

## Modélisation de l'influence du remblayage partiel des carrières souterraines

Tanguy Collet, Farimah Masrouri, Christophe Didier

► **To cite this version:**

Tanguy Collet, Farimah Masrouri, Christophe Didier. Modélisation de l'influence du remblayage partiel des carrières souterraines. Journées nationales de géotechnique et de géologie, Jun 2004, Lille, France. pp.331-337. ineris-00972469

**HAL Id: ineris-00972469**

**<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00972469>**

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.

# MODELISATION DE L'INFLUENCE DU REMBLAYAGE PARTIEL DES CARRIERES SOUTERRAINES

## PARTIAL BACKFILLING INFLUENCE IN UNDERGROUND MINES

Tanguy COLLET<sup>1</sup>, Farimah MASROURI<sup>1</sup> & Christophe DIDIER<sup>2</sup>

*1 Laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages, Institut National Polytechnique de Lorraine, Vandoeuvre-lès-Nancy*

*2 Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Verneuil en Halatte*

**RÉSUMÉ** – Le remblayage partiel est une méthode efficace pour maîtriser les risques induits par les exploitations souterraines. En effet, il permet de limiter la remontée de fontis en surface lors de la déstabilisation des ouvrages souterrains et des modélisations numériques tendent à montrer qu'il améliore la stabilité des piliers et du mur de l'exploitation en apportant un confinement bloquant leurs déformations.

**ABSTRACT** – Partial backfilling is an effective method to reduce the surface implications due to underground exploitations. Indeed, it seems to limit the amount of subsidence due to pillar failure. Numerical modeling show that partial backfill generates lateral and direct support to the mine pillars and the wall strata, improving the stability by preventing their deformations.

### 1. Introduction

Toute présence de vides dans le sous-sol, qu'ils soient d'origine naturelle ou dus à l'activité humaine est susceptible d'avoir des effets à la surface. Les vestiges de mines et de carrières souterraines abandonnées constituent donc un risque non négligeable en termes de sécurité publique, de dégâts sur l'environnement et le bâti.

Dans des optiques de mise en sécurité des terrains sous-minés et de valorisation des déchets de la construction, la technique du remblayage partiel à partir du fond - avec des engins mécanisés - des carrières souterraines exploitées en chambres et piliers abandonnés peut être envisagée (Camelan, 1994).

Cette technique vise pour des raisons principalement économiques à limiter le comblement des vides à une hauteur de remblai jugée optimale en maintenant un niveau de sécurité adapté à la pérennité visée. Après une phase préparatoire éventuelle de mise en sécurité du site par boulonnage et purge, les matériaux sont acheminés au fond puis déversés. Il s'agit de matériaux de type tout-venant, déchets inertes, avec un traitement minimal par criblage (Collet et al., 2003). Cette méthode de mise en sécurité repose sur deux principes fondamentaux :

- le remblayage partiel entraîne une réduction effective du volume des vides favorisant une stabilisation à long terme des terrains par auto-comblement, en cas de déstabilisation du toit des cavités souterraines ;

- la mise en place d'un remblai conforte les piliers en augmentant leur résistance grâce à l'effet de fretage et la diminution de l'élancement des piliers permet de réduire les risques de rupture (Bonvallet, 1978 ; Chandellier, 1978).

La carrière souterraine de gypse de Livry-Gargan, exploitée par le groupe BPB Placoplâtre, est située en Seine-Saint-Denis. Après l'exploitation d'un quartier de la carrière, le remblayage partiel à mi-hauteur est mis en place pour assurer la stabilité des ouvrages souterrains. En prenant l'exemple de cette carrière, l'intérêt du remblayage partiel en terme de confortement de piliers et d'auto-comblement des cavités sera étudié analytiquement et numériquement.

## 2. Caractéristiques géologiques et géométriques de la carrière de Livry-Gargan

Le matériau exploité dans la carrière souterraine de Livry-Gargan est le gypse de la première masse du Ludien du bassin parisien. Cette masse a une puissance de 20 m et les terrains de recouvrement sont des marnes d'une puissance moyenne de 30 m.

