



HAL
open science

Principes de traitement d'anciens ouvrages miniers débouchant en surface

Francis Wojtkowiak, Christophe Didier

► **To cite this version:**

Francis Wojtkowiak, Christophe Didier. Principes de traitement d'anciens ouvrages miniers débouchant en surface. 9. Congrès International de Mécanique des Roches, Aug 1999, Paris, France. pp.25-30. ineris-00972173

HAL Id: ineris-00972173

<https://ineris.hal.science/ineris-00972173>

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.

Principes de traitement d'anciens ouvrages miniers débouchant en surface.

Principles for a safe closure of old mine shafts and adits.

Sicherungsmaßnahmen für aufgegebene Tagesschächte und Schrägstollen.

F. WOJTKOWIAK et C. DIDIER, INERIS, Verneuil en Halatte, France.

RESUME : Les anciens puits, galeries et descenderies de mine qui débouchent au jour présentent des risques évidents pour la sécurité des personnes et des biens se situant dans leur zone d'influence directe. Parmi les différentes méthodes mises en œuvre pour traiter les anciens ouvrages miniers, nous présentons plus particulièrement la technique du bouchon autoportant. Le bouchon autoportant est un massif en béton mis en place au sein de la colonne du puits et qui s'appuie sur le revêtement du puits pour assurer sa propre stabilité. Il est dimensionné pour reprendre son propre poids, être capable de supporter une surcharge en tête et résister à un éventuel débouillage des remblais sous-jacents. Le principe du bouchon en galerie est très similaire à celui développé pour les puits, mais il doit, en plus, conforter les terrains en arrière de l'orifice sur une distance suffisante pour éviter tout risque de remontée de fontis. Selon l'inclinaison de la galerie et la nature des terrains de recouvrement, on compte alors sur l'autofoiisonnement des terrains éboulés ou sur l'auto-stabilisation du fontis par formation d'une voûte stable au sein du recouvrement.

ABSTRACT : Former mining openings (shafts, adits and declines close to the surface), which are still open or simply covered up, present obvious hazards for the people and human activities near-by. Different procedures are implemented to secure such openings, but the self-supporting plug technique is often the most appropriate method. Self supporting plugs are concrete structures implemented within the shaft and which rest on its lining to ensure their own stability. The plug must be able to bear its own weight, support an excessive load and resist to a possible underlying backfill column untamplng. The principle of a plug in an adit is quite similar to that developed for shafts. However, the adit plug must also strengthen the rock mass at the rear of the opening over a sufficient area to prevent any sinkhole formation or subsidence. According to the type of overburden and slope of galleries, we can depend on rubble self-swelling, or on an auto-stabilization of the disorder with the forming of a steady vault within the overburden, to guarantee the long term stability of the galleries.

ZUSAMMENFASSUNG : Aufgegebene Tagesschächte und -Stollen bilden, in ihrem direkten Einwirkungsbereich, ein undiskutables Risiko für die Tagesoberfläche. In diesem Bericht werden verschiedene Sicherungsmaßnahmen dieser aufgegebenen Grubenbaue präsentiert.

Im Detail beschreiben wir die Technik des selbshaltenden Propfens, welcher ein in den Schacht eingefügter Betonklotz ist, der sich zu seiner eigenen Stabilität auf die Schtwand anlehnt. Dieser Propfen wird so dimensioniert, daß weder ein Übergewicht auf seinem oberen Ende, noch ein absacken des Füllmaterials an seinem unteren Ende, sein abrutschen provozieren können.

Die Technik des Stollenpropfens ist der des Schachtpropfens sehr ähnlich. Ein solcher Stollenpropfen muß aber ausserdem, auf einer ausreichenden Distanz hinter der aufgegebenen Öffnung, die Stabilität des ehemaligen Stollen sichern, um Tagesbrüche zu verhindern. Je nach Einfallen des Stollens sowie der Geologie des Deckegebirges muß eine solche Sicherungsmaßnahme soweit reichen daß ein eventueller Bruch vor der Tagesoberfläche auslaufen wird.

1.

1. EXTENDED SUMMARY

It is quite a complex task to close down and secure mining sites that are abandoned or no longer exploited as such operations are subject to current laws and regulations as well as miscellaneous technical, financial, social and political parameters. More specifically, former mining openings (shafts, adits and declines that are close to the surface) constitute a major problem as several thousands of such works are presently scattered over France. Furthermore, their precise location is not always known accurately enough.

