

Méthode d'évaluation des hauteurs de montée d'un fontis en sol meuble

Abel DELFAUT
Laboratoire régional des ponts et chaussées
de l'Ouest parisien
abel.delfaut@equipement.gouv.fr

■ RÉSUMÉ

Dans le cadre de l'analyse du risque de remontée de fontis dans un terrain de couverture constitué de sols meubles, une méthode déterministe pour le calcul des hauteurs potentielles de montée est proposée. Elle repose sur une schématisation géométrique du phénomène en éléments simples (cône et cylindre), de manière à établir un bilan représentatif et calculable des volumes en présence. L'étude théorique montre que les facteurs influents pour une configuration initiale donnée sont, dans l'hypothèse formulée, la pente des génératrices du cône et le coefficient de foisonnement des sols lors de leur chute. Ceci se traduit par des hauteurs plus élevées pour des diamètres de fontis plus faibles. L'existence d'obstacles à l'intérieur de la carrière (piliers, parois, etc.), qui gênent le développement du cône d'éboulis, contribue à limiter la hauteur d'ascension d'un fontis. Leur influence est d'autant plus grande qu'ils réduisent de façon déterminante le volume du cône développé. L'application de la méthode sur un exemple a permis de préciser les ordres de grandeur des facteurs intervenants. Les résultats obtenus doivent être tempérés par des considérations mécaniques et de structure de terrain.

Method for evaluating the uplift heights of subsidence in loose soil

■ ABSTRACT

Within the scope of the risk analysis of rising subsidence in a loosely-compacted topsoil, a deterministic method will be proposed for calculating potential uplift heights. This method relies upon a geometric diagram of the phenomenon built using simple elements (cone and cylinder), so as to establish a representative and calculable assessment of the volumes present. The theoretical study has shown that the influential factors for a given initial configuration are, under the terms of the hypothesis forwarded herein, the slope of the cone apex height and the coefficient of swelling for soils during landslides. This approach yields greater heights at lower subsidence diameters. The presence of obstacles inside the quarry (columns, sidewalls, etc.), which act to disturb formation of the rock debris cone, also contribute to limiting uplift height of subsidence. Their influence is even more significant given the substantial reduction in actual cone volume yielded. Application of this method to an example has served to specify the orders of magnitude for the set of influential factors. The results obtained must however be placed into an overall context that includes both mechanical and structural considerations of the site.

INTRODUCTION

Le territoire français contient dans son sous-sol de nombreuses carrières souterraines abandonnées laissant des vides considérables sur de vastes étendues ; c'est le cas de la région parisienne pour laquelle a été institué un service spécial de gestion du risque (Inspection générale des carrières). La présence de ces vides, de nature anthropique ou naturelle (roche soluble), à plus ou moins grande profondeur a fait l'objet de nombreuses publications du fait du danger qu'ils représentent pour la population [1-8].

La détermination de la hauteur de remontée d'un fontis après la rupture d'un toit de carrière est un problème ancien mais toujours d'actualité. On se propose de contribuer à qualifier cet aléa dans les zones où les vides du sous-sol sont une menace pour les populations environnantes.

L'aléa étudié, d'origine anthropique, entre dans la définition du dictionnaire : « Événement dépendant d'un hasard défavorable ». Depuis l'instauration des plans de prévisions aux risques majeurs (PPR), le Laboratoire régional de l'Ouest parisien est confronté, comme beaucoup d'autres organismes, à la prévention de tels risques et par conséquent est conduit à utiliser des outils d'évaluation, dont la méthode développée ici. Cette méthode, fondée sur la seule géométrie, constitue une démarche déterministe susceptible de répondre à la question d'un danger potentiel représenté par l'apparition d'un fontis en surface. L'aspect mécanique du phénomène n'est donc pas envisagé directement, mais pourrait l'être si l'on désire approfondir le sujet, notamment pour répondre à la question de la vitesse de progression d'un fontis et à celle d'une discrimination d'événements qui ne sembleraient pas réalistes.

La gravité de la montée d'une cloche de fontis est surtout liée à son apparition au jour et à sa capacité à provoquer une forte dépression en surface (superficie, profondeur, escarpement des bords). Ce sont les points essentiels qui seront retenus.

DÉMARCHE ET FORMULATION DES VOLUMES

■ Remarques préliminaires

Les résultats obtenus sur une base purement géométrique considèrent des contacts sans frottement entre les différents éléments constitutifs du système, donc parfaitement coulissants entre eux. Dans cette logique, seul le jeu des accroissements de volume de sols éboulés permet au phénomène d'atteindre une limite. Cette approche simplificatrice conduit, certes, à des conclusions pessimistes mais conformes à la définition même de l'aléa. Si la notion de fonctionnement mécanique n'entre pas explicitement en jeu dans la démarche géométrique proposée, il conviendra de faire appel à elle lors de l'interprétation des résultats, notamment pour les fontis de très petits diamètres.

La démarche globale consiste à faire correspondre en grandeur des volumes. En fait, l'analyse est plus compliquée qu'il n'y paraît dans la mesure où il sera nécessaire d'émettre des hypothèses de calculs et de les vérifier (pentes, coefficients de foisonnement, dimensions...) : les paramètres qui définissent géométriquement les corps non soutenus latéralement sont très liés à l'équilibre de ces corps et, par conséquent, aux caractéristiques mécaniques des matériaux qui les composent. C'est à ce niveau de l'étude que se profile éventuellement une recherche de stabilité mécanique pour la détermination des pentes du cône d'éboulis ; ajoutons, toutefois, qu'une telle forme constatée en carrière constitue naturellement une des structures les plus stables.

Le choix des données du problème peut s'avérer malaisé du fait des difficultés rencontrées par le géotechnicien qui se trouve fréquemment en face de sites non accessibles, partiellement ou en totalité, et de plans anciens souvent mal renseignés, notamment aux limites d'exploitation.