L'exploitation se fait par "chambres et piliers" et elle s'étend sur 500 m de large et 1 km de long pour ses plus grandes dimensions. La géométrie des galeries et des piliers est montrée sur la figure 1. L'excavation est réalisée en trois phases, un traçage de 7 m et deux levages successifs de 5 m, ce qui aboutit à des galeries de 17 m de hauteur. Une couche de gypse de 2 m de hauteur en base de pilier présente des caractéristiques mécaniques plus faibles.

Dans les six mois suivant l'excavation, un remblayage partiel de 8 m de hauteur est réalisé puis, dans un temps plus long et en fonction de la disponibilité en matériaux, le remblayage est total dans certaines zones.

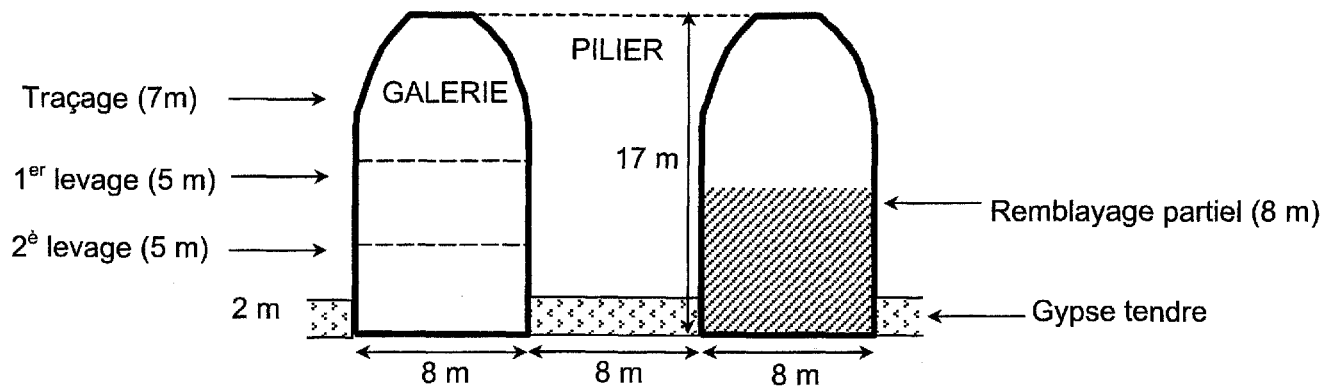


Figure 1. Géométrie des galeries et piliers dans la couche de gypse

## 3. Amélioration de la stabilité en surface

Dans le cas du déclenchement de phénomènes d'instabilité du toit d'une galerie dus à la dégradation et à la ruine d'un pilier, la stabilité en surface peut éventuellement être obtenue sans intervention humaine par auto-comblement de la cavité. En effet, le foisonnement des chutes de toit successives ainsi que des matériaux du pilier ruiné peut provoquer un auto-comblement de la cavité dégradée, et par conséquent un blocage des éboulements.

L'éboulement du toit consécutif à la défaillance des piliers concerne donc une hauteur  $h$  qui s'exprime en fonction de la hauteur de vide résiduelle, laissée disponible pour l'éboulement du toit, que l'on peut définir comme ouverture équivalente  $M^*$ , fonction de l'ouverture  $M$ , du coefficient de foisonnement  $K$  et du taux de défrusement  $\tau$  (Aissaoui, 1999) :

$$h = \frac{M^*}{K-1} = \frac{M - (1-\tau) \cdot M \cdot K}{K-1} \quad (1)$$

Le tableau 1 montre les hauteurs probables de remontée de fontis dans le cas de galeries non remblayées et remblayées partiellement à 8 mètres de hauteur. Le recouvrement étant de 30 mètres, on constate qu'une remontée de voûte dans des galeries non remblayées pourrait déboucher en surface, alors que le remblayage partiel semble permettre la stabilité de la surface.

