous des espaces verts ou de loisir car le vide résiduel autorisé est de l'ordre de 0,5 m, alors que la méthode par voie hydraulique sera préférée pour les zones concernant les voies publiques ou le bâti existant, avec une hauteur des vides admissible inférieure à 20 cm (Durville & Hameroux, 1995).

6.2. Remblayage direct à partir du fond

Les matériaux de remblayage sont acheminés au fond par camions, afin de stopper ou réduire les mouvements de la galerie et supprimer le risque d'effondrement à long terme. Il y a donc réduction du volume des vides par apport de matériaux sans traitement ni adjonction de liants hydrauliques.
Cette mise en oeuvre s'effectue en quatre phases :

- phase préparatoire éventuelle (boulonnage, purge) ;
- acheminement des matériaux au fond puis déversement. Les matériaux utilisés sont de type tout-venant, déchets inertes, avec un traitement minimal (criblage), à l'exception des matériaux argileux, polluants (type déchets industriels) ou organiques;
- reprise par bulldozer (photo 4) ;
- phase de compactage éventuelle et possibilité de recours à un clavage par injections de coulis à partir de la surface. La qualité du remblayage dépend des caractéristiques de compacité des matériaux.

Cette méthode est simple et peu coûteuse suivant l'importance de la première phase, la mise en place s'effectuant sans pression et sans eau et les nuisances sont limitées, excepté le passage des camions de chantier. Elle est applicable dans les carrières accessibles et en bon état, suffisamment grandes pour permettre le passage des engins de chantier et avec une bonne ventilation garantissant la sécurité du personnel. Il n'y a pas de restriction quant à la profondeur des travaux. Cependant, cette technique est principalement mise en application pour assurer la sécurité des zones naturelles (espaces verts, zones de loisir, etc.), la hauteur du vide résiduel pouvant atteindre 0,5 m.



Photo 4. Reprise du remblai par buldozer (photo Collet, carrière de gypse de l'Est parisien, 2001)

6.3. Remblayage par injections

Il y a injection depuis la surface de granulats fins traités au ciment et mélangés à de l'eau, sous forme d'émulsion, pour combler totalement les vides, éliminer les vides résiduels par clavage lors de l'utilisation d'autres méthodes de remblayage ou traiter les remblais de mauvaise qualité (photo 5).
Les travaux s'effectuent selon le phasage suivant :
- phase de reconnaissance pour délimiter, avec des barrages d'arrêt, les zones à traiter ;
- préparation des produits ;
- injection selon un maillage de 3x3 m à 15x15 m (espaces verts), dans des forages de petit diamètre (80 à 160 mm). Les pressions utilisées varient de 0,1 MPa pour des injections de grands vides inaccessibles avec remplissage primaire et clavage sous faible pression à 4 MPa, pour le traitement des remblais par injections solides.

Les matériaux utilisés peuvent être des :
- coulis instables à base de ciment, dont la sédimentation des particules se produit dès que la suspension est au repos ;
- coulis de ciment activé, fluidifiés et peu délavables ;
- coulis stables argile-ciment, dont l'apport en bentonite permet d'obtenir des résistances à la compression depuis quelques MPa à environ 15 MPa ;

- coulis avec charges (mortiers) : une partie du ciment est remplacée par une charge inerte (cendres volantes). Ce sont des coulis économiques, d'une grande pérennité et dont les résistances à la compression peuvent varier de 0,5 MPa à plus de 30 MPa ;

- coulis à prise accélérée et à rigidification contrôlée pour résoudre les problèmes d'écoulement non contrôlés des coulis classiques ;

- coulis cellulaires, bien adaptés au remplissage de cavités importantes, leurs taux de gonflement variant de 50 % (type cellulaires expansés) à plus de 100 % (type cellulaire expansifs) ;

- mousses, pour remplir de façon relativement économique des vides importants, mais avec une diminution sensible de la résistance mécanique du coulis (entre 0,5 et 1 MPa).