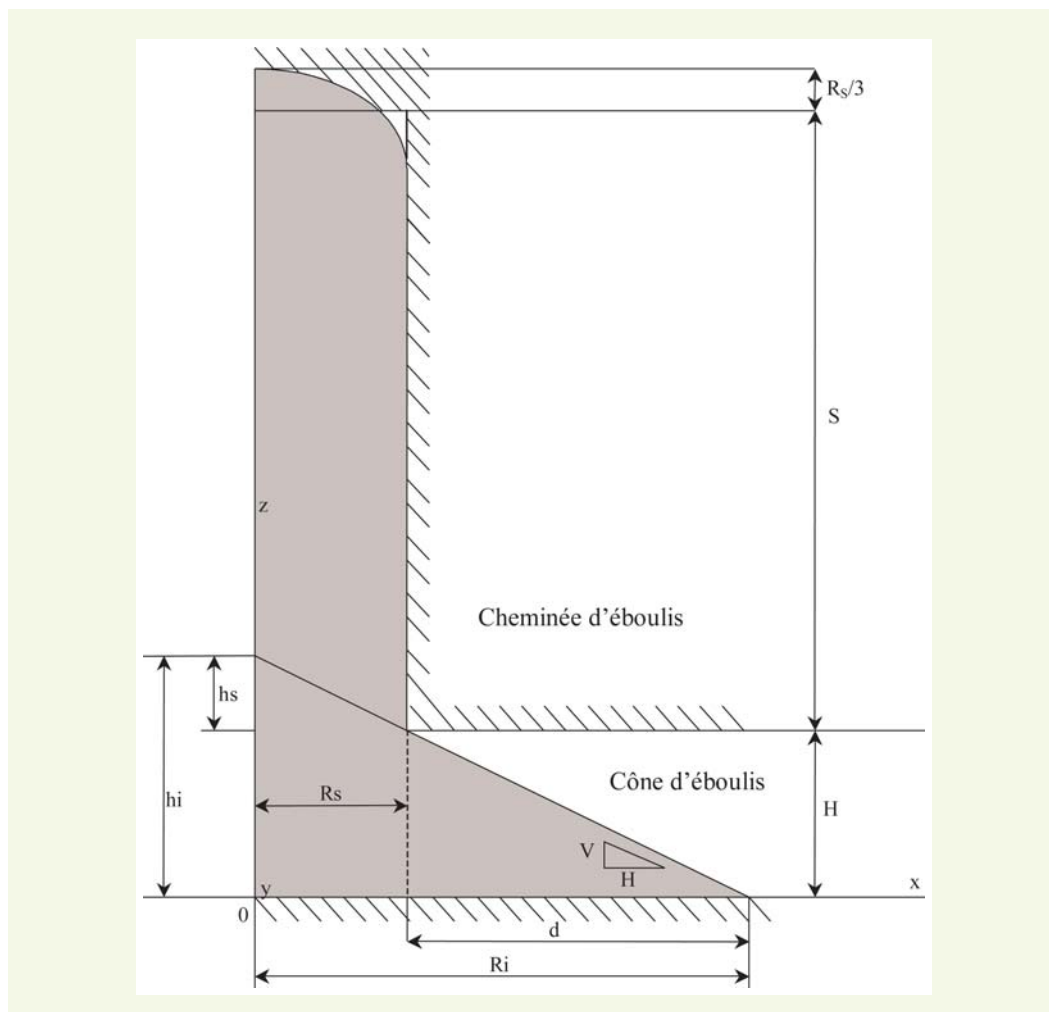
■ Définition des formes

Les formes irrégulières d'un fontis naturel sont approchées par un modèle géométrique simple mais représentatif de la réalité. Dans la majorité des cas, ce modèle géométrique est composé de deux solides de révolution superposés (**figure 1**) :

- le cône d'éboulis, c'est-à-dire la partie inférieure de sols éboulés située dans l'emprise de la carrière, dont la forme d'équilibre se rapproche très nettement d'une figure conique ou tronconique ;
- la cheminée, de forme cylindrique, en contact et en mouvement relatif vis-à-vis du terrain de recouvrement laissé en place, dont le sommet est constitué d'une forme arrondie (« cloche de fontis »).

figure 1

Modèle géométrique du fontis : représentation du cône et de la cheminée pleine d'éboulis à la suite de la formation d'un fontis au toit d'une galerie.



À la base, selon la configuration des lieux de la carrière, le cône d'éboulis peut rencontrer des obstacles en se formant, notamment en galerie. Le cône d'éboulis est alors tronqué latéralement par confinement, réduisant de façon sensible son volume par rapport à sa forme développée.

La cheminée cylindrique verticale, quant à elle, sera considérée comme pouvant se former librement par développement à l'intérieur des sols de recouvrement de la carrière, les éboulements successifs se faisant sans contraintes extérieures. Cette approche conduit à une évaluation d'une montée maximale de la cheminée.

L'hypothèse d'une trajectoire verticale de la cheminée détermine, là encore, une situation défavorable, car toute déviation (cas rare) par rapport à la verticale accroît les volumes du cône d'éboulis et réduit par conséquent la hauteur de montée du fontis. De même, une réduction du diamètre de la cheminée sur sa trajectoire augmente la hauteur de montée et, inversement, un accroissement du diamètre la diminue.

Les deux parties, cône et cheminée, constituées d'éboulis, devront posséder une partie commune assimilable à une section circulaire pour que le phénomène puisse éventuellement se stabiliser avec le temps. Ce niveau de contact bouchant l'orifice d'effondrement est nécessaire au stockage d'éboulis dans la cheminée, indispensable à un arrêt du processus à l'intérieur du terrain de recouvrement.

Si l'on admet le principe de la simplification géométrique exposé ci-dessus, le problème se résume à l'établissement d'un bilan de volumes devenus calculables analytiquement. Il est bien évident que, dans la pratique, la difficulté consiste à bien définir les dimensions du modèle. Sur ce point, la qualité des archives, l'existence d'études statistiques sur des zones étendues et l'accessibilité des carrières seront des atouts majeurs, ainsi que l'observation des fontis visibles en surface, si la zone étudiée en possède.

■ Calcul du volume du cône d'éboulis

On a les relations suivantes :

$$\text{Volume du cône : } V = \frac{1}{3} \pi R_i^2 h_i \quad (1)$$

$$\text{Volume du tronc de cône à bases parallèles : } V = \frac{1}{3} \pi H (R_i^2 + R_i R_s + R_s^2) \quad (2)$$

$$\text{Volume du cylindre : } V = \pi R_s^2 D \quad (3)$$

Avec :

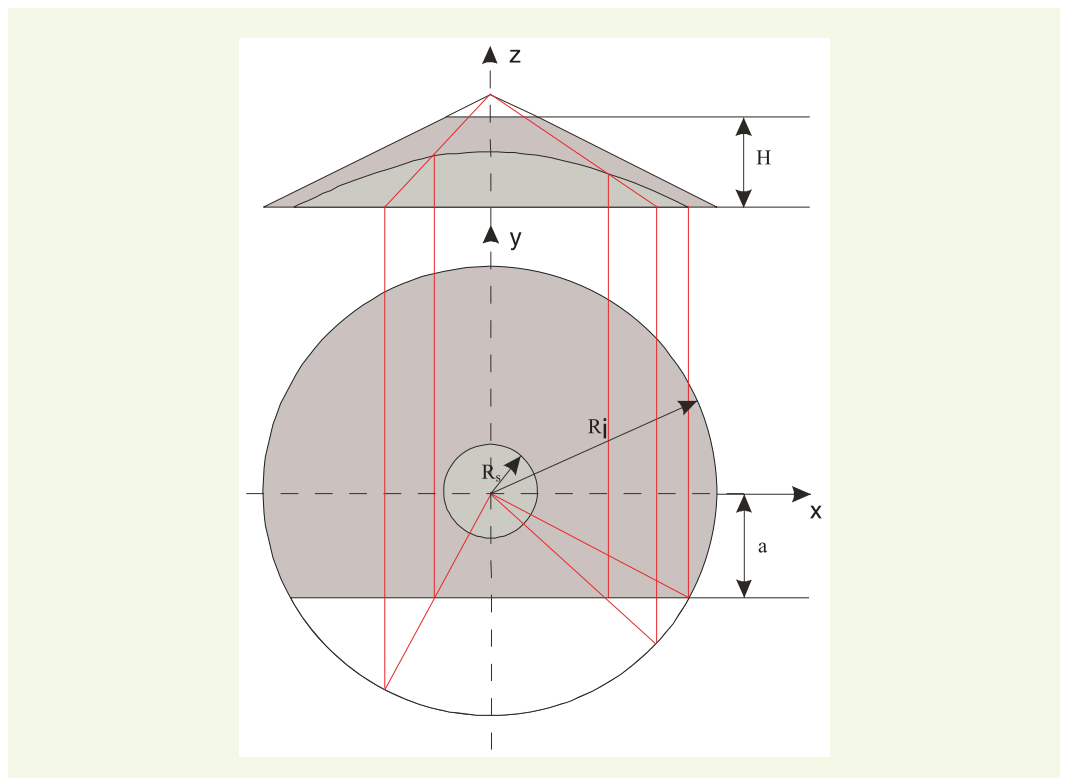
- h_i : hauteur du cône,
- H : hauteur du tronc de cône,
- R_i : rayon de la base inférieure du tronc de cône (grande base) ou du cône,
- R_s : rayon de la base supérieure du tronc de cône (petite base) et du cylindre,
- D : hauteur du cylindre.

L'intersection d'un cône par un plan parallèle à l'axe détermine une section hyperbolique séparant le cône en deux parties complémentaires (figure 2). La plus éloignée de l'axe représente la partie tronquée du cône d'éboulis lorsque celui-ci s'appuie sur un obstacle (paroi, pilier, etc.). Ce segment conique ou onglet hyperbolique manquant au cône ou tronc de cône doit être pris en considération dans le bilan des volumes.