Ces galeries de 17 mètres de hauteur ne permettent pas l'auto-comblement de la cavité en cas de rupture de pilier et provoquent l'apparition de désordres en surface (photo 1). En effet, un fontis débouche en surface à l'aplomb du pilier ruiné dans des quartiers non remblayés.

Tableau 1. Hauteur de remontée de fontis en fonction de la hauteur des galeries.

	Galeries non remblayées	Galeries remblayées
Hauteur de galerie (m)	17	9
Hauteur de remontée de la clôche dans les terrains de recouvrement (m)	environ 40 mètres	environ 18 mètres



a



b

Photo 1 a. Ruine d'un pilier et début de montée de voûte dans un quartier non remblayé.  
b. Fontis débouchant en surface à l'aplomb du pilier ruiné.

#### 4. Stabilité des piliers

Afin d'étudier la stabilité des piliers d'un point de vue purement mécanique, un pilier a été assimilé à une poutre encastree à ses deux extrémités et soumise à une compression  $F$ . La charge critique de Rankine  $P_r$  se calcule avec la formule suivante, avec  $P_E$  la charge critique d'Euler,  $P_c$  la charge limite en compression simple,  $S$  la section de la poutre ( $m^2$ ),  $E$  le module de Young (kPa) et  $\lambda$  l'élançement de la poutre :

$$\frac{1}{P_r} = \frac{1}{P_E} + \frac{1}{P_c} \Rightarrow P_r = \frac{\sigma_c \cdot S}{1 + \frac{\sigma_c \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot E}} \quad (2)$$

Cette charge correspond, dans le cas de la carrière de Livry-Gargan, à une contrainte critique de 2,4 MPa. Cette valeur est inférieure à la résistance à la compression à court terme du gypse de l'ordre de 5 MPa : la ruine du pilier à court terme sous le seul effet de la contrainte mécanique ne paraît pas possible.

Cependant la contrainte critique est proche de la valeur de la résistance à long terme qui est de 2,6 MPa. Cela signifie que lorsque la dégradation du pilier est trop importante, ses dimensions ne permettent pas de supporter la charge générée par les terrains de recouvrement ; le pilier est alors instable et sa ruine est probable. Ceci peut expliquer la décision prise au niveau du choix du laps de temps relativement court (6 mois au maximum) entre l'excavation et le remblayage.

En effet, dans cette carrière, dans les zones soumises à des charges très proches de la résistance à long terme des piliers, ces derniers présentent de nombreux indices de dégradation, tel que l'écaillage de leur partie inférieure (photo 2).

## 5. Modélisation du comportement des piliers lors du remblayage partiel

Des modélisations numériques avec le logiciel Flac 2D ont été effectuées pour étudier le comportement des piliers et du mur de l'excavation lors du remblayage partiel.

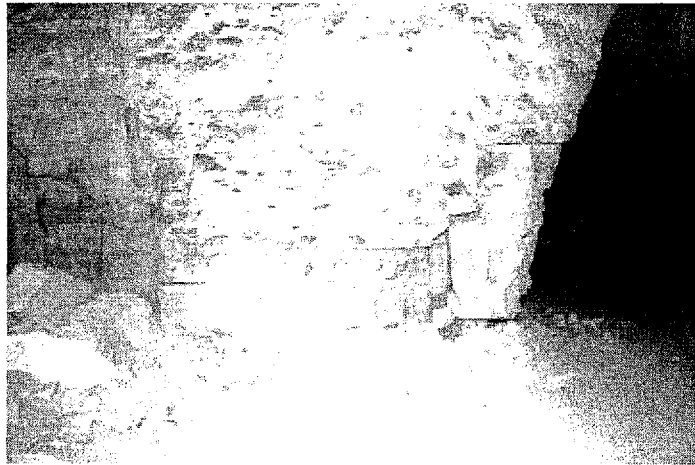


Photo 2. Dégradation de la base des piliers.

