



Evaluation du risque d'apparition d'un fontis en surface : un modèle volumétrique probabiliste

Christophe Didier, Romuald Salmon

► To cite this version:

Christophe Didier, Romuald Salmon. Evaluation du risque d'apparition d'un fontis en surface : un modèle volumétrique probabiliste. Journées nationales de géotechnique et de géologie, Jun 2004, Lille, France. pp.451-461, 2004. <ineris-00972467>

HAL Id: ineris-00972467

<https://hal-ineris.ccsd.cnrs.fr/ineris-00972467>

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.

EVALUATION DU RISQUE D'APPARITION D'UN FONTIS EN SURFACE : UN MODELE VOLUMETRIQUE PROBABILISTE.

Christophe DIDIER, Romuald SALMON

INERIS - Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Parc Technologique ALATA, B.P. 2, 60550 Verneuil-en-Halatte, www.ineris.fr, Christophe.Didier@ineris.fr, Romuald.Salmon@ineris.fr.

RÉSUMÉ - Pour optimiser le diagnostic de survenue possible de fontis à l'aplomb d'une zone sous-minée, l'INERIS a développé une modélisation analytique du phénomène d'auto-comblement basée sur une approche volumétrique en trois dimensions du développement du cône d'éboulis. L'intégration d'une approche par simulation de scénarios (Monte Carlo) permet à cette modélisation d'évaluer rapidement la sensibilité des paramètres d'entrée sur la hauteur de remontée d'un fontis et de proposer une perspective d'évaluation probabiliste du risque.

1. Introduction

Les cavités souterraines d'origine anthropique (mines ou carrières) qui sous-minent des zones urbanisées ou même des espaces naturels de loisirs présentent une menace vis-à-vis des populations ou des constructions dès lors que leur stabilité ne peut pas être garantie à court terme. L'une des instabilités les plus caractéristiques de ce type d'exploitation à faible profondeur est le phénomène de fontis.

Afin d'assister l'expert dans l'établissement d'un diagnostic de stabilité, une modélisation analytique du développement du phénomène de fontis a été développée par l'INERIS. Elle s'appuie sur des critères essentiellement volumétriques de manière à déterminer la prédisposition du site à voir se développer des entonnoirs d'effondrement en surface du sol ou, au contraire, à voir le mécanisme de montée de voûte s'interrompre avant d'avoir atteint la surface, du fait du foisonnement des terrains éboulés.

Pour apporter de la souplesse à l'utilisation du modèle et permettre une gestion des incertitudes inhérentes à l'analyse de travaux souvent très anciens, une approche par simulation de scénarios (méthode Monte Carlo) a été développée. Elle permet d'estimer la sensibilité des valeurs des paramètres utilisés sur les résultats des calculs, rendant ainsi possible une approche probabiliste du risque de remontée de fontis.

Après une rapide description du phénomène de fontis, le présent article s'attache à décrire les principes de la modélisation mise en œuvre en présentant un cas de retour d'expérience sur lequel la démarche a été calée. L'approche probabiliste du problème est ensuite discutée.

2. Le phénomène de fontis

On appelle **fontis** un effondrement localisé de la surface du sol résultant de la remontée d'un éboulement prenant naissance au sein d'une excavation souterraine. Lorsque la voûte initiée par la rupture du toit de l'excavation ne se stabilise pas mécaniquement du fait de la présence de bancs massifs et résistants au sein du recouvrement, elle se propage progressivement vers la surface. Si l'espace disponible au sein des vieux travaux est suffisant pour que les matériaux éboulés et foisonnés puissent s'y accumuler sans bloquer le phénomène par « auto-comblement », la voûte peut atteindre la surface du sol.

Les dimensions des fontis varient fortement d'un site à l'autre, en fonction notamment de la dimension des galeries sous-jacentes, de la profondeur d'exploitation ainsi que de la nature des terrains de recouvrement et, en particulier, des terrains de sub-surface. En fonction de ce dernier paramètre, les parois du cratère peuvent, au moment de l'effondrement, être sub-verticales ou inclinées, donnant ainsi naissance à une forme caractéristique d'entonnoir.

Le diamètre « classique » des fontis varie généralement de quelques mètres à une quinzaine de mètres même si, dans des configurations exceptionnelles, il peut dépasser la cinquantaine de mètres. La profondeur du cratère dépend, quant à elle, principalement de la profondeur et des dimensions des travaux souterrains. Elle peut atteindre une dizaine de mètres même si, dans la majorité des cas, elle se limite à quelques mètres.

Si le développement d'une montée de voûte est un phénomène très lent qui peut prendre plusieurs années ou décennies, l'apparition du fontis en surface se fait, quant à elle, de manière soudaine, ce qui rend le phénomène potentiellement dangereux pour les personnes et les biens situés dans son emprise (Photo 1)



Photo 1 : exemple de fontis à Frémicourt (80)