Shafts and adits which are still open or simply covered up present obvious hazards for the people and human activities near-by. Besides, mining works which were back filled in the past in a non-satisfactory fashion can also affect the surface's stability in case of sudden stowage movement. Therefore, it is essential to locate and deal with all suspected or acknowledged openings that require treatment in an efficient and perennial manner in order to make the land's surface safe.

Selection of the most appropriate method to secure such openings is based on a strict appraisal which requires collection

of any available information concerning the work and its environment (location, geometrical characteristics of the opening, geology, hydrogeology, etc.) as well as a perfect knowledge of the limits of the various available techniques.

For securing former abandoned works in which it would be particularly hazardous to enter in order to perform major works, the self-supporting plug technique is often used. Self-supporting plugs are concrete cylinders implemented within the shaft and which rest on its lining to ensure their own stability. Adherence between the plug and lining is mainly ensured by the concrete-masonry contact whose quality depends on the lining's type and state as well as on the quality of the used concrete and of its implementation. Furthermore, although it is rather complex to quantify, the form effect due to the shaft's section variations along the profile also enhances the structure's stability. The plug must be dimensioned in order to guarantee its auto-stability in time. In this sense, the plug must be able to bear its own weight, support an accidental excessive load (e.g. if a vehicle on the surface passes over it) and resist to a possible underlying back fill column untamping (bottom suction effect). Self-supporting plugs are always performed in compact rock horizons (in order to

transmit to the land the stress due to the structure's presence). In this article, the various statistical calculation principles to dimension the self-supporting plugs are detailed and applied to actual cases. Furthermore, the reason why this technique can only be envisioned for shafts with relatively limited diameters is also provided.

The principle of a plug in an adit is quite similar to that developed for shafts. However, further to blocking the entry of the former works and guarantying its auto-stability in time, the adit plug must also strengthen the rock mass at the rear of the opening over a sufficient area to prevent any sinkhole formation or subsidence problem and therefore make the surface area safe. To achieve such a goal, a specific and complex dimensioning of the plug is required. The two following cases can occur, according to the type of overburden and slope of the works:

- slightly sloped or horizontal gallery and rather non-cohesive covering : to guarantee stability of the disorder triggered within the gallery, we depend on rubble self-swelling;
- the sloped gallery : as the rubble cannot form a cone at the bottom of the adit, we can only depend on an auto-stability of the disorder with the forming of a steady vault within the overburden.

The INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques) has developed an analytical model for each one of these specific cases.

2. INTRODUCTION

La fermeture et la mise en sécurité des sites miniers abandonnés ou arrêtés sont des opérations complexes, conditionnées par la législation en vigueur et différents paramètres techniques, financiers et socio-politiques. La mise en sécurité des anciens orifices miniers abandonnés (puits, descenderies et galeries à faible profondeur) constitue l'un des principaux objectifs à atteindre, car plusieurs milliers de ces ouvrages, dont l'emplacement exact n'est pas toujours connu avec suffisamment de précision, parsèment aujourd'hui le territoire français.

Les puits et descenderies abandonnés, encore ouverts ou simplement recouverts, présentent des risques évidents pour les populations et les activités humaines situées dans leur zone d'influence directe. Certains ouvrages, pourtant déjà remblayés par les anciens (mais pas toujours de manière satisfaisante), peuvent également, en cas de remobilisation brutale des remblais, affecter la stabilité de la surface.

Parmi les principaux scénarios d'accidents ou d'incidents, on peut citer :

- les entrées accidentelles ou forcées dans les anciens travaux (chutes, chutes de blocs du toit des galeries...);
- l'occurrence d'affaissements à l'aplomb ou en périphérie de l'ouvrage (tassements des remblais, éboulement progressif de galeries peu profondes...);
- l'occurrence d'effondrements de la surface (débouillage de puits, formation de fontis à l'aplomb de galeries...);
- l'émanation de gaz de mine (asphyxie, toxicité, explosivité...);
- l'apparition de résurgence d'eau de mine dans des zones urbanisées mal adaptées à ce type de nuisances.

De nombreux effondrements ou dégagements gazeux sont ainsi survenus en France et dans d'autres pays européens lors des dernières décennies. Pour certains d'entre eux, des victimes ont malheureusement dû être déplorées. Pour assurer la mise en sécurité satisfaisante des terrains de surface, il est indispensable de localiser puis de traiter efficacement et de manière pérenne les orifices, connus ou suspectés, qui le nécessitent.