Le développement mathématique conduisant à l'expression du volume de cet élément est le suivant :

$$\text{Équation du cône : } x^2 + y^2 - \frac{R^2}{h^2} z^2 = 0$$

figure 2
Vue descriptive du tronc de cône coupé par un plan orthogonal au plan de base.



L'équation de la section hyperbolique située à une distance a du centre de symétrie s'écrit :

$$\begin{cases} y^2 - \frac{R^2}{h^2} z^2 - a^2 = 0 \\ x = a \end{cases}$$

Le volume V de l'onglet ABC de la **figure 3** a pour expression (voir calcul en annexe).

$$V = \frac{h}{6R} \left[R^3 \theta - a^3 \left(\frac{\sin \theta}{2 \cos^2 \theta} + \frac{1}{4} \ln \left| \frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} \right| \right) \right]_{\theta_1}^{\theta_2} \quad (4)$$

avec $a = R \cos \theta_2$; θ , θ_1 et θ_2 sont exprimés en radians. H est la hauteur du cône et R le rayon du cercle de base.

Si V est étendu au quart du cône, θ_1 est nul, et le volume de l'onglet a pour expression :

$$V = \frac{h}{6R} \left[R^3 \theta - a^3 \left(\frac{\sin \theta}{2 \cos^2 \theta} + \frac{1}{4} \ln \left| \frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} \right| \right) \right] \quad (5)$$

θ : angle polaire en radians formé par l'intersection du plan orthogonal (Δ), d'abscisse a , avec le cercle de base (**figure 3**).

La combinaison et l'assemblage d'onglets élémentaires permettent la prise en compte d'obstacles aux formes plus complexes.

En application paramétrique de la formule (5), les graphiques des **figures 4** et **5** montrent, sur un exemple, la variation du volume de la zone AEF incluse dans le quart d'un tronc de cône en fonction de la position du plan (Δ) repérée par a ou θ ($\theta = \theta_2$, $\theta_1 = 0$), pour différentes hauteurs de vide en carrière et pour une pente de génératrices de cône d'éboulis fixée à $2V/3H$, le diamètre de la partie supérieure du tronc de cône ayant été fixé à 5 m.

figure 3

Schéma d'étude pour le calcul du volume de l'onglet ABC (projection sur le plan de base du cône).

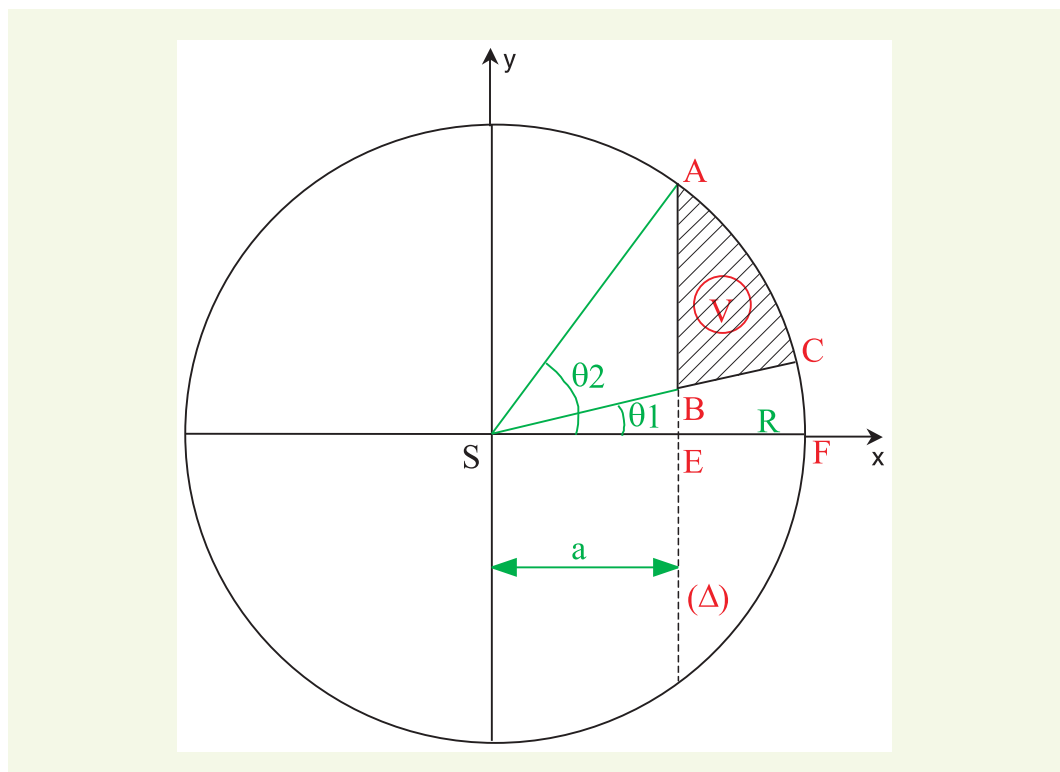


figure 4
Variation du volume de l'onglet AEF en fonction de la distance a ($R_s = 2,5$ m).

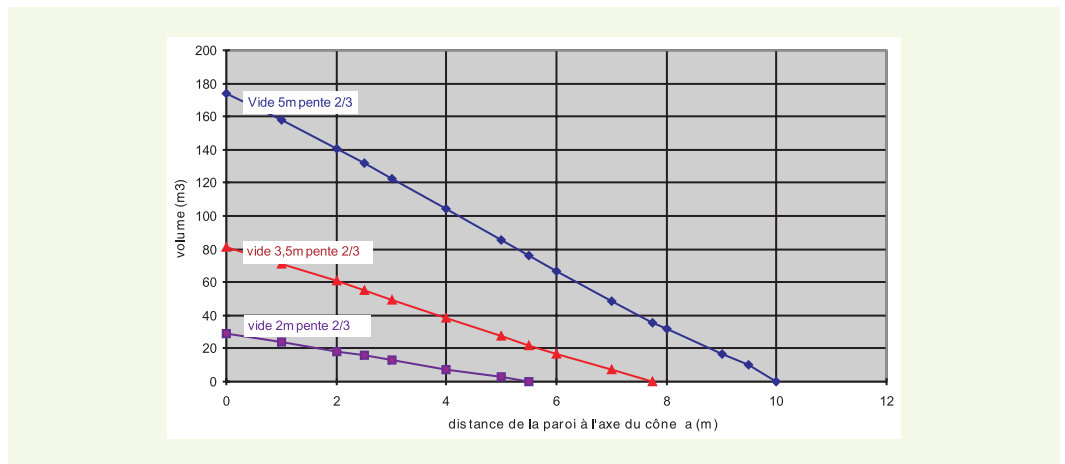
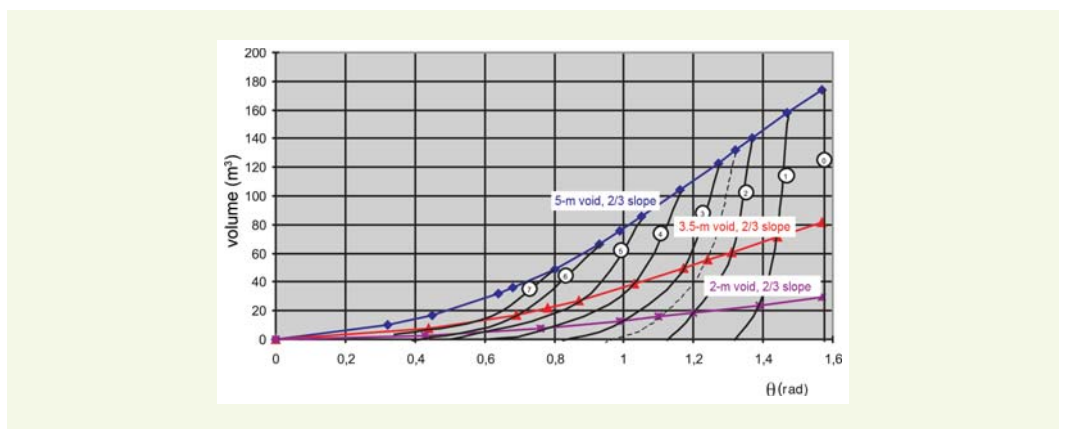


figure 5
Variation du volume de l'onglet AEF en fonction de l'angle θ ; les valeurs figurant dans les cercles donnent la valeur de a (en m).