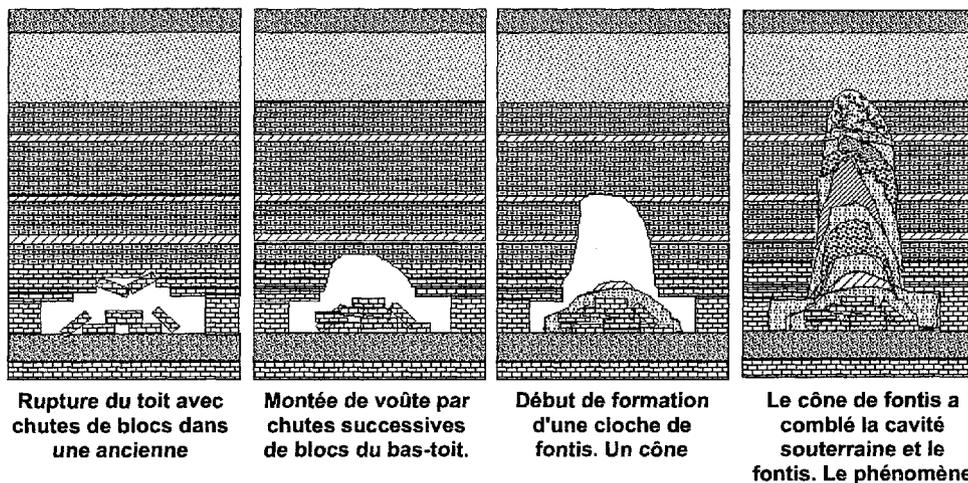


Figure 1 : Etapes du mécanisme de remontée de fontis dans le recouvrement (d'après Vachat, 1982).

3. L'approche volumétrique du mécanisme d'auto-comblement

3.1 Elaboration du modèle

Le calcul est établi avec les notations suivantes :

- a : largeur de galerie ;
- H_G : hauteur de galerie ;
- h_r : hauteur du remblayage partiel ;
- β : angle des piliers avec la verticale (cas de galeries trapézoïdales) ;
- r : rayon de chute de toit initiant la montée de voûte ;
- α et f : respectivement angle de dépôt et coefficient de foisonnement des éboulis.

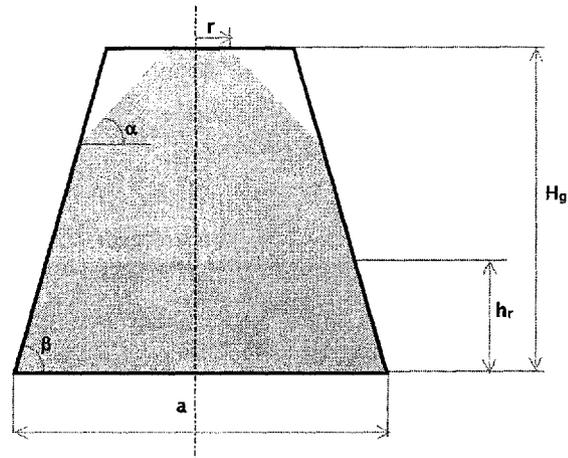


Figure 2 : Notations du modèle d'évaluation de la hauteur de remontée prévisible d'un fontis

On considèrera, pour ce qui suit, une exploitation souterraine menée par chambres et piliers abandonnés¹. A un carrefour de galerie, une chute de toit que l'on supposera circulaire se développe progressivement sous forme d'une montée de voûte. Nous prendrons l'hypothèse qu'aucun banc rocheux, présent au sein du recouvrement, n'est susceptible de bloquer le mécanisme dans sa propagation vers la surface. D'autres approches sont développées parallèlement pour intégrer ce mécanisme [Abbass, 2003].

Les éboulis se répandent dans la galerie, en formant un tas qu'on assimilera à un cône dont la taille augmente progressivement. En fonction de la géométrie de l'exploitation, ce cône peut, dans certains cas, intercepter les angles des piliers adjacents ; il convient d'intégrer ce paramètre dans le calcul. Pour qu'un phénomène d'auto-comblement soit possible, il faut déjà que les matériaux éboulés parviennent à combler à la fois le volume disponible en galerie (représenté sur la Figure 1) mais aussi le vide résultant de la montée de voûte.

Il vient alors l'équation qui traduit l'auto-comblement :

$$f \cdot V_{cloche} = V_{c\acute{o}ne-galerie} + V_{cloche}$$

Il est alors possible de calculer chacun des termes de l'équation, puis de la résoudre de manière à déterminer la valeur de la variable recherchée qui, comme nous le verrons ci-dessous, peut changer selon les objectifs. On supposera, dans les calculs développés plus loin, que la montée de voûte se propage sous forme d'une cheminée cylindrique de rayon constant², hypothèse tout à fait plausible dans le cas d'un recouvrement marneux.

3.2 Valeurs guides des paramètres du modèle

De nombreux paramètres nécessaires à l'application numérique de la modélisation sont relatifs au schéma d'exploitation (largeur ou hauteur de galeries, hauteur de remblayage...). Les éventuels problèmes que peut engendrer le renseignement de ces paramètres relèvent essentiellement de la variabilité des dimensions d'ouvrages.

Angle de dépôt du talus

Il s'agit de l'angle d'équilibre limite, dit également angle de pente naturelle. Il dépend évidemment de la nature du matériau foisonné et peut devenir très difficile à évaluer dès lors que les éboulis concernent différents types de matériaux. Le retour d'expérience acquis sur de

¹ L'outil de diagnostic développé permet également de traiter le cas des galeries isolées, quelle que soit leur forme (circulaire, rectangulaire, avec piedroits...), mais le calcul ne sera pas développé ici.

² Là encore, d'autres simulations plus complexes, introduisant notamment des terrains bouillants comme les sables, ont été développés mais nous nous contenterons de transcrire ici un cas relativement simple.

nombreuses exploitations montre toutefois une relative homogénéité de l'angle de talus naturel variant de 30° à 40° pour d'assez nombreux matériaux, en conditions sèches.