### 5.1. Description du modèle

Les calculs sont réalisés en axisymétrie. La géométrie du modèle est la suivante :

- un recouvrement de 30 mètres constitué de marnes gypseuses ;
- une couche de gypse exploitée de 20 mètres de puissance. Le pilier ainsi que la zone excavée modélisés ont une largeur de 4 mètres, le toit des galeries est constitué de 2 mètres de gypse et 1 mètre de matériau est laissé en place au mur de l'exploitation ;
- les marnes sous-jacentes de 50 mètres de puissance.

Les phases de la modélisation sont identiques au phasage réel de l'exploitation de la carrière : (i) excavation en trois phases, (ii) phase de dégradation des paramètres du gypse correspondant à l'intervalle de temps entre l'excavation et le remblayage partiel, et (iii) remblayage partiel.

Des essais triaxiaux réalisés sur le gypse de cette carrière ont montré un comportement non linéaire (Auvray, 2003). Le modèle élastoplastique *-strain hardening/softening-* est donc utilisé pour prendre en compte le comportement durcissant du gypse par le biais des variations des caractéristiques de Mohr-Coulomb à la rupture en fonction de la déformation déviatorique plastique  $\gamma^p$ . Les variations de la cohésion ( $c$ ), de l'angle de frottement interne ( $\varphi$ ) et de l'angle de dilatance ( $\psi$ ) ont été calculées à partir d'essais uniaxiaux et d'essais triaxiaux avec des confinements différents (fig. 2).

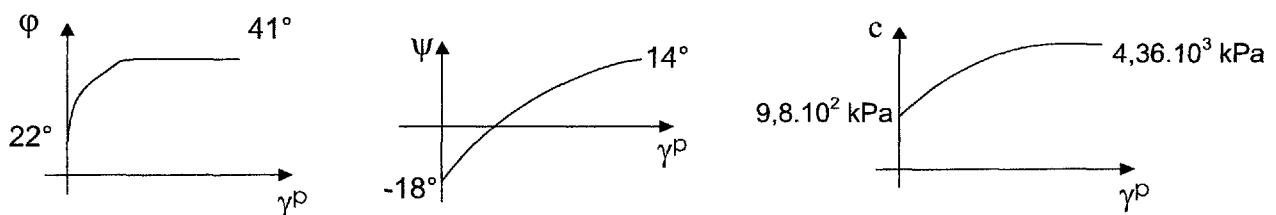


Figure 2. Variations des paramètres en fonction de la déformation déviatorique plastique.

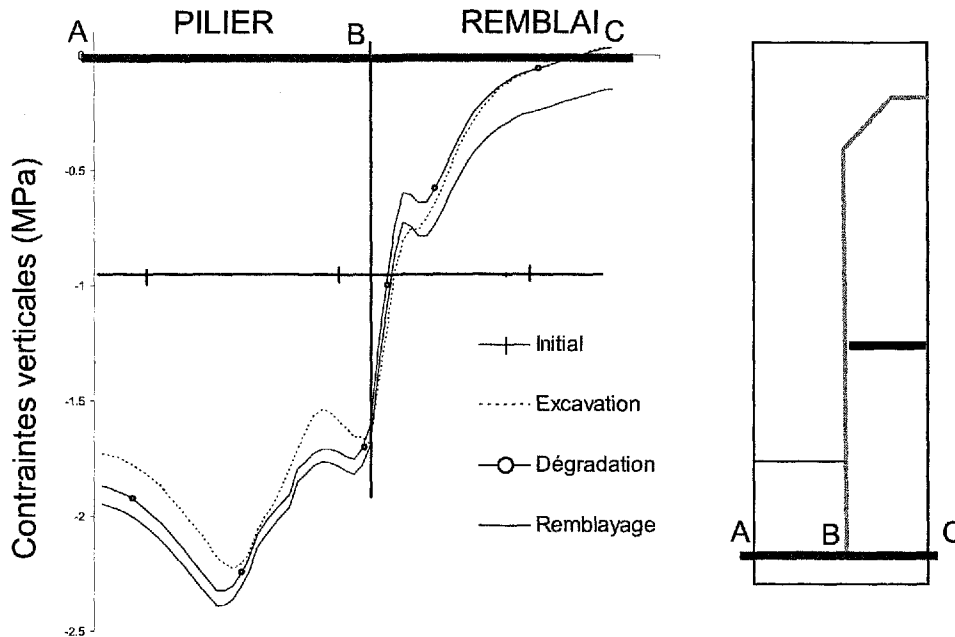
La phase de dégradation après l'excavation de la galerie est modélisée par une diminution de 10 % des caractéristiques du matériau gypseux correspondant à une diminution mise en évidence par des essais de laboratoire de sa résistance à la compression et à la traction.