Les principales méthodes classiquement mises en œuvre pour traiter les anciens puits, galeries ou descenderies sont :

- les fermetures dites légères, principalement adaptées aux anciens orifices situés dans des zones très difficilement accessibles ;
- le remblayage (simple ou contrôlé) des puits ou galeries ;
- la réalisation de dalles ou de couvertures réalisées en surface ou au sommet du massif rocheux ;
- la mise en place de serrements ;
- la constitution de bouchons en béton réalisés au sein des ouvrages....

Le choix de la méthode de mise en sécurité la plus adaptée est une démarche d'expertise très délicate qui nécessite de collecter toutes les informations disponibles sur l'ouvrage et son environnement (localisation, caractéristiques géométriques de l'ouverture, géologie, hydrogéologie...) et de bien connaître les limites des différentes techniques disponibles.

Nous aborderons plus particulièrement les méthodes de fermeture et de mise en sécurité des puits et des galeries par la constitution de bouchons autoportants, technique fréquemment utilisée pour la mise en sécurité d'anciens ouvrages délaissés au sein desquels il pourrait s'avérer délicat, voire dangereux, de pénétrer pour entreprendre des travaux lourds. Le dimensionnement de tels bouchons est généralement délicat car le calcul ne peut se baser sur une approche classique de résistance des matériaux. Il exige également la prise en compte du comportement mécanique à long terme des terrains encaissants ou de recouvrement.

3. BOUCHON AUTOPORTANT REALISE AU SEIN D'UNE COLONNE DE PUIITS

3.1 Principe

Les bouchons ont pour objectifs de condamner définitivement l'accès aux anciens travaux et de garantir la stabilité des terrains de surface. Suivant la nature du revêtement et des terrains encaissants, on distingue deux grands types de bouchons : ceux qui s'appuient sur le revêtement du puits et ceux qui s'appuient sur le massif lui-même. Le choix de la technique la mieux adaptée résulte pour beaucoup de l'accessibilité dans les anciens travaux.

Lorsque la pénétration dans le puits n'est plus envisageable dans des conditions de sécurité satisfaisantes pour y entreprendre les travaux nécessaires, on a généralement recours à la mise en place d'un bouchon dit autoportant car il s'appuie sur le revêtement du puits pour assurer sa propre stabilité (figure 1).

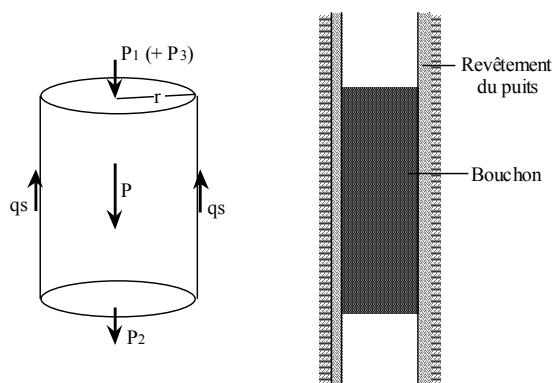


Fig. 1 : Principe et équilibre d'un bouchon autoportant

Les bouchons autoportants sont des cylindres de béton (lorsque le puits est circulaire) mis en place au sein de la colonne du puits. L'adhérence entre le bouchon et le revêtement est essentiellement assurée par le contact béton-maçonnerie dont la qualité dépend de la nature et de l'état du revêtement ainsi que de la qualité du béton utilisé et de sa mise en œuvre. L'effet de

forme, lié aux variations de la section de la colonne de puits, participe également à la stabilité de la structure mais son apport est très délicat à quantifier (Hartmann et al, 1978).

Le bouchon doit être dimensionné pour garantir à terme son autostabilité. Il doit, pour ce faire, pouvoir reprendre son propre poids, être capable de supporter une surcharge accidentelle en tête (passage d'un engin en surface par exemple) et résister à un éventuel débouillage de la colonne de remblais sous-jacente (effort d'aspiration en pied). Les bouchons autoportants sont donc systématiquement réalisés au sein d'horizons rocheux massifs afin de pouvoir retransmettre aux terrains environnants, par l'intermédiaire du revêtement, les contraintes qu'ils engendrent et celles qui peuvent s'exercer sur eux.