Les valeurs peuvent, en revanche, s'avérer très variables dès lors que les éboulis sont mis en contact avec de l'eau. Pour des matériaux sensibles (marnes, argiles, sable), l'angle de talus peut alors diminuer fortement pour atteindre des valeurs de l'ordre de 15° à 20° (Photo 2).

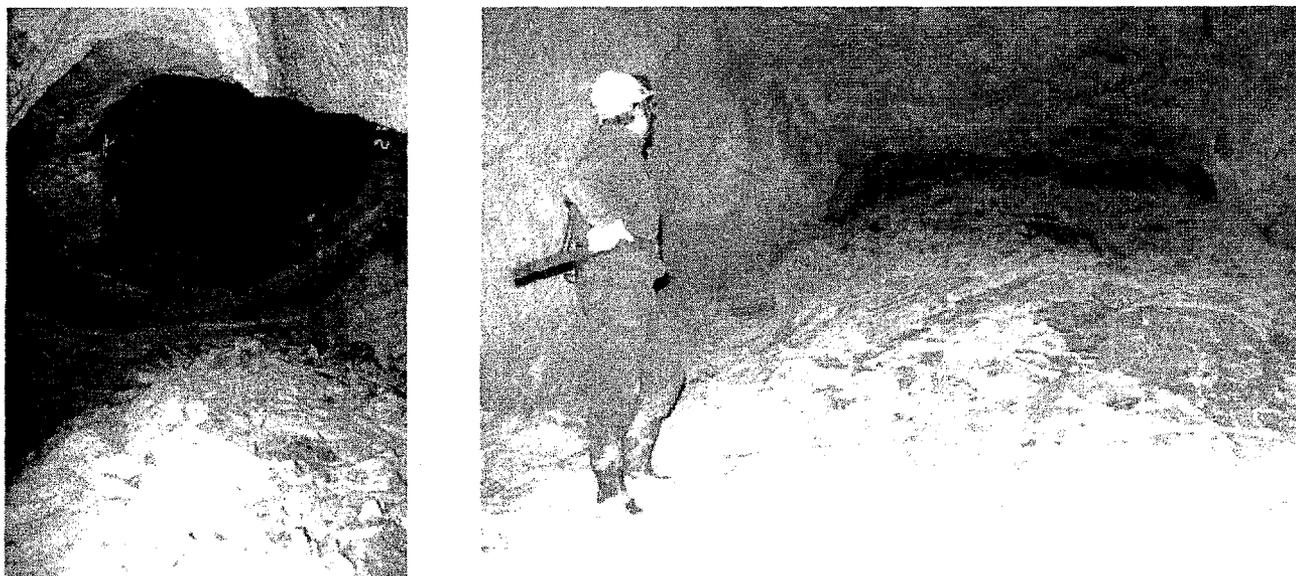


Photo 2 : Cône d'éboulis : à gauche, marnes sèche, à droite le même matériau sous l'effet de l'eau.

Coefficient de foisonnement

Le coefficient de foisonnement correspond au rapport entre le volume occupé par les éboulis de tailles et de formes variées qui s'entassent de façon désordonnée et le volume initialement occupé par les terrains en place. L'estimation de la valeur de ce paramètre n'est pas toujours aisée même si plusieurs approches permettent de l'estimer (retour d'expérience du terrassement routier, essai œdométrique) [Salmon, 1998].

Notre retour d'expérience montre que ce coefficient varie de valeurs à peine supérieures à 1 dans le cas de sables ou de sols très peu cohérents et peut atteindre des valeurs proches de 1,5 lorsque les roches éboulées sont plutôt résistantes et donnent naissance à des blocs d'assez grandes dimensions.

Pour le coefficient de foisonnement aussi, la présence de l'eau peut jouer un rôle important. Ainsi, pour les matériaux sensibles à l'eau (marnes, argiles), le coefficient de foisonnement entre l'état sec et humide peut chuter de 1,4 jusqu'à 1,1 (photo 2).

Rayon de remontée de cheminée

Le rayon de remontée de cheminée est un paramètre essentiel et très important pour le calcul car il influe directement et de manière très importante sur le volume de matériaux éboulés. Il est très difficile de l'estimer par calcul sauf à connaître très précisément les caractéristiques des premiers bancs constituant le toit de l'exploitation.

Il faut donc privilégier le retour d'expérience au travers d'observations menées sur site lorsque les anciens travaux sont encore accessibles. A défaut, on analysera la sensibilité du paramètre par une étude paramétrique.

3.3 Estimation de la hauteur prévisible de remontée de voûte

L'utilisation la plus classique et la plus fréquente du modèle proposé consiste à évaluer la hauteur prévisionnelle de remontée de cheminée capable de garantir un auto-comblement de celle-ci. Les différents termes de l'équation (1) sont ainsi paramétrés à l'aide de la variable z caractérisant la hauteur de cheminée.