■ Calcul des volumes de sol effondré dans la cheminée

Après un effondrement localisé du toit de la carrière, le processus séquentiel de dégradation à l'intérieur du terrain de recouvrement peut être analysé par phases successives d'éboulement de la manière suivante.

V_0 est le volume du tronc de cône d'éboulis, amputé ou non latéralement par une paroi. Après le premier éboulement, il correspond initialement à un volume $V_1 = V_0/f$ de sol (ou terrain) en place situé dans la cheminée, f étant le coefficient de foisonnement du terrain. Puis, en supposant que la hauteur de cet élément cylindrique h_1 soit inférieure à la hauteur du recouvrement D , la chute de cette masse de terrain, passant d'un état en place à un état foisonné, va créer à son tour un vide et, ainsi de suite, chaque bloc successif de volume V_2, V_3, \dots, V_n comblera à l'état foisonné le vide laissé par le bloc précédent (figure 6). Ce mécanisme se met en équation de la manière suivante :

$$\sum V_i = V_0 \left(\frac{1}{f} + \frac{1}{f^2} + \dots + \frac{1}{f^{n-1}} + \frac{1}{f^n} \right) \quad (6)$$

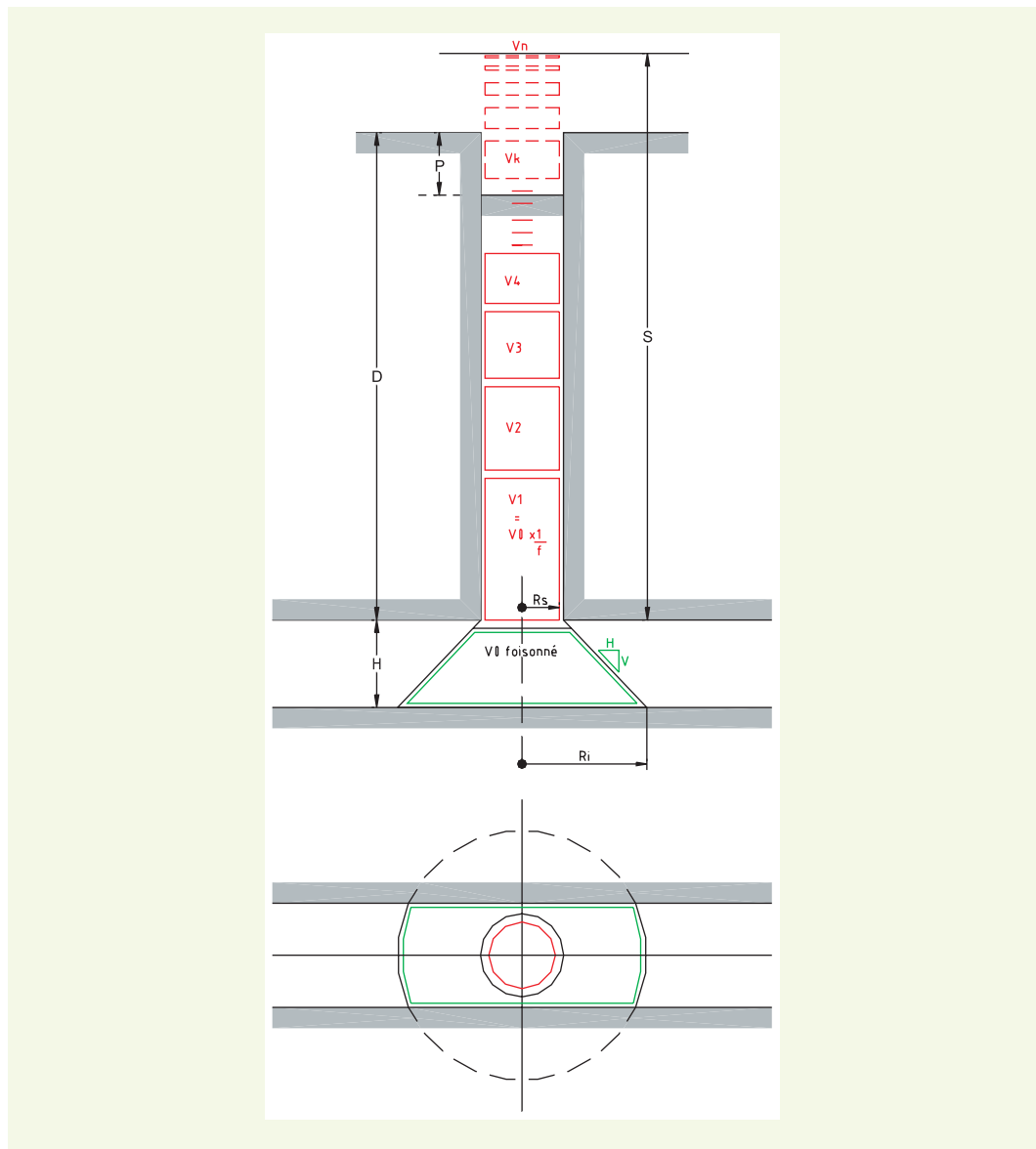
Le coefficient de foisonnement f , de valeur supérieure à l'unité, peut être défini par le rapport des volumes massiques du sol foisonné et en place ; il s'ensuit que la suite des termes de la parenthèse, tous inférieurs à 1, constitue une série géométrique décroissante et convergente vers la limite $\frac{1}{f-1}$.

Dans ces conditions, la hauteur potentielle d'un fontis pourra s'écrire :

$$S = \sum_{i=1}^n h_i = \frac{V_0}{\pi R_s^2 (f-1)} \Rightarrow S = \frac{H/3}{\pi R_s^2} \left(R_s^2 + R_s R_i + R_i^2 \right) \frac{1}{R_s^2 \times (f-1)} \quad (7)$$

figure 6

Montée d'un fontis par chute de blocs cylindriques successifs : S détermine la hauteur de la cheminée remplie ou de la zone de recouvrement perturbée au-dessus du vide, P est la hauteur de la dépression en surface pour un fontis ouvert.



$$\text{Comme } (R_i = R_s + d), \text{ on a aussi : } S = \frac{H}{3} \left(3 + \frac{d^2}{R_s^2} + \frac{3d}{R_s} \right) \frac{1}{(f-1)} \quad (8)$$

R_s : rayon de la cheminée d'éboulement et du cercle de la base supérieure du tronc de cône,

f : coefficient de foisonnement (> 1),

H : hauteur du tronc de cône,

d : largeur de la couronne tronconique (cf. figure 1).

À noter qu'un calcul complémentaire démontre qu'une cheminée coiffée d'une cloche de fontis hémisphérique élève la hauteur du fontis d'une valeur de $R_s/3$ (S avec cloche = S cylindrique + $R_s/3$).

La dernière expression (8) met en évidence que, pour une hauteur de vide donnée, la variation de la hauteur d'un fontis dépend principalement du rapport d/R_s . Ceci signifie que le volume de la couronne du tronc de cône est déterminant vis-à-vis de celui du cylindre inscrit en continuité de la cheminée, et ce d'autant plus que R_s sera petit. Cette remarque explique, comme on le verra par la suite, que les fontis de faible rayon R_s sont les plus défavorables en terme de hauteur de fontis (la fonction déterminant la hauteur d'une cheminée de fontis varie comme l'inverse du carré du rayon de la cheminée et comme l'inverse du coefficient de foisonnement).