3.2 Bouchon autoportant réalisé en tête de puits

Soit un bouchon de béton vertical, d'une longueur h coulé au niveau de la tête d'un puits de périmètre p et de section S . Le contact latéral béton-revêtement présente une résistance au cisaillement q_s . Outre son propre poids (déterminé par son poids volumique γ), le bouchon peut être soumis à une surcharge de surface P_1 due, par exemple, au passage à l'aplomb du bouchon, d'un engin lourd ou la constitution d'une plate-forme de remblai, et à une contrainte de succion P_2 résultant d'un éventuel débouillage de la colonne de remblai sous-jacente. On note K , le coefficient de sécurité du bouchon. Le calcul en statique des différents efforts s'exerçant sur le bouchon s'exprime par :

$$K(P_1S + P_2S + \gamma Sh) = p h q_s$$

On en déduit la valeur de la hauteur de bouchon requise :

$$h = \frac{KS(P_1 + P_2)}{pq_s - K\gamma S}$$

En considérant un puits circulaire de rayon r , on obtient alors :

$$h = \frac{Kr(P_1 + P_2)}{2q_s - K\gamma r}$$

En général, un coefficient de sécurité K de 3 est retenu pour s'assurer de la stabilité de la structure à long terme. Le poids volumique du béton γ est généralement voisin de 23 kN/m^3 et les contraintes verticales P_1 et P_2 , dues respectivement aux surcharges de surface et à l'effet de succion, sont prises toutes deux égales à 100 kPa . Cette dernière valeur est supérieure à celles que préconisait l'ex National Coal Board (NCB, 1982) qui considérait en général une surcharge en surface de 33 kPa et une contrainte de succion pouvant atteindre 60 à 80 kPa (pour des puits de plus de 200 mètres de profondeur).

Pour déterminer la hauteur de bouchon garantissant une adhérence satisfaisante entre celui-ci et le revêtement, la difficulté réside donc essentiellement, pour un rayon donné, dans l'évaluation de la résistance au cisaillement q_s caractérisant l'interface béton-revêtement. Une analyse bibliographique détaillée a mis en évidence que cette résistance au cisaillement est classiquement comprise entre 180 kPa et 300 kPa , la valeur la plus fréquemment citée par les différents auteurs se situant aux alentours de 200 kPa (Didier, 1997).

Les différentes courbes de la figure 2 présentent l'évolution de la hauteur du bouchon autoportant, réalisé en tête de puits, en fonction du rayon du puits et de la résistance au cisaillement q_s à l'interface béton-revêtement. Ces hauteurs garantissent l'autostabilité du bouchon avec un coefficient de sécurité de 3, même lorsqu'il est soumis aux effets cumulés d'une surcharge en surface et d'une contrainte de succion en pied de 100 kPa chacune.

Comme on pouvait s'y attendre, la valeur de q_s influe grandement sur le dimensionnement du bouchon. Pour des bouchons d'élanement 2 (longueur correspondant à deux diamètres du puits), le traitement est toujours satisfaisant ($K \geq 3$) pour des diamètres de puits inférieurs à

6 m . La hauteur des bouchons atteint $7,5 \text{ m}$ pour un élanement

de 3. Au-delà d'un diamètre de puits de 9 m , la méthode du bouchon autoportant, non armé ni ancré, nécessite la garantie d'une résistance au cisaillement q_s élevée, au moins égale à 250 kPa . Ceci s'explique par le fait que lorsque r croît, le poids du bouchon (proportionnel à r^2) augmente plus vite que les forces de frottement à l'interface béton-revêtement qui, elles, sont proportionnelles à r . L'augmentation de la longueur du bouchon ne fournit alors qu'une impression de sécurité illusoire. Au-delà de 9 mètres de diamètre, des traitements complémentaires à la réalisation d'un bouchon autoportant doivent donc être préconisés.

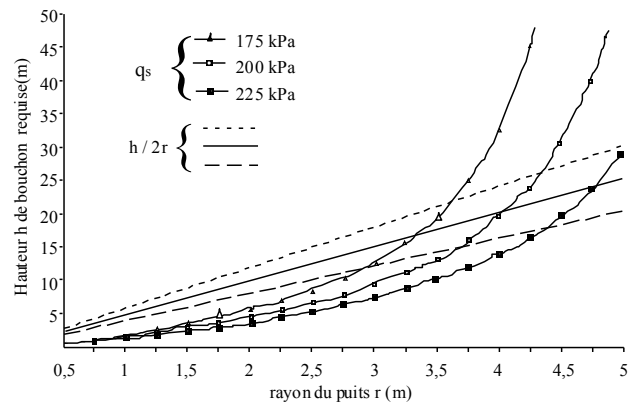


Fig. 2 : Hauteur du bouchon autoportant permettant d'assurer son autostabilité avec un coefficient de sécurité de 3.