Pour des caractéristiques de galeries et un rayon de remontée de cheminée donnés, il est alors possible de résoudre l'équation (1) en z , de manière à déterminer la hauteur de remontée de cheminée pour laquelle il est possible d'aboutir à un auto-comblement du processus. Dans le cas d'un fontis qui s'initie au toit d'un carrefour de chambres et piliers, il vient (équation 1) :

$$z = \frac{1}{3r^2(f-1)} \left\{ 3r^2(H_G - h_r) + (H_G - h_r)^2 \cot\alpha [3r + (H_G - h_r) \cot\alpha] \right. \\ \left. - \operatorname{tg}\alpha \left[r + (H_G - h_r) \cot\alpha - \frac{a\sqrt{2}}{2} + h_r \sqrt{2} \cot\beta \right]^3 \right\}$$

Une fois le calcul réalisé, il est possible de comparer la valeur théorique de remontée de voûte avec l'épaisseur des terrains de recouvrement. Plusieurs scénarios sont alors envisageables :

- la hauteur calculée est supérieure à l'épaisseur de recouvrement : le mécanisme d'auto-comblement n'est pas possible et la montée de voûte débouchera en surface, donnant naissance à un fontis ;
- la hauteur calculée est nettement inférieure à l'épaisseur de recouvrement : le mécanisme de montée de voûte s'arrêtera par auto-comblement sans affecter la stabilité des terrains de surface ;
- la hauteur calculée est inférieure de quelques mètres à l'épaisseur de recouvrement : des phénomènes d'affaissements localisés sont possibles à terme en surface, notamment en présence de terrains superficiels peu cohérents.

Le modèle est alors utilisé comme un outil de diagnostic permettant d'identifier les secteurs d'une exploitation les plus exposés au risque d'apparition de fontis en surface. En fonction des caractéristiques de l'exploitation et des terrains de recouvrement, il est en effet possible de définir une épaisseur de recouvrement critique en deçà de laquelle le risque d'apparition de fontis en surface doit être jugé préoccupant. Cette approche est notamment régulièrement utilisée lors de l'élaboration de Plans de Prévention des Risques, qu'ils soient Naturels (PPRN « carrières souterraines ») ou Miniers (PPRM).

Outre l'épaisseur minimale de recouvrement requise pour éviter le risque de fontis, la modélisation permet également d'estimer les dimensions prévisionnelles de l'éventuel fontis en surface, sous réserve d'introduire, dans le calcul, l'angle de talus de l'entonnoir.

3.4 Optimisation de la hauteur de remblayage

Une autre utilisation possible du modèle peut consister à calculer la hauteur de remblayage partiel nécessaire pour garantir un auto-comblement des fontis prenant naissance au sein d'une ancienne exploitation. Dans ce cas, on résout l'équation (1) en fixant une valeur admissible à la remontée de cheminée pour garantir un auto-comblement (sensiblement inférieure à l'épaisseur de recouvrement) et on paramètre le volume disponible en galerie à l'aide de la variable h_r correspondant à la hauteur de remblayage des galeries.

La résolution analytique n'étant pas triviale, on procède généralement par simulations numériques successives pour trouver la hauteur optimale de remblayage. Cette valeur correspond à la hauteur minimale (pour limiter les coûts de mise en œuvre) permettant de garantir le niveau de sécurité attendu (fonction de l'usage prévu du site en surface). La hauteur préconisée de remblayage peut ainsi s'avérer variable en fonction des différents secteurs d'exploitation.

Le modèle est alors utilisé pour assister au dimensionnement des travaux de mise en sécurité des terrains de surface qui échoit au gestionnaire du site (exploitant notamment).

4. Exemple d'application : le cas de la galerie Saint-Joseph

Ouvrage constitué en 1859, la galerie Saint-Joseph est de forme voûtée d'une largeur voisine de 2 m à la base et d'une hauteur d'environ 3 m au centre de la galerie. Parfois revêtue de

maçonnerie, parfois creusée directement au rocher, la galerie est globalement en bon état de conservation sur l'ensemble du tronçon reconnu (600 premiers mètres). Un éboulement qui obture intégralement la galerie interdit ensuite toute progression.

L'ouvrage rencontre probablement dès les premiers mètres les terrains houillers (essentiellement constitués de schistes noirs) mais aucune information précise sur l'épaisseur et la nature de ces terrains n'est disponible.

Les affleurements de surface mettent en évidence la présence de terrains peu cohérents, probablement des colluvions sablo-argileuses. L'épaisseur de cette formation superficielle semble supérieure à 5 mètres. Les cent premiers mètres de la galerie sous-cavent une surface aménagée en jardins particuliers puis un lotissement appelé « Les Bâtisses ».

Les terrains sous lesquels s'enfonce la galerie Saint-Joseph sont faiblement pentés. L'approfondissement de l'ouvrage sous le massif est donc très lent. Ainsi, les 50 premiers mètres de galerie sont situés sous moins de 10 mètres de recouvrement (Figure 3).