La hauteur d'un fontis a donc une valeur finie qui, d'un point de vue mathématique, se situe sous le niveau du terrain de surface ou au-dessus, condition qui s'exprime selon le cas par :

a) $S - D > 0 \Rightarrow$ apparition de la cloche de fontis en surface ; la valeur P constitue une estimation de la profondeur du trou laissé en surface par le fontis :

$$P = (f - 1) (S - D) \quad (9)$$

Par conséquent, une cheminée sera entièrement vide pour $P \geq D$,

$$\text{soit pour } S \geq \frac{Df}{f-1} \quad (10)$$

Ceci revient au même lorsque l'épaisseur du recouvrement D sera égale ou inférieure à la hauteur h_1 du premier bloc défini dans le processus d'éboulement de la cheminée ;

b) $S - D < 0 \Rightarrow$ cloche de fontis noyée dans les terrains de recouvrement ; pas d'apparition en surface.

Cette description a pour mérite de montrer l'existence et la progression ascensionnelle d'un vide au-dessus de l'effondrement initial. Elle met en évidence la présence possible d'un vide que l'on pourrait trouver en sondage de reconnaissance à une cote qui ne correspondrait pas à celle du niveau de la carrière proprement dite mais quelque part au-dessus.

■ Remarques concernant d'autres formes géométriques de la cheminée d'éboulis

Le départ de fontis met parfois en évidence des cavités en forme de cloches qui pourraient être assimilées à des paraboloïdes ou à des demi-ellipsoïdes. Ces formes se conservent généralement dans le mouvement d'ascension en extrémité haute, le corps de la cheminée prenant un aspect cylindrique sur la hauteur basse restante.

Si de telles options étaient retenues lors d'une étude, il y aurait lieu de tenir compte d'un supplément de hauteur de cylindre due à Δv . Cependant, dans la majorité des cas, la simplification cylindrique est suffisante à condition de réaliser une étude paramétrique appropriée.

CHOIX DES PARAMÈTRES

Toute estimation de la hauteur de montée d'un fontis nécessite le choix de deux paramètres : la pente du cône d'éboulis et le coefficient de foisonnement. Ces paramètres essentiels ne sont pas tout à fait constants dans le temps. Leurs variations, généralement limitées, peuvent néanmoins occasionner des effets secondaires par réajustement des terrains à long terme, surtout pour un affaissement de grande envergure.

Le **tableau 1**, donné à titre indicatif, est emprunté au domaine routier. Les valeurs fournies sont les résultats d'informations obtenues auprès d'entreprises de terrassement et le fruit de l'expérience du laboratoire acquise en la matière (estimation comparative des cubatures de matériaux en place et transportés par camions puis mis en dépôt). Les mesures directes provenant de fontis sont trop peu nombreuses pour en tirer actuellement des enseignements qui, toutefois, concernent généralement la détermination d'un coefficient de foisonnement global propre à une structure de terrain donné (voir plus loin), c'est-à-dire pour une succession de couches, ce qui rend très difficile le discernement par type de matériau.

Les calculs d'une hauteur de fontis peuvent être menés en milieu homogène ou hétérogène selon l'aptitude des différents sols du recouvrement à foisonner. Pour un milieu hétérogène, on peut définir des tronçons élémentaires supposés homogènes et considérer chaque niveau séparateur comme étant un niveau fictif de la surface du sol. Il est toutefois préférable de rechercher un coefficient de foisonnement moyen d'ensemble.

tableau 1
Pentes et coefficients de foisonnement.

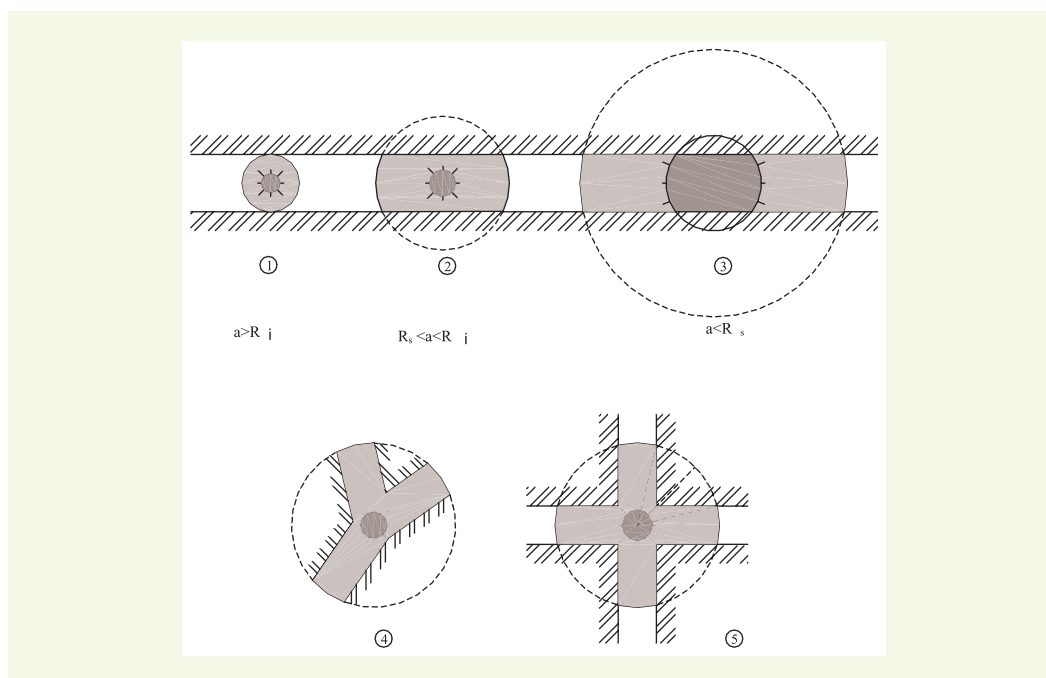
| Nature de terrain | Catégorie | Pente des génératrices du cône V/H | | Coefficient de foisonnement f | |
|---------------------------------|-----------|------------------------------------|-----------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | | matériau sec ou humide | matériau saturé | matériau sec | matériau très humide ou saturé |
| Graves et sables alluvionnaires | 1 | 1/1 | 1/1 à 2/3 | 1,15 à 1,20 | 1,10 à 1,15 |
| Sables fins | 2 | 1/1 | 2/3 | 1,15 à 1,25 | 1,10 à 1,20 |
| Marnes et argiles cohérentes | 3 | 1/1 à 2/3 | 2/3 | 1,35 à 1,40 | 1,25 à 1,35 |
| Calcaire et craie | 4 | 1/1 | 1/1 à 2/3 | 1,30 à 1,40 | 1,30 à 1,35 |
| Roche | 5 | $\geq 1/1$ | 1/1 | 1,40 à 1,65* | 1,40 à 1,65* |

* : $f = 1,35$ s'il y a possibilité de pénétration de sols fins ou grenus dans les vides.

CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES DANS LE PLAN

Les situations d'un éboulement en carrière sont nombreuses et diversifiées selon les configurations de l'exploitation. Chaque cas devra faire l'objet d'une réflexion, le principe et la démarche de la méthode restant les mêmes. La **figure 7** représente différentes situations envisageables qualifiées de référence lors d'un effondrement localisé en galeries.

figure 7
Cas types d'éboulement en galerie en vue de dessus : le calcul du volume de l'onglet tronconique du cas ③ nécessite la différence de volumes entre les onglets déterminés respectivement sur deux cônes superposés ayant chacun pour base la grande et la petite base du tronc de cône.



APPLICATION DE LA MÉTHODE : CAS DE LA PARCELLE DE CHANTELOUP-LES-VIGNES (78)

■ Présentation

Une partie du territoire de la commune de Chanteloup-les-Vignes est située à l'intérieur du périmètre de la butte de l'Hautil, réputée pour ses nombreux fontis et sa dangerosité en raison de la densité des carrières souterraines de gypse ludien qui la traversent.