3.3 Bouchon autoportant réalisé en profondeur

Lorsqu'il n'existe pas d'horizons rocheux suffisamment sains (peu fracturés et peu altérés) et résistants à proximité de la surface du sol, on est amené à réaliser le bouchon autoportant plus en profondeur dans le puits, en regard de formations présentant ces garanties. La colonne du puits, restée vide entre le haut du bouchon et l'orifice du puits, est ensuite remplie soit par des remblais directement déversés dans le puits et qui pèsent sur le bouchon, soit par du béton maigre capable de reprendre en partie son propre poids en s'appuyant sur les parois du puits.

Si on considère que l'intégralité du poids de la colonne de remblais s'applique sur la tête du bouchon autoportant, le dimensionnement de ce dernier conduit, au-delà d'une vingtaine de mètres de profondeur, à des hauteurs de bouchon très vite dissuasives qui condamnent économiquement le recours à cette technique. Pour se rapprocher d'un comportement physique plus réaliste des matériaux de remblai granulaires, il est nécessaire d'intégrer la contribution de "l'effet silo" : la charge exercée par les matériaux granulaires sur la base du silo ne croît pas proportionnellement avec la hauteur d'ensilage et, au-delà d'une certaine profondeur, la pression exercée sur les parois est constante.

A partir des expériences menées par M.L. et A.M. Reimbert (1974), l'influence de l'effet silo sur le dimensionnement des bouchons autoportants profonds a pu être quantifiée (Didier, 1998). La figure 3 indique, pour différents rayons de puits, l'évolution du rapport entre la hauteur de bouchon calculée en intégrant l'effet silo et celle calculée sans en tenir compte, en fonction de la profondeur du bouchon autoportant. Ces courbes ont été établies pour un remblai dont l'angle de frottement interne est de 30° .

L'influence de l'effet silo est d'autant plus sensible que le rayon du puits est petit et que les profondeurs de bouchon sont importantes. Les variations de hauteur de bouchon deviennent vraiment significatives pour des profondeurs sensiblement égales à 4 fois le rayon du puits. En-deçà de cette valeur ($h/r \leq 4$) les corrections résultant de l'effet silo ne doivent donc pas être

prises en compte. Le bouchon est alors dimensionné pour reprendre l'intégralité du poids des remblais sus-jacents tel que $h = \frac{Kr(P_1 + P_2 + P_3)}{2q_s - K\gamma r}$, P_3 étant la charge induite par la colonne de remblai (figure 1).

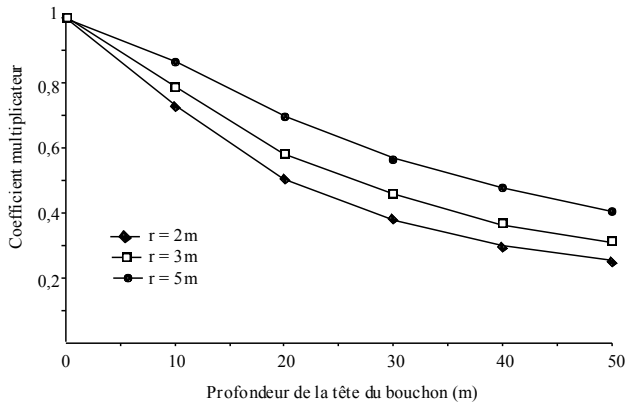


Fig. 3 : Evolution du rapport des hauteurs de bouchon intégrant ou non l'effet silo en fonction du rayon r du puits.

3.4 Conditions de réalisation du bouchon

Lorsque les vieux puits de mine sont déjà remblayés, le bouchon est directement coulé sur les remblais. Si nécessaire, les matériaux superficiels sont préalablement excavés jusqu'à une certaine profondeur de manière à garantir la hauteur de bouchon adéquate. Dans le cas contraire, le remblayage du puits est souvent un préalable nécessaire, lorsqu'il n'est pas possible de réaliser dans le puits une plate-forme, ancrée dans le revêtement (ou le massif encaissant) ou suspendue depuis la surface, sur laquelle on coule le bouchon.

Compte tenu de leur longueur, on est fréquemment obligé de couler les bouchons autoportants en deux phases afin de ne pas trop surcharger la colonne de remblai sous-jacente. On réalise donc un prébouchon qui, après la prise du béton, est capable de supporter la coulée du bouchon restant sans s'appuyer sur les remblais.

Pour éliminer tout risque de pénétration accidentelle ou forcée dans le puits et renforcer la tête du puits et les terrains encaissants, le bouchon doit être suffisamment long. Ainsi, sa longueur est très souvent deux à trois fois supérieure au diamètre du puits.