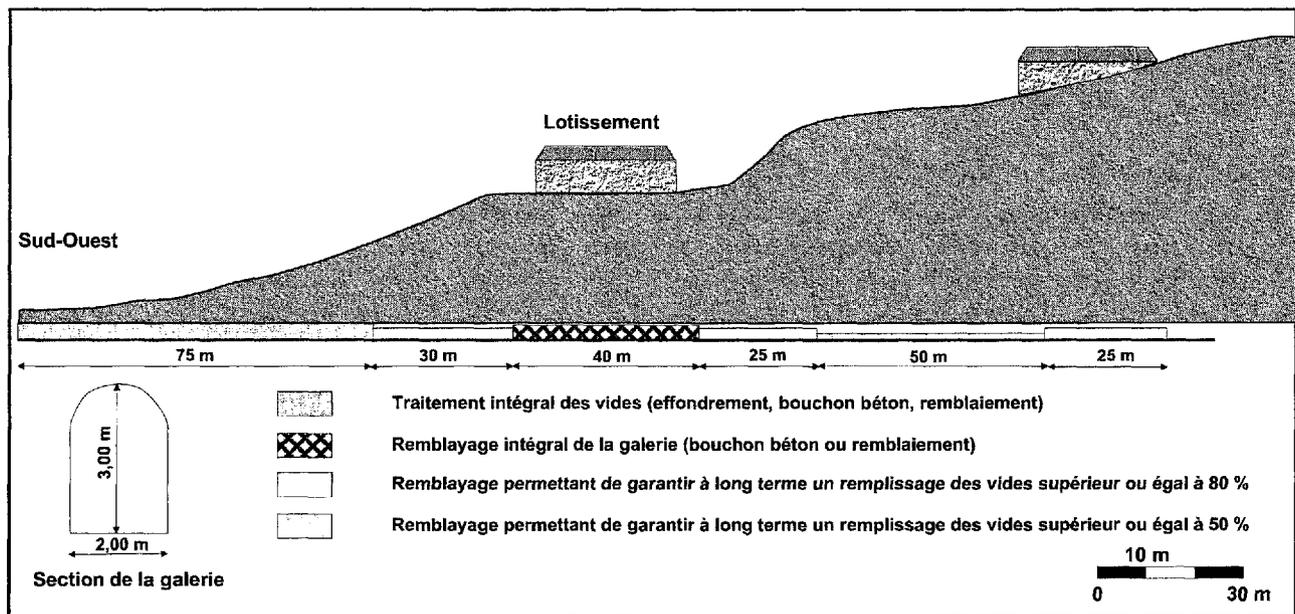


Figure 3 : Principe de traitement de la galerie Saint-Joseph

4.1 Estimation de la hauteur prévisible de remontée de voûte

Le Tableau 1 liste les paramètres et leurs valeurs retenus pour le calcul de la hauteur de remontée de fontis au droit de la galerie Saint-Joseph.

Trois modèles ont été comparés :

- Le modèle de Piggott et Eynon [Piggott, 1978] : il s'agit d'un rapport de proportionnalité entre la hauteur de remontée de la cheminée et la hauteur de vide ;
- Le modèle de Whittaker et Reddish [Whittaker, 1989] : la cheminée de fontis est de forme cylindrique. Le matériau foisonné se répand dans la galerie et est contenu dans un prisme.
- Le modèle de l'INERIS : la cheminée de fontis est de forme cylindrique. Le matériau foisonné se répand dans la galerie et est contenu dans un cône d'éboulis frêtté par les parements de galeries.

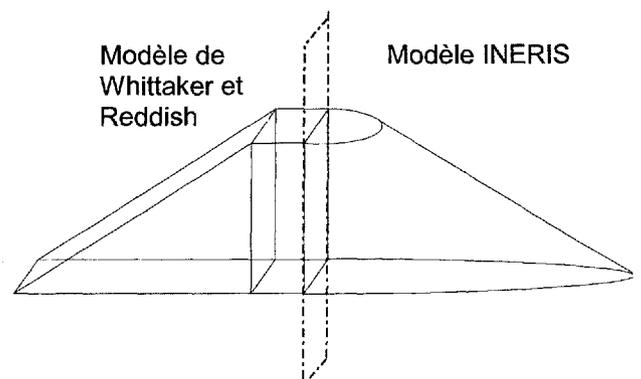


Figure 4 : Volume modélisé pour le matériau foisonné dans les modèles de Whittaker et Reddish et de l'INERIS.

Le Tableau II compare l'évaluation de la hauteur de remontée de la cheminée pour la galerie Saint-Joseph selon les trois modèles présentés. Ce dernier montre la relative homogénéité des résultats entre les différentes méthodes : pour une galerie de 3 m de hauteur, la remontée de cheminée au travers des terrains de recouvrement est évaluée entre 30 et 40 m.

Tableau I: Valeurs des paramètres retenus pour évaluer la hauteur de remontée de la cheminée de fontis au droit de la galerie Saint-Joseph

Paramètre	Notation	Valeur
Largeur de galerie	a	2 m
Hauteur de galerie	H_G	3 m
Hauteur de remblayage partiel	h_r	0 m
Rayon de chute de toit initiant la montée de voûte	r	1 m
Angle de dépôt des éboulis	α	35°
Coefficient de foisonnement des éboulis	f	1,3

Tableau II : Comparaison des évaluations de hauteur de remontée de la cheminée de fontis pour 3 modèles de calcul différent

Modèles	2D / 3D	Formule	Résultat
Piggott et Eynon	2D	$z = \frac{3(H_G - h_r)}{(f-1)}$	30 m
Whittaker et Reddish	3D	$z = \frac{1}{\pi r^2 (f-1)} \{ a(H_G - h_r)^2 \cot \alpha + (H_G - h_r) a^2 \}$	40 m
INERIS	3D	Equation 1 adaptée au cas d'une galerie	34 m

On notera que le modèle de Piggott et Eynon ne prend pas en compte le rayon de la cheminée au toit de la galerie. Nous verrons par la suite que ce paramètre joue de manière très sensible sur le résultat des modèles.

4.2 Evaluation de l'apport du remblayage partiel

La mise en sécurité des terrains de surface à l'aplomb de la galerie Saint-Joseph peut être adaptée à leur vulnérabilité :

- le traitement des tronçons de galerie situés au droit des zones urbanisées comportant des infrastructures sensibles (constructions, routes...) doit garantir la non dégradation des biens existants. Il est donc préconisé que des traitements lourds (remblayage total de la galerie) soient réalisés pour ces tronçons ;
- le traitement des tronçons de galeries situés sous des secteurs non urbanisés requiert une exigence moindre : pour ces secteurs, l'objectif est d'exclure le risque de remontée de fontis en surface. On peut cependant tolérer des mouvements de surface de nature similaire à des tassements.