Cette zone singulière du département des Yvelines a fait l'objet d'un PPR mettant en lumière l'apparition de fontis quasi-circulaires qui à terme débouchent à « l'emporte-pièce » (figure 8) et qui, par la suite, sous l'action de l'érosion, forment des cuvettes localisées et bien circonscrites quelquefois remplies d'eau de ruissellement. C'est dans ce contexte qu'est apparu celui de Chanteloup-les-Vignes en 2001, à proximité de la D22 en limite de propriétés bâties.

figure 8

Vue du fontis de Chanteloup-les-Vignes (année 2001) : diamètre = 5 m ; profondeur P = 4 m.

On remarquera la présence de la route départementale, en arrière-plan, distante de 7 à 8 m du bord de fontis.



Il s'agit d'un fontis circulaire de diamètre voisin de 5 m et de profondeur 4 m qui est apparu brutalement en surface ; il est classé parmi les fontis de petite taille (diamètre inférieur à 10 m) [2]. Les renseignements obtenus et l'examen de documents d'archives ont montré que l'affaissement avait eu lieu à la croisée de deux galeries et que la formation de ce fontis avait été repérée lorsque celles-ci étaient auparavant accessibles ; son évolution a été suivie en vidéoscopie par l'Inspection générale des carrières de Versailles.

Des sondages de reconnaissance destructifs, avec enregistrement des paramètres de forage, ont montré que, dans un périmètre de l'ordre de 15 m autour du fontis, les galeries adjacentes étaient comblées en partie. Au-dessus des cavités, la hauteur de recouvrement D est de l'ordre de 30 m à cet endroit et les terrains sont composés, de bas en haut :

- d'un ensemble marneux, d'une vingtaine de mètres d'épaisseur ;
- d'une couche de sable de Fontainebleau d'une vingtaine de mètres d'épaisseur, faiblement aquifère à la partie inférieure (1 à 2 m), comparativement à l'épaisseur du réservoir habituel contenu au sein de cette formation ; les puisards « naturels » représentés par l'existence des fontis épars en bordure de la butte de l'Hautil sont probablement une des causes du phénomène d'épuisement.

À trente mètres de profondeur, l'exploitation gypseuse a été réalisée en galeries de 6 m de largeur et de 5 m de hauteur ; le fontis s'est produit à un carrefour de galeries sur toute la hauteur de l'exploitation. Ailleurs, les vides résiduels reconnus par sondages ont une hauteur de 2 m entre les produits de comblement et le sommet des galeries.

■ Calage des paramètres : pente et coefficient de foisonnement

Sur le principe énoncé, la recherche et le calage des paramètres sont réalisés à partir des données géométriques du fontis visibles uniquement en surface au moment de l'étude, aucun accès n'étant possible à l'intérieur de l'ancienne exploitation.

La détermination des deux paramètres (pente et coefficient de foisonnement) par le calcul dépend de la précision à laquelle ont été acquises les données dimensionnelles du problème. Certaines ont été mesurées ; il s'agit du rayon de la cheminée en surface ($R_s = 2,50$ m) et de la profondeur P du trou. D'autres proviennent d'estimations sur la base d'archives ou de photos ; il s'agit de la hauteur d'exploitation ($H = 5$ m), de la largeur des galeries d'exploitation ($L = 6$ m) et du diamètre

de départ du fontis égal à 5 m ($R_s = 2,50$ m). De plus, il semblerait, après examen photographique, que les parois latérales des galeries d'exploitation soient légèrement inclinées, réduisant ainsi au sommet la largeur des galeries d'environ 1 m.

En prenant en compte tous ces éléments et les incertitudes s'y rattachant, l'étude a été conduite en faisant varier la pente du cône d'un angle de 40 à 45 degrés et la distance a de 2,5 m à 3 m ($a \geq R_s$). Cette façon de procéder permet en outre d'analyser la sensibilité de la variation de ces paramètres. Les calculs numériques (tableau 2) ont été menés en application de la formule (4) établie précédemment et du schéma d'étude de la figure 9.

Les résultats des calculs indiquent clairement que, dans la configuration étudiée, les obstacles sont déterminants dans la recherche de f ; ceux-ci réduisent (entre le tiers et la moitié) le volume du cône développé selon les cas. Le coefficient de foisonnement se situe probablement dans l'intervalle [1,34 – 1,37] d'après les résultats numériques.

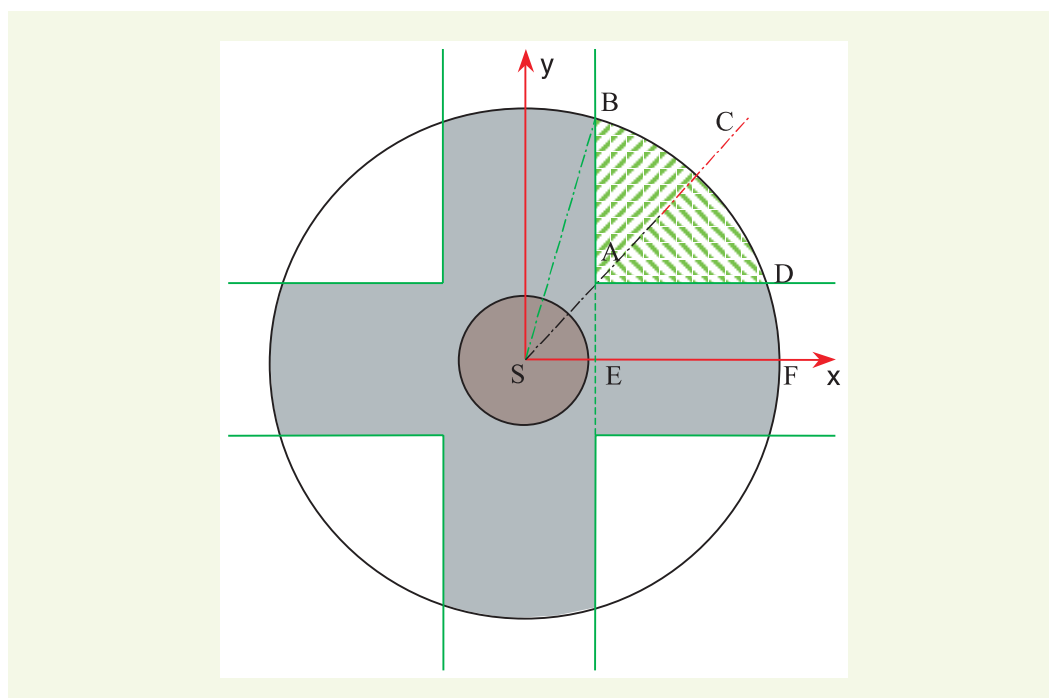
| α degré | a | R_1 | R_s | V Onglets $8 \times V_{ABC}$ | V Tronc de cône déve- loppé | V Tronc de cône amputé V_0 | V Éboulis dans la cheminée | V Total éboulis (cheminée + cône entaillé par les parois) | V Sol en place (cheminée) | Coefficient de foison- nement f |
|--------------------------|------|-------|-------|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|
| Pente du cône (p) | m | m | m | m^3 | m^3 | m^3 | m^3 | m^3 | m^3 | $(11) = \frac{(9)}{(10)}$ |
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) = (6) – (5) | (8) | (9) = (7) + (8) | (10) | (11) = $\frac{(9)}{(10)}$ |
| 40 ($p = 1/1,2$) | 2,5 | 8,46 | 2,5 | 237 | 518 | 281 | 510 | 791 | 589 | 1,34 |
| | 2,75 | 8,46 | 2,5 | 210 | 518 | 308 | 510 | 818 | 589 | 1,39 |
| | 3 | 8,46 | 2,5 | 184 | 518 | 334 | 510 | 844 | 589 | 1,43 |
| 42 ($p = 1/1,1$) | 2,5 | 8,05 | 2,5 | 207 | 477 | 270 | 510 | 780 | 589 | 1,33 |
| | 2,75 | 8,05 | 2,5 | 181 | 477 | 296 | 510 | 806 | 589 | 1,37 |
| | 3 | 8,05 | 2,5 | 156 | 477 | 321 | 510 | 831 | 589 | 1,41 |
| 45 ($p = 1/1$) | 2,5 | 7,5 | 2,5 | 168 | 425 | 257 | 510 | 767 | 589 | 1,31 |
| | 2,75 | 7,5 | 2,5 | 144 | 425 | 281 | 510 | 791 | 589 | 1,34 |
| | 3 | 7,5 | 2,5 | 121 | 425 | 304 | 510 | 814 | 589 | 1,38 |

tableau 2

Détermination paramétrique du coefficient de foisonnement du fontis de Chantelouples-Vignes – α : pente des génératrices par rapport à l'horizontale.