4. FERMETURE DES GALERIES ET DESCENDERIES

Le principe du bouchon en galerie inclinée est très similaire à celui développé précédemment pour les puits. Ceci dit, si le bouchon de galerie doit également condamner définitivement toute tentative de pénétration dans les anciens travaux et garantir sa propre stabilité à long terme, il doit, en plus, conforter les terrains en retrait de l'orifice sur une distance suffisante pour éviter tout risque de propagation d'éboulements souterrains vers le jour pouvant donner naissance à des fontis en surface.

Ce dernier objectif nécessite un dimensionnement spécifique du bouchon, souvent délicat à déterminer. Suivant la nature des terrains de recouvrement et l'inclinaison de la galerie, on distingue généralement deux cas :

- le cas où, pour garantir la stabilisation d'un éboulement qui affecte la galerie, on compte sur l'auto-comblement par foisonnement des terrains éboulés (cas de galeries horizontales ou peu pentées dans des terrains peu résistants) ;

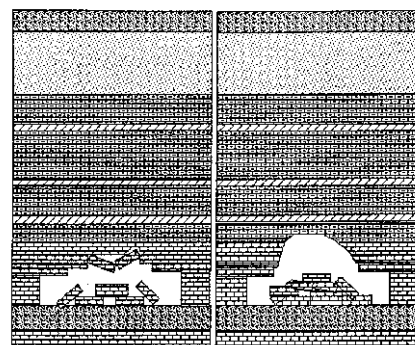
- le cas où les éboulis ne pouvant former un cône en pied de galerie, on ne peut compter que sur l'auto-stabilisation de l'éboulement par formation d'une voûte stable au sein du recouvrement (cas de la galerie pentée en terrains résistants).

Notons que la technique du bouchon de surface garantit l'inviolabilité et la condamnation définitive de l'orifice si la longueur du bouchon de béton atteint quelques mètres (3 à 5 m en général).

4.1 Prise en compte du foisonnement des terrains éboulés

La présence d'horizons meubles ou peu résistants (marnes, sables, argiles...) dans les terrains de recouvrement est propice à la formation de fontis qui résultent d'instabilités localisées du toit de la galerie. En l'absence de bancs épais et résistants dans le recouvrement, et si la profondeur est faible, ces fontis ne peuvent arrêter leur propagation vers la surface à des configurations de voûte stables et finissent par déboucher brusquement au jour en créant des entonnoirs dont les diamètres peuvent varier de quelques mètres à quelques dizaines de mètres.

Les terrains foisonnent en s'ébouyant et forment au mur de la galerie un cône d'éboulis qui se répand dans l'espace souterrain disponible, avec, pour angle à la base, l'angle de talus naturel de ces matériaux (figure 4). L'éboulement (cheminée) remontant dans le recouvrement fait grossir le cône qui s'étale dans la galerie et s'élève vers le toit de celle-ci. Dans certaines conditions, on peut aboutir à l'autocomblement d'une remontée de fontis par foisonnement des terrains éboulés. Notons à ce stade que dans le cas de galeries inclinées (jusqu'à 40° dans certains bassins houillers), les matériaux éboulés ont tendance à dévaler ou à glisser dans le sens de la pente et ne s'accumulent donc pas forcément à l'aplomb du fontis.



Rupture de toit avec chutes de blocs dans une ancienne exploitation

Montée de voûte par chutes successives de blocs du bas-toit

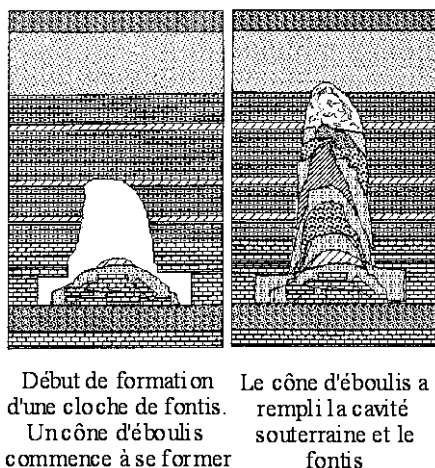


Fig. 4 : Phases d'évolution d'un fontis avec autocomblement de la galerie et de la cheminée par foisonnement des terrains.

Parmi les paramètres qui interviennent dans le processus d'autocomblement d'une remontée de fontis, citons : la nature et l'épaisseur des terrains de recouvrement, le coefficient de foisonnement des terrains et l'angle de pente naturel des éboulis, la hauteur de remontée du fontis et, enfin, la pente et le volume de la galerie à combler. Ce n'est que sur ce dernier paramètre qu'il est, en fait, possible d'intervenir pour favoriser le processus d'autocomblement du fontis.