Le modèle développé par l'INERIS permet d'évaluer l'efficacité du remblayage partiel de la galerie. Pour le cas de la galerie Saint-Joseph, la figure 5 montre la diminution de la hauteur de remontée de la cheminée de fontis pour chaque mètre de galerie remblayée. Il apparaît que le premier mètre remblayé permet de diminuer la hauteur de remontée de fontis de 34 m à 15 m. Le dernier mètre remblayé supérieur permet de diminuer de quelques mètres seulement la hauteur de remontée de fontis.

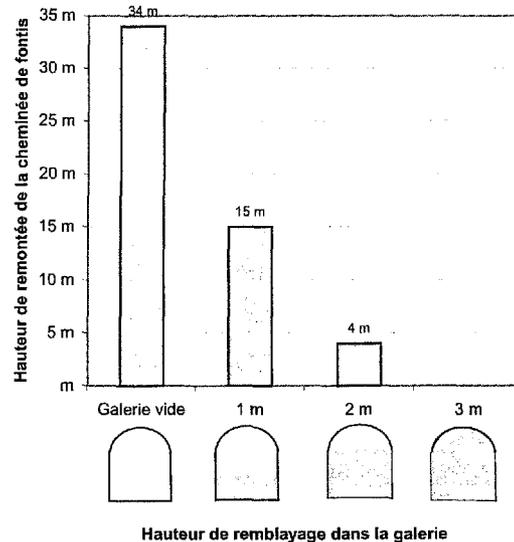


Figure 5 : Effet du remblayage partiel de la galerie Saint-Joseph sur la hauteur de remontée de la cheminée de fontis.

Pour les tronçons de galerie situés sous des terrain de surface à faible vulnérabilité, le traitement préconisé consiste donc en un remblayage partiel de la galerie permettant de limiter la hauteur de remontée de cheminée prévisible (figure 5) à une valeur inférieure à celle de la profondeur de la galerie.

L'utilisation du modèle analytique développé par l'INERIS a permis de préconiser un traitement de la galerie Saint-Joseph adapté à la nature des enjeux de surface (Figure 3, DIDIER et al., 1998) :

- compte tenu de la faible épaisseur des terrains de recouvrement, il est préconisé de procéder au remblayage total sur les premiers mètres de la galerie à partir de son entrée ;
- sous infrastructure sensible (habitations, voies de circulation...), il est préconisé de procéder à un remblayage total de la galerie ;
- sous secteur en surface à faible vulnérabilité, un remblayage partiel, dépendant de la profondeur de la galerie, est préconisé.

5. Etude de sensibilité du modèle analytique

Nous avons vu précédemment que la connaissance d'un certain nombre de paramètres sont nécessaires à la modélisation. Qu'il s'agisse de paramètres géométriques (hauteur, largeur de galerie) ou géomécaniques (angle de dépôt du talus, coefficient de foisonnement, rayon de remontée de cheminé), ils sont tous entachés d'incertitude.

Or, l'erreur ou l'incertitude associée à certains paramètres influence beaucoup plus le résultat que celles associées à d'autres paramètres.

Nous avons donc mené une étude de sensibilité des valeurs des paramètres sur le résultat du modèle analytique. Celle-ci s'appuie sur les simulations de Monte-Carlo. Les simulations de Monte-Carlo consistent à simuler un grand nombre de scénarios. Chaque scénario correspond à un jeu de données d'entrée tirées au hasard dans des intervalles. Le tirage au sort des données d'entrée peut être équiprobable s'il existe autant de chance qu'un paramètre prenne n'importe quelle valeur de son intervalle, ou suivre toute loi de distribution renseignée (loi de Gauss, loi log-normale...). Dans le cas étudié, une loi équiprobable a été retenue.

La figure 6 représente la répartition de 3000 scénarios pour 2 jeux de données :

- premier jeu de données : tous les paramètres du Tableau I sont conservés constants sauf le coefficient de foisonnement qui peut varier équiprobablement entre 1,2 et 1,4 m ;
- deuxième jeu de données : tous les paramètres du Tableau I sont conservés constants sauf la hauteur de la galerie qui peut varier équiprobablement entre 2,5 et 3,5 m.

Ces deux situations consistent à simuler une incertitude défavorable pour la hauteur de remontée de cheminée de l'ordre d'environ 20 %.

La figure 6 montre que, par rapport à la situation déterministe (Tableau I, hauteur de remontée de cheminée de 34 m), une variation de chacun des 2 paramètres influence sensiblement la hauteur de remontée de cheminée :

- dans le cas d'une variation du coefficient de foisonnement, certains scénarios montrent que la hauteur de remontée de fontis peut atteindre 51 m ;
- la hauteur maximale de remontée de la cheminée n'est que de 45 m dans le cas d'une variation de la hauteur de la galerie.

Il s'en suit qu'une incertitude sur le coefficient de foisonnement a une influence beaucoup plus grande qu'une incertitude du même ordre sur la hauteur de la galerie. On montre, de la même manière, que le rayon, au toit de la galerie, de la cheminée de fontis a une forte influence sur le résultat.

L'analyse de sensibilité montre, entre autre, que les efforts de précision en terme de renseignement des variables doivent être portés, en premier lieu, sur ces 2 paramètres (coefficient de foisonnement, rayon de la cheminée au toit de la galerie).