Cette méthode complexe, longue, coûteuse et nécessitant un personnel compétent permet d'atteindre un niveau de sécurité maximal car le traitement des vides est définitif et complet. De plus, des risques de perturbation des conditions hydrologiques, de pollution du milieu par les produits utilisés sont possibles. C'est pourquoi elle est surtout utilisée en zones urbaines pour les sites particulièrement difficiles avec niveau de sécurité recherché maximal.



Photo 5. Matériel d'injection de carrières souterraines

7. Conclusion

Cet article s'est attaché à présenter un catalogue des différentes méthodes de mise en sécurité des terrains à l'aplomb des carrières souterraines. Parmi les nombreuses techniques de prévention ou de protection disponibles, le choix d'une solution est guidé par un certain nombre de données regroupées ci-dessous en cinq familles. Il faut rappeler ici qu'une bonne reconnaissance préliminaire des terrains et des vides est indispensable pour retenir la solution de traitement optimale.

- Objectifs de sécurité recherchés :
degré de fiabilité exigé, tolérances vis-à-vis des déformations en surface, impacts sur l'environnement.

- Contraintes pour les travaux :
conditions d'accessibilité pour le passage des engins en surface et en souterrain, de stabilité et de sécurité du personnel opérateur, possibilité de stockage des matériaux.

- Conditions du site :
volume des vides, caractéristiques géométriques des cavités, profondeur, topographie, nature de l'occupation de la surface, densité de population, mode d'urbanisation, etc.

- Aménagements actuels ou prévus :
projets d'urbanisme, valorisation du sol ou du sous-sol.

- Aspects financiers :

enveloppe financière disponible.

8. Références bibliographiques

Association Française des Travaux en Souterrains (1982). *Recommandations sur les conditions d'emploi du boulonnage.* Tunnels et ouvrages souterrains, N° spécial juillet

Association Française des Travaux en Souterrains (1987). *Recommandations relatives aux travaux d'injection.* Tunnels et ouvrages souterrains, N° 81

Camelan J-C. (1994). *Remblaiement des carrières souterraines en région parisienne.* Mines et Carrières, Revue de l'Industrie Minérale, juillet, 7-78

Collet T. (2001). *Influence du remblayage partiel des carrières souterraines.* DEA INP de Lorraine, Nancy

Delporte R., Dhont C., Bivert B., Schwartzmann R. (1987). *Mesure, contrôle et télésurveillance des carrières souterraines.* Extrait du Moniteur des B.T.P., N° 50, 175-177

Durville J-L., Hameroux M. (1995). *Stratégies et méthodes de prévention.* Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, N° 51

Filliat G. (1981). *La pratique des sols et fondations.* Editions du Moniteur, Paris

Gouge F. (2002). *Des géogrilles pour prévenir les fontis.* Extrait du Moniteur des B.T.P., N° 5146

Groupe de travail C.S. 78 (1979). *Recommandations sur le traitement des cavités souterraines et notamment des carrières.* Annales de l'I.T.B.T.P., Série sols et fondations, N° 370, 118-138

Panet M. (1973). *La stabilité des ouvrages souterrains : soutènement et revêtement.* Rapport de recherche L.C.P.C., N° 28

Pera J. (1985). *Rôle de l'adhérence du béton projeté sur son support.* Tunnels et ouvrages souterrains, N° 68, 51-57

Siwak J-M. (1984). *Carrières de craie du Nord de la France : comportement des piliers et confortation par gunitage.* Thèse de 3è cycle U.S.T. de Lille

Tritsch J-J. (1995). *Evaluation des méthodes et du coût de la mise en sécurité des populations menacées par les risques d'effondrement de carrières.* Rapport INERIS

Wojtkowiak F., Rai M.A., Bonvallet J. *(1985). Etudes expérimentales en laboratoire de différentes méthodes de renforcement des petits piliers de mine.* Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, N° 32, Paris, 131-138