## 5.2. Comportement du mur de la galerie

La figure 3 montre les contraintes verticales dans le mur de la galerie à chaque phase de l'exploitation.

Les phases d'excavation et de dégradation entraînent une augmentation des contraintes verticales dans le pilier par rapport à l'état initial. Les contraintes sont quasi-nulles voire légèrement positives (traction) dans le mur de la galerie. Le remblayage partiel permet de reconfiner le mur de 160 kPa et de limiter son soulèvement.

On peut voir lors de l'excavation que le pilier tend à poinçonner le mur de la galerie, d'où l'apparition d'une plasticité dans le gypse et les marnes sous-jacentes. De plus, la décompression impose un soulèvement, d'où une plastification de la partie supérieure du mur.

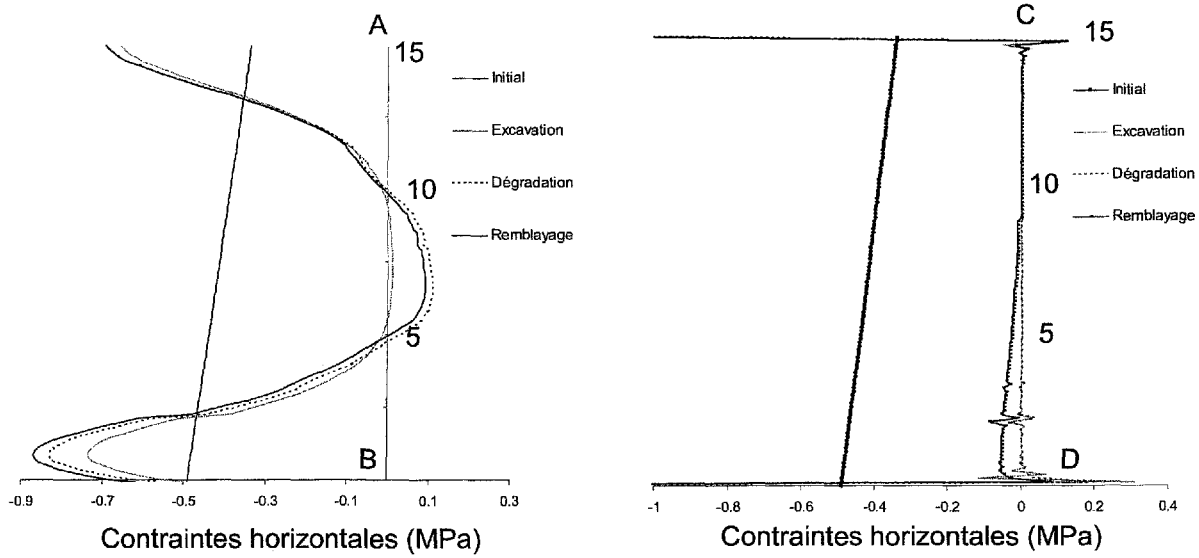


## 5.3. Comportement des piliers après le remblayage partiel

Les figures 4a et 4b montrent deux profils verticaux de contrainte horizontale dans le pilier, respectivement à 3 mètres de profondeur et au parement du pilier. L'excavation entraîne des contraintes horizontales nulles voire de traction au parement du pilier. Dans les angles supérieurs et inférieurs, les contraintes horizontales sont augmentées. Cette distribution des contraintes est conforme aux distributions de contraintes issues de la bibliographie (Hoek & Brown, 1980).