figure 9

Géométrie d'un effondrement au carrefour de deux galeries. En raison de la symétrie de la figure, le volume des éboulis comblant les galeries est égal à : vol. du cône – $8 \times$ vol. de l'onglet ABC, le volume de l'onglet ABC étant calculé selon le modèle de la figure 3 et l'application de la formule (4) en prenant l'axe Sx comme référence. Une dissymétrie de la figure exigerait la combinaison de différents onglets.



Dans la gamme des pentes choisies, bien souvent observées en carrière, $f_{\min} = 1,34$ sera retenu par la suite dans le contexte d'une évaluation de hauteur potentielle de fontis, hauteur, rappelons-le, inversement proportionnelle au facteur f .

À titre de vérification, l'emploi des équations (7) et (9) conduit bien au creux de 4 m observé en surface. Par ce biais, la détermination du coefficient f peut être très rapide dès la connaissance des paramètres géométriques, sans qu'il soit nécessaire d'effectuer les calculs détaillés présentés dans le **tableau 2**.

■ Résultats de l'étude paramétrique

Suite à ces résultats, on peut admettre la géométrie définie et le coefficient de foisonnement annoncé, résultats qui conduisent aux valeurs du **tableau 3**, en réponse aux interrogations sur les hauteurs de montées potentielles de fontis causées par un éventuel éboulement en galerie (schémas 1 à 3 de la **figure 7**). Les valeurs annoncées dans le cadre du fontis de Chanteloup-les-Vignes ont, avant tout, un caractère prospectif. S est à comparer avec D (épaisseur de recouvrement) ; l'écart entre ces deux valeurs renseigne sur le degré de dangerosité d'une apparition de fontis dans un secteur donné. Cette appréciation devrait permettre, le cas échéant, de programmer une action de renforcement ou de comblement de galerie pour prévenir tout risque d'apparition de fontis en surface ou encore, *a contrario*, éviter toute intervention qui s'avérerait inutile et coûteuse.

Aux valeurs S de montée de fontis, il convient en toute rigueur d'associer une correction de hauteur égale à $R_s/3$ pour tenir compte du dôme hémisphérique.

Les valeurs consignées sont significatives, appuient certains points évoqués précédemment et en appellent d'autres. Les points essentiels sont les suivants :

- les hauteurs d'ascensions potentielles d'un fontis sont très sensibles aux diamètres ;
- dans la configuration étudiée, la zone faisant obstacle au développement du cône d'éboulis se fait nettement sentir au-delà d'un vide excédant 3 m ;
- pour des petits diamètres, les éboulis ne remplissent pas la cheminée qui reste théoriquement vide de terrain sur toute sa hauteur. Cela serait le cas d'une carrière similaire à celle-ci de hauteur supérieure à 3 m, associée à un diamètre d'effondrement de toit inférieur à 2 m ;

tableau 3

Résultats de calculs pour $f = 1,34$ (coefficient de foisonnement) – $P = 1/1$ (pente des génératrices du cône) – $L = 6$ m (largeur de la galerie) – $D = 30$ m (épaisseur de recouvrement).
À titre de comparaison, les valeurs entre parenthèses correspondent au cône non tronqué.
* hauteur supérieure à l'épaisseur des terrains de recouvrement (formation d'un fontis en surface).
° cheminée du fontis entièrement vide, en théorie : pas d'auto-comblement.

| Type (cf. figure 7) | Hauteur du vide H (m) | Rayon R_s (m) | Volume V_0 (m ³) | | Hauteur de la montée du fontis S (m) | | Rapport H/S | |
|---------------------|-----------------------|-----------------|--------------------------------|---------|--------------------------------------|--------|-------------|--------|
| 1 | 1 | 1 | 7,3 | | 6,9 | | 1/7 | (1/7) |
| 1 | | 2 | 19,9 | | 4,7 | | 1/5 | (1/5) |
| 2 | | 3 | 34,8 | (38,7) | 3,6 | (4,0) | 1/4 | (1/4) |
| 3 | | 4 | 57,7 | (63,9) | 2,3 | (3,7) | 1/2 | (1/4) |
| 3 | | 5 | 86,9 | (95,3) | 1,5 | (3,5) | 1/1,5 | (1/4) |
| 1 | 2 | 1 | 27,2 | | 25,5 | | 1/13 | (1/13) |
| 2 | | 2 | 54,8 | (58,6) | 11,9 | (13,7) | 1/6 | (1/7) |
| 2 | | 3 | 90,1 | (102,6) | 8,6 | (10,7) | 1/5 | (1/5) |
| 3 | | 4 | 135,4 | (159,2) | 6,3 | (9,3) | 1/3 | (1/4) |
| 3 | | 5 | 190,1 | (228,3) | 4,5 | (8,5) | 1/2 | (1/4) |
| 2 | 3 | 1 | 56,4 | (68) | 51,0* | (63,6) | 1/18 | (1/21) |
| 2 | | 2 | 92,5 | (122,5) | 21,6 | (28,7) | 1/7 | (1/10) |
| 2 | | 3 | 142,7 | (197,9) | 14,8 | (20,6) | 1/5 | (1/7) |
| 3 | | 4 | 220,4 | (292,2) | 11,1 | (17,1) | 1/4 | (1/6) |
| 3 | | 5 | 330,1 | (405,3) | 8,6 | (15,2) | 1/3 | (1/4) |
| 2 | 5 | 1 | 132 | (225) | 124,5*° | (210) | 1/24 | (1/42) |
| 2 | | 2 | 204 | (350) | 48,1* | (81) | 1/10 | (1/16) |
| 2 | | 3 | 299 | (508) | 31,1* | (52,8) | 1/6 | (1/10) |
| 3 | | 4 | 429 | (696) | 23,3 | (40,7) | 1/5 | (1/8) |
| 3 | | 5 | 599 | (916) | 18,7 | (34,3) | 1/4 | (1/7) |

- le rapport des hauteurs vide/montée (H/S) du fontis est très variable à l'intérieur de chaque cas selon l'étendue des désordres ;
- les hauteurs de vide résiduel en carrière inférieures à 3 m excluent tout risque d'apparition de fontis, quel que soit leur diamètre d'effondrement dans cet exemple précis.

■ Interprétation

La méthode proposée, fondée exclusivement sur la géométrie, est sécuritaire puisque, sur le plan mécanique, rien ne s'oppose à la montée du fontis dans la zone de recouvrement (sous réserve de la validité du modèle et du choix des paramètres). Il n'en demeure pas moins qu'il sera souvent nécessaire d'apporter *in fine* une correction aux résultats obtenus afin d'éviter tout pessimisme exagéré, à la suite d'une réflexion fondée sur la mécanique des sols ou des roches, avant l'évaluation définitive de l'aléa, tout au moins dans les situations les plus critiques, c'est-à-dire pour les diamètres les plus faibles (rayon $R_s \leq 1$ m).