Un modèle analytique, basé sur une approche purement volumétrique d'une remontée de fontis a été développé par l'INERIS pour déterminer l'épaisseur de recouvrement nécessaire permettant de garantir une auto-stabilisation d'un éboulement par foisonnement (Didier et al, 1996). Ce modèle, mis en œuvre et calé sur des configurations très différentes, permet notamment, pour limiter les coûts de traitement et de mise en sécurité des galeries minières, d'évaluer une hauteur de remblayage partiel de ces ouvrages lorsque cette technique s'avère adaptée à leur environnement. Une telle démarche, qui vise à réduire le coût des travaux, a pour objectif d'assurer la sécurité des personnes en évitant les risques d'effondrement sans pour autant préserver l'intégrité du bâti et des infrastructures de surface puisqu'on admet l'occurrence d'affaissement de faible amplitude en surface. Cette solution est donc essentiellement adaptée aux secteurs non urbanisés.

Sur un plan purement économique, les conditions d'application du remblaiement partiel permettent un gain de 20 à 50 % sur le coût des produits de remblai et, éventuellement, de réduire le nombre de forages nécessaires à la mise en place du remblai par déversement à partir de la surface.

4.2 Prise en compte d'une auto-stabilisation de l'éboulement

La présence de galeries proches de la surface peut, on l'a vu, engendrer des éboulements locaux susceptibles de se propager jusqu'au jour sous forme de fontis. Dans le cas de galeries creusées en terrains stratifiés, dont on connaît bien la lithologie, on peut estimer l'épaisseur de recouvrement minimale nécessaire pour garantir une autostabilisation de l'éboulement par formation d'une voûte stable. A partir de cette épaisseur, il est alors possible de calculer la longueur du bouchon à réaliser pour assurer la stabilité de la surface.

Une approche théorique du phénomène de montée de voûte a été développée pour un recouvrement résistant constitué de bancs calcaires continus et durs (calcaires du Fuvélien du bassin houiller de Provence) (Didier, 1997). Une formulation analytique

poussée de la résistance des bancs du toit met en évidence que pour un recouvrement constitué de n couches d'épaisseur e_i surplombant une galerie de portée ℓ_0 , la montée de voûte est censée pouvoir affecter une hauteur h définie comme suit (figure 5) :

$$h = \sum_{i=1}^n e_i$$

avec e_i vérifiant l'équation suivante :

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = k_r^2 \ell_0^2$$

Le coefficient k_r représente la limite inférieure du rapport e/ℓ , en-deçà de laquelle le banc considéré est susceptible de se rompre par flexion.

$$k_r = \sqrt{\frac{3K\gamma h_r}{4R_f}}$$

K est le coefficient de sécurité intégrant la variabilité des caractéristiques mécaniques et géologiques du toit, γ le poids volumique des terrains de recouvrement, h_r la hauteur de recouvrement surplombant la poutre (le banc) considérée et R_f la résistance à la flexion du matériau.

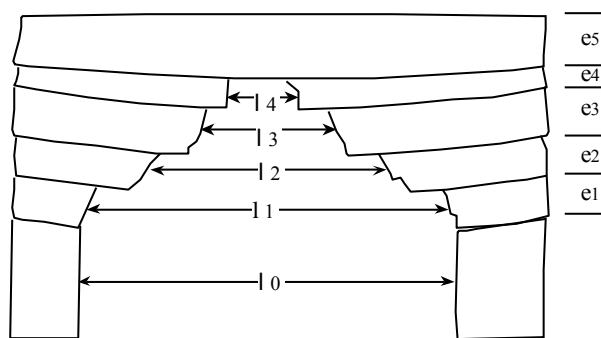


Fig. 5 : Principe d'analyse d'une remontée de voûte.

A partir de la coupe géologique des terrains de recouvrement, on peut déterminer les hauteurs de remontée de voûte prévisibles. Il s'agit, pour ce faire, d'effectuer, en remontant depuis le toit de la galerie, la somme des carrés des épaisseurs des bancs successifs e_i^2 jusqu'à obtenir la valeur $k_r^2 \ell_0^2$. Cette valeur caractérise les propriétés mécaniques du massif excavé ainsi que la géométrie de la galerie à traiter. Tant que la somme de e_i^2 n'atteint pas cette valeur, la montée de voûte est susceptible de continuer à se propager vers la surface jusqu'à ce qu'elle rencontre un banc suffisamment épais pour stopper le phénomène. Pour que ce raisonnement puisse s'appliquer à des poutres, on ne prend en compte, dans la sommation des e_i^2 , que les bancs du recouvrement dont l'épaisseur e_i est supérieure à $\ell_0/4$ et, dans tous les cas, supérieure à 20 cm. Cette hypothèse joue dans le sens de la sécurité.