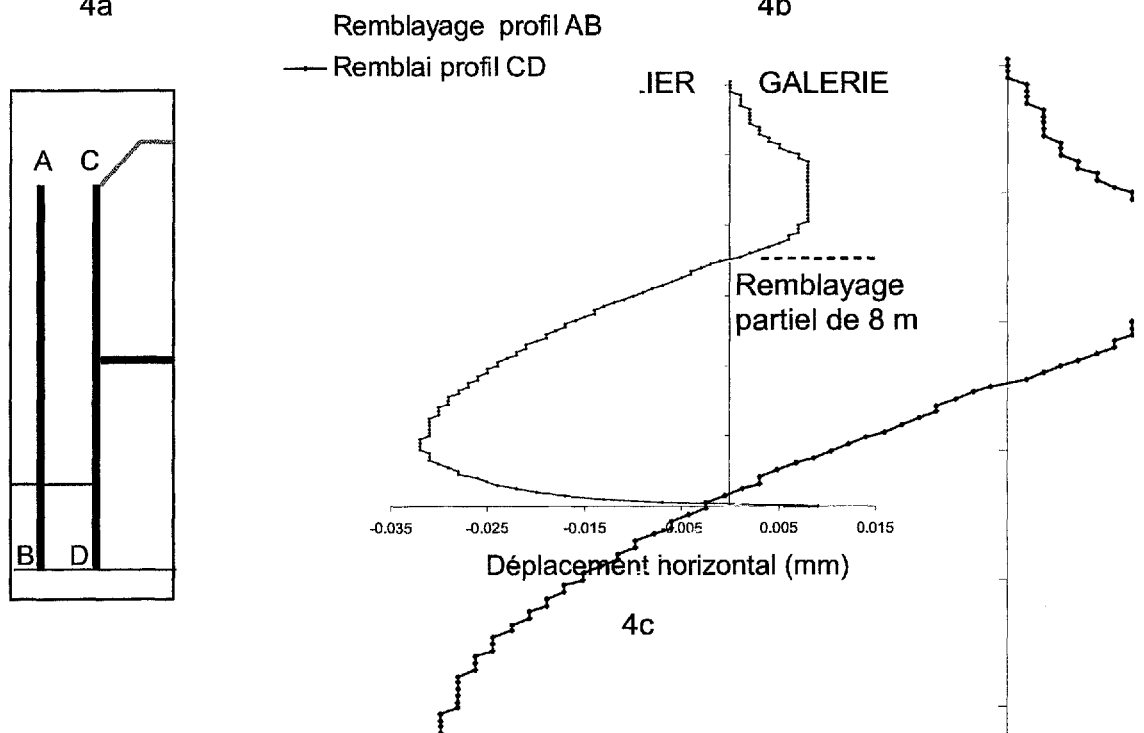
La mise en place du remblayage partiel permet de reconfiner le parement du pilier de l'ordre de 80 kPa. Ce confinement est moins important au cœur du pilier (20 à 30 kPa). Le remblayage partiel génère donc une pression triangulaire qui entraîne un blocage voire un léger resserrement des déplacements du parement du pilier (fig. 4c). En effet, le pilier paraît se contracter jusqu'à 8 mètres de hauteur et se dilater au-dessus de la surface du remblai.

Le confinement permet donc de diminuer le déviateur des contraintes et d'empêcher la rupture des piliers (fig. 5).