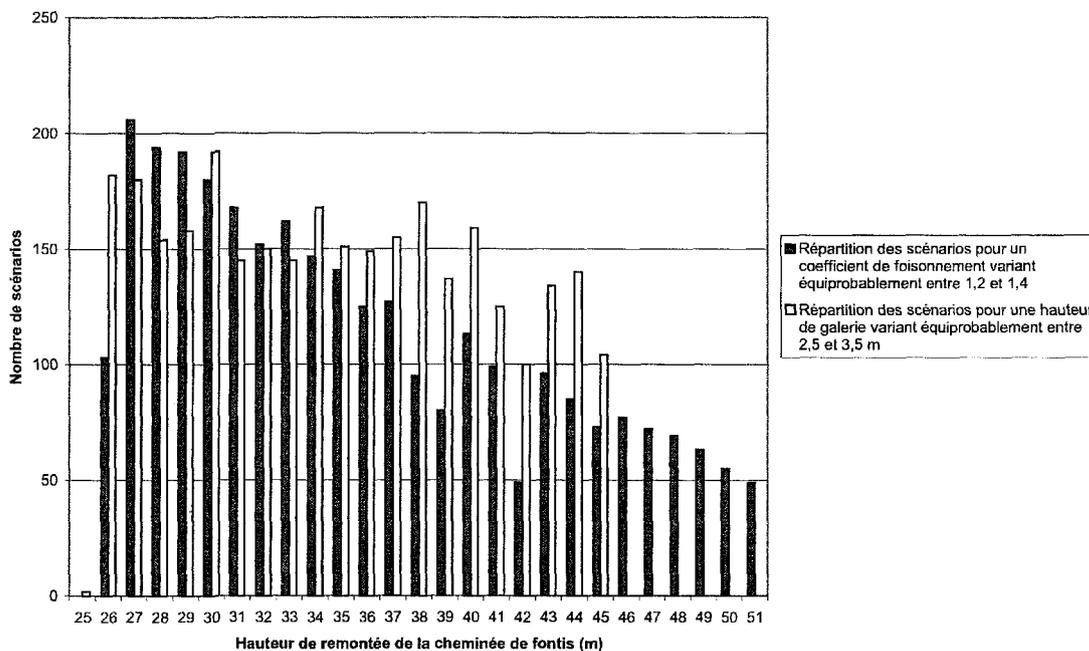


Figure 6 : Répartition de 3000 scénarios lorsque que a) le coefficient de foisonnement varie entre 1,2 et 1,4 et b) la hauteur de la galerie varie entre 2,5 m et 3,5 m.

6. Vers une probabilité de l'aléa fontis ?

L'application déterministe du modèle analytique développé par l'INERIS a montré qu'en appliquant les valeurs de paramètres présentées dans le Tableau I, la hauteur de remontée de la cheminée de fontis est évaluée à 34 m.

Si l'on suppose qu'une incertitude demeure sur la valeur du coefficient de foisonnement, on peut s'attendre à un effet de cette incertitude sur la précision du résultat. La figure 6 montre la répartition de 3000 scénarios de calculs où la valeur du coefficient de foisonnement varie équiprobablement entre 1,2 et 1,5. L'introduction de cette incertitude révèle que :

- la hauteur de remontée de la cheminée de fontis peut atteindre 51 m (soit 17 m de plus que la valeur déterministe) ;
- l'intervalle de valeur que peut prendre la hauteur de remontée de la cheminée n'est pas centré sur la valeur déterministe de 34 m ([26 m ; 51 m]).

La figure 7 montre que :

- pour une galerie telle que la galerie Saint-Joseph, située à moins de 26 m de profondeur, n'importe quel scénario où le coefficient de foisonnement varie entre 1,2 et 1,4 mène à une situation où le fontis atteint la surface ;
- inversement, pour une galerie située à plus de 52 m de profondeur, aucun des 3000 scénarios ne mène à une situation où le fontis atteint la surface ;
- entre ces deux profondeurs, le pourcentage de scénarios où le fontis atteint la surface décroît de 100 % à 0 % de manière non linéaire : ce pourcentage décroît plus vite pour des profondeurs comprises entre 26 et 34 m qu'au-delà.