Prenons l'exemple de terrains en place surplombant une couche de charbon, la Mauvaise Mine, dans une zone où la veine est recoupée à une profondeur de 25 mètres. On considère une galerie de 4 mètres de largeur traversant des calcaires fuvéliens présentant une résistance moyenne à la flexion de 5 MPa pour un poids volumique de 25 kN/m³.

On a $k_r = 0,612$ d'où $k_r^2 \ell_0^2 = 5,99$

On somme donc les e_i^2 des bancs dont l'épaisseur est supérieure à $\ell_0/4$ c'est-à-dire 80 cm.

On considère la progression d'une montée de voûte initialisée au niveau du toit de la Mauvaise Mine. La succession se présente comme suit (le tableau se lit de bas en haut) :

Nature des divers bancs	Epaisseur $e_i (m)$	$k_r^2 \ell_o^2 - \sum_{i=1}^n e_i^2$	Hauteur cumulée $\sum_{i=1}^n e_i$
Calcaire Bleu	1,84	-1,72	6,51
Calcaire Bleu	0,88	1,66	5,63
Calcaire Bleu	0,48	2,43	5,15
Calcaire Bleu	0,68	2,43	4,47
Calcaire Bleu	0,55	2,43	3,92
Rocher très dur	0,85	2,43	3,07
Filon charbon	0,02	3,16	3,05
Calcaire Blanc	0,69	3,16	2,36
Calcaire Gris	1,02	3,16	1,34
Lintal de la Mauvaise Mine	1,34	4,2	0

La valeur critique est atteinte au niveau d'un banc de calcaire bleu présentant une épaisseur voisine de 2 m. Le calcul indique que la montée de voûte est susceptible de se propager sur environ 7 m, ce qui, à une profondeur de 25 m, n'est pas préoccupant. On évalue en effet généralement entre 3 et 5 m l'épaisseur minimale de recouvrement rocheux au-dessus du banc capable de stopper la montée de voûte permettant de garantir un niveau de sécurité satisfaisant dans une zone non urbanisée.

5. CONCLUSION

Les demandes d'arrêt définitif des travaux miniers nécessitent en particulier de fournir les principes de traitement des ouvrages miniers débouchant en surface. Il s'agit en effet de prévenir les risques liés aux effondrements et aux affaissements dangereux que pourraient induire de tels ouvrages, d'assurer une fermeture efficace et durable des accès aux anciens travaux et d'éviter qu'ils ne compromettent la sécurité et la salubrité publiques, ainsi que les caractéristiques essentielles du milieu environnant. Devant le nombre très important d'orifices de puits et de galeries à traiter, une méthodologie générale a été élaborée et permet de définir, pour un orifice situé dans un environnement donné, la méthode de traitement et de mise en sécurité la mieux adaptée et au moindre coût. L'application de cette méthodologie suppose une bonne connaissance de la géométrie de l'ouvrage et des caractéristiques géologiques et géotechniques des terrains encaissants.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Ministère de l'Industrie et la direction technique des Houillères de Bassin du Centre et du Midi pour le soutien technique et financier apporté à ces études.

6. BIBLIOGRAPHIE

Hartmann G., Hollmann F., Hulsmann K., Meissner H., Schönwarnfeld G., 1978. Sécurité concernant les puits remblayés. Fascicule 34. Caisse syndicale minière de Westphalie (WBK).

National Coal Board, 1982. The treatment of disused mine shafts and adits. NCB Library, 88 p.

Didier C., 1997. Principes de fermeture des anciens ouvrages miniers débouchant en surface. Cas du Fuvélien de Provence. Rapport INERIS-SSE-CDi/CS-97-25EP35/R04, mars 1997.

Reimbert M.L. et Reimbert A.M. Silos, theory and practice. Series on Bulk Materials Handling, Vol. 1 (1974/76), n° 3.

Didier C., 1998. Principes de fermeture des anciens ouvrages miniers débouchant en surface. Contribution de l'effet silo au dimensionnement des bouchons autoportants profonds. Rapport INERIS-SSE-CDi/BS-98-25EP35/R06, mars 1998.

Didier C. et Tritsch J.J., 1996. Traitement des carrières souterraines abandonnées par remblayage partiel. Application au cas du massif de l'Hautil. Rapport INERIS-SSE-JTr/CDi/CS-96-24EA05/R01, février 1996.