4a

4b



4c

Figure 4 a. Variations des contraintes horizontales à 3 mètres de profondeur dans le pilier.  
 b. Variations des contraintes horizontales au parement du pilier.  
 c. Déplacements horizontaux induits par le remblayage partiel.

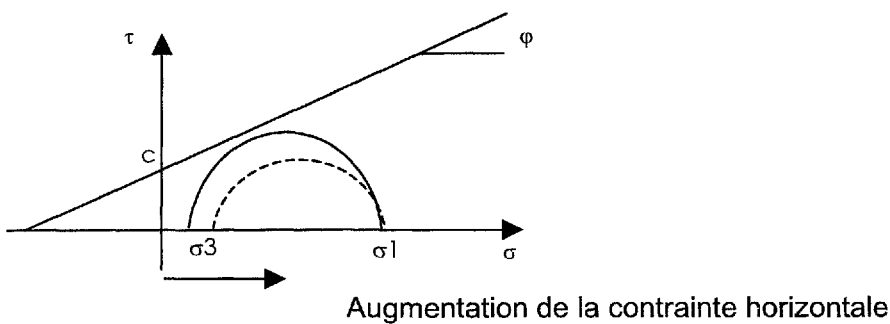


Figure 5. Amélioration de l'état de contraintes dans le pilier par apport de confinement.

## 6. Conclusion

Diverses méthodes de protection peuvent être mises en œuvre dans les exploitations souterraines pour assurer la sécurité des terrains sus-jacents et des infrastructures. Le cas présenté est la carrière souterraine de gypse de Livry-Gargan exploitée par la méthode des chambres et piliers. Une fois l'exploitation réalisée, un remblai partiel est mis en place.

Des calculs analytiques ont montré qu'il réduit l'élançement des piliers et évite ainsi le risque de rupture par flambement. Il améliore également la stabilité des terrains de recouvrement en permettant un auto-comblement des remontées de voûte, car il diminue le volume des vides résiduels après exploitation.

Des modélisations numériques réalisées avec le logiciel Flac 2D ont montré que :

- l'excavation et la phase de dégradation entraînent un déplacement du parement du pilier et une diminution des contraintes horizontales ;
- le remblayage partiel génère un confinement des piliers et bloque leurs déformations sans provoquer de réel resserrement ;
- il permet d'augmenter les contraintes verticales dans le mur de l'exploitation et d'éviter ainsi sa rupture due aux contraintes de traction lors de l'excavation.

Le remblayage partiel apparaît donc comme une méthode de protection efficace des terrains à l'aplomb des exploitations souterraines. D'autres modélisations et des instrumentations *in situ* sont effectuées pour mieux comprendre les mécanismes mis en jeu, afin d'être en mesure de généraliser l'intérêt du remblayage partiel à d'autres carrières.

## 7. Références bibliographiques

- Aissaoui K. (1999) Amélioration de la prévision des affaissements dans les mines à l'aide des approches empiriques, numériques et analytiques. *Thèse de Doctorat de l'INPL*.
- Auvray C. (2003) Vieillesse et comportement rhéologique du gypse. *Thèse de Doctorat de l'INPL, Nancy, France*.
- Bonvallet J. (1978) Critères de stabilité des exploitations souterraines à faible profondeur. Application au cas des carrières souterraines du Nord. *Thèse de Doctorat de l'INPL*.
- Camelan J-C. (1994) Remblaiement des carrières souterraines en région parisienne, *Mines et Carrières, Revue de l'Industrie Minérale*, juillet, pp. 7-78.
- Collet T., Masroui F. & Didier C. (2003) Mise en sécurité des carrières souterraines, *Post-Mining 2003, Impacts and risk management, International Symposium*, Nancy, France.
- Chandellier J. (1978) Comportement des roches fracturées sous faible confinement latéral. *Thèse de Doctorat de l'INSA, Lyon*.
- Hoek E. & Brown E.T. (1980) Underground excavations in Rock. *The institution of Mining and Metallurgy*, London.