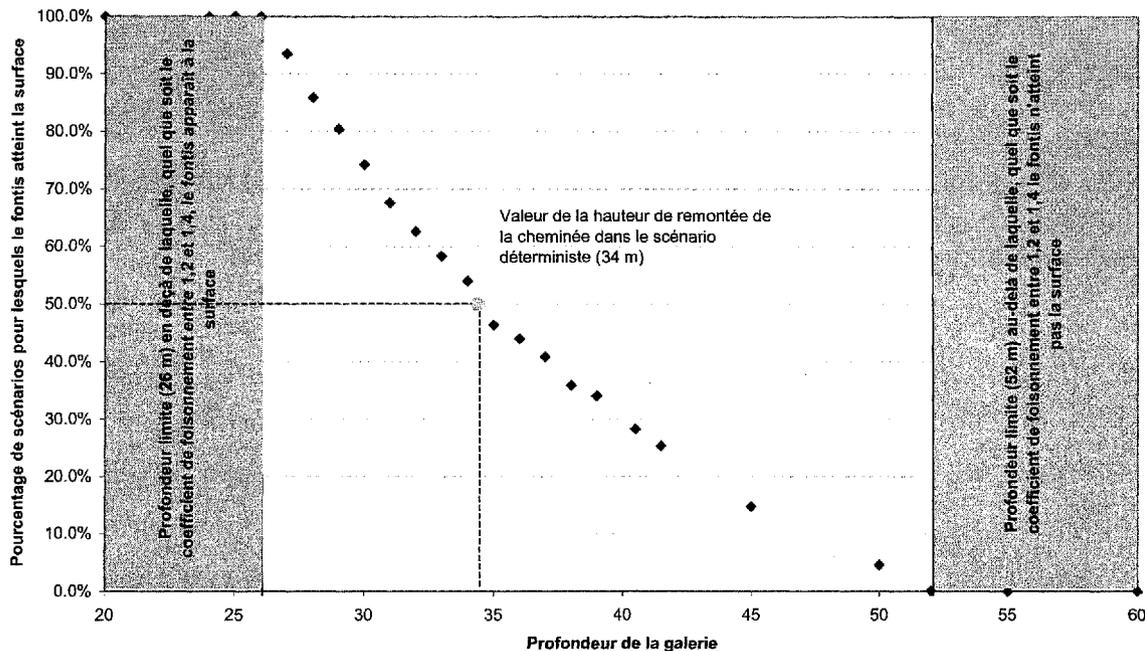


Figure 7 : Pourcentage de scénarios où le fontis atteint la surface en fonction de la profondeur de la galerie.

Tableau III : Pourcentage de scénarios où le fontis remonte en surface en fonction de la profondeur de la galerie.

Profondeur de la galerie	Pourcentage de scénarios où le fontis remonte en surface
52 m	0 %
45 m	15 %
40 m	30 %
34 m	50 %
30 m	75 %
26 m	100 %

Le Tableau III montre le pourcentage de scénarios menant à l'apparition d'un fontis en surface en fonction de la profondeur. Si à 52 m de profondeur, aucun scénario ne mène à la survenue en surface d'un fontis, pour une profondeur de 45 m, 15 % des scénarios mènent à l'apparition d'un fontis en surface.

L'évaluation de ces pourcentages peut permettre, dans le cas de la galerie Saint-Joseph où la profondeur de recouvrement varie compte tenu de la topographie de surface (Figure 3), d'aider l'expert pour évaluer la « sensibilité » ou la « probabilité d'occurrence » tels que définies dans les Plans de Prévention des Risques par exemple.

7. Conclusion

L'INERIS a développé une modélisation analytique du phénomène d'auto-comblement afin d'aider l'ingénieur dans l'évaluation de la probabilité d'occurrence d'un fontis en surface.

L'intégration d'une approche par simulations de Monte-Carlo permet de mesurer la sensibilité des paramètres d'entrée sur le résultat, d'apprécier la précision du résultat en fonction de l'incertitude sur un ou plusieurs paramètres et propose une première perspective d'évaluation quantitative de la probabilité d'occurrence d'un fontis. De nombreux points doivent encore être développés avant d'avancer une telle évaluation. On soulignera en particulier :

- la nécessité de mieux représenter l'incertitude sur les paramètres d'entrée ;
- la systématisation des scénarios pour l'ensemble des paramètres entachés d'incertitude ;
- le calage des résultats en terme de pourcentage ou de probabilité avec des cas réels.

La prévention du risque de remontée de fontis est une priorité pour les collectivités locales et les pouvoirs publics. L'outil développé est mis en œuvre régulièrement dans le cadre de la réalisation de Plans de Prévention des Riques en particulier. Pour aller plus loin, il convient de constituer un retour d'expérience des événements de fontis afin de mieux apprécier les valeurs et les incertitudes associées à chaque paramètre.

8. Références Bibliographiques

- ABBASS FAYAD (A.), AL HEIB (M.) et DIDIER (C.) : Modélisation de la propagation, en mode lent et en mode dynamique, d'un fontis à l'aide du code de calcul UDEC (*Méthodologie et Application*) (Narms-Tac 2002, Toronto-Canada : de 7 à 10 juillet 2002).
- ABBASS FAYAD (A.), AL HEIB (M.), DIDIER (C.), VERDEL (T.) : Numerical simulation of sinkhole formation using the UDEC computer code: influence of horizontal stress GTMM. *GeoTechnical Measurements and Modelling, September 23-25,2003, Karlsruhe, Germany, pp.255-260.*
- DIDIER (C.), WOJTKOWIAK (F.), SALMON (R.), BARRIERE (J-P.), GAGET (P.) : Treatment of old disused mine openings. (*2nd International Symposium on Mine Environmental Engineering,, Brunel University, Uxbridge, 29-31 juillet 1998*).
- PIGGOTT (R. I.), EYNON (P.) : Ground Movements Arising from the Presence of Shallow Abandoned Mine Workings. Proceedings, Conference on Large Ground Movements and Structures, UWIST, Cardiff, Geddes, J. D., ed., Pentech Press, 749-780, (1978).
- SALMON (R.) : Validation d'une nouvelle méthode de mise en sécurité des anciennes carrières souterraines abandonnées : le remblayage partiel. *Rapport de D.E.A. auprès de l'Ecole Centrale de Paris, 25 juin 1998.*
- VACHAT (J.C.) : Les désordres survenant dans les carrières de la région parisienne – Etude théorique et pratique de l'évolution des fontis, thèse C.N.A.M., 1982.
- WHITTAKER (B.N.), REDDISH (D.J.) : Subsidence : Occurrence, Prediction and Control, *Elsevier, 528p, 1989.*