Les fontis dont la hauteur potentielle de montée est inférieure à l'épaisseur de recouvrement, donc non débouchants, entièrement occlus dans le terrain, ne représentent généralement pas de danger patent ; ils n'en constituent pas moins des zones de faiblesse mécanique, potentiellement dangereuses si le recouvrement est faible. Une attention particulière sera nécessaire lorsque les hauteurs calculées seront proches de la surface, ne serait-ce qu'en raison des incertitudes attachées aux mesures et aux appréciations.

Les conclusions seront, bien entendu, en rapport avec les critères de définition du risque et des enjeux qui auront été établis au départ entre les différentes parties concernées.

RÉFLEXION SUR LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE D'UN FONTIS

De manière à étudier plus précisément la potentialité de la montée d'un fontis en fonction de son diamètre et compléter l'étude géométrique qui conduit, pour un rayon nul, à une hauteur infinie, une étude plus spécifiquement orientée vers l'aspect mécanique du problème a été conduite en utilisant un logiciel de calcul par éléments finis (CESAR – LCPC). En effet, on est en droit de penser, comme il a déjà été dit, qu'il puisse exister une limite de diamètre.

■ Données du problème

Pour simplifier, un modèle homogène et isotrope, avec des diamètres de cheminée variables de 0,50 à 6 m et une hauteur commune de 6 m, a été choisi. Dans ces analyses, les cheminées sont vides et le recouvrement de terrain au-dessus de la coupole hémisphérique coiffant la cheminée cylindrique est de 20 m. La problématique envisagée simule un fontis en évolution, dans une situation plutôt défavorable qui limite le modèle exclusivement à la cheminée.

La figure étant axisymétrique, le problème a pu être traité en modèle 2D (plan méridien) avec un découpage en régions par segments de droite (**figure 10**), les contours du modèle étant bloqués sauf à sa partie supérieure qui a été laissée libre. Le modèle décrivant le massif est caractérisé mécaniquement par le choix d'une loi élastoplastique prenant en compte le critère de Mohr-Coulomb, combinée aux paramètres usuels d'élasticité. L'opération consiste essentiellement à comparer les contraintes et les déformations autour de la cheminée dans des conditions identiques, ceci pour différents diamètres. Des forces initiales géostatiques et des forces de déconfinement ($\lambda = 0,75$) en périphérie du trou ont été introduites.

La nature des couches et les caractéristiques mécaniques qui s'y rattachent proviennent d'essais de cisaillement effectués en laboratoire ou tirées de valeurs figurant dans les tableaux d'accompagnement des manuels d'utilisation du logiciel (**tableau 4**) ; elles représentent notamment les couches des marnes supragypseuses et les sables de Fontainebleau que l'on rencontre au-dessus des carrières

figure 10
Visualisation du modèle
et de son maillage.

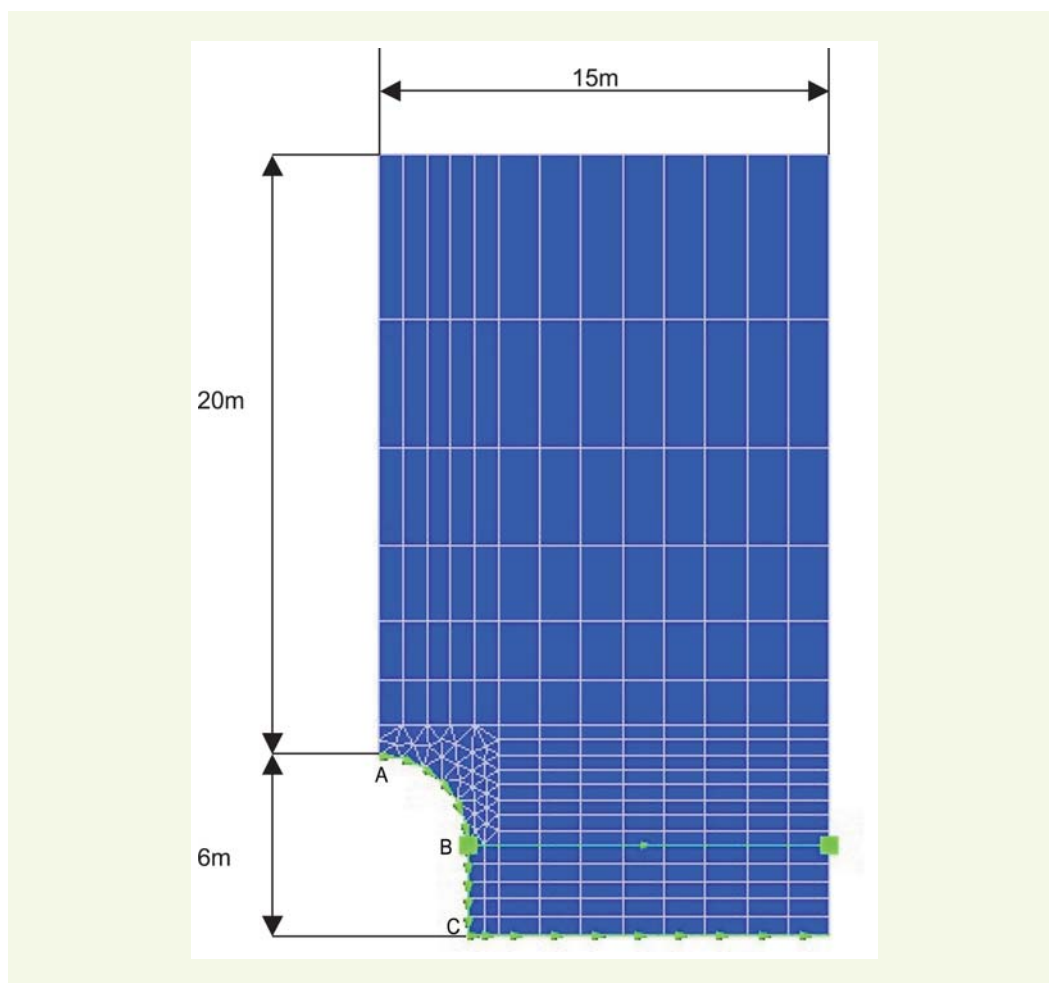


tableau 4
Caractéristiques des
matériaux pour les calculs.

| Nature du sol | Masse volumique ρ (kg/m ³) | Cohésion c (kPa) | Angles de frottement | | Module de Young E (kPa) | Coefficient de Poisson ν |
|------------------|---------------------------------------------------|---------------------|----------------------|----------------|-------------------------------|------------------------------------|
| | | | φ (degré) | Ψ (degré) | | |
| argile (CT) | 2 000 | 150 | 0 | 0 | 40 000 | 0,33 |
| argile (LT) | 2 000 | 12 | 16 | 16 | 10 000 | 0,33 |
| sable fin (SF) | 2 000 | 0 | 33 | 33 | 70 000 | 0,33 |

φ : angle de frottement interne.

Ψ : angle de dilatance.

de gypse de la région parisienne. En outre, pour l'argile, des paramètres de cisaillement à court terme (CT) et à long terme (LT) ont été considérés.

Au total, chaque groupe de caractéristiques associé à un diamètre de cheminée a fait l'objet d'un calcul dont les résultats les plus significatifs sont présentés sur les figures 11 et 12. Seuls les résultats les plus explicites fournis par le logiciel sont présentés ici ; ils montrent que la simulation numérique permet de mieux comprendre le phénomène physique précédemment analysé géométriquement. L'examen des résultats, présentés sous forme de graphiques et de schémas d'isovaleurs, permet de donner des indications sur la tenue des cavités pour les diamètres de fontis choisis.

■ Équilibre de la cheminée

Les valeurs comparatives des déplacements en fonction des paramètres (diamètres de fontis et nature des sols), conduisent à penser qu'en terrain sec toutes les cavités se tiennent naturellement

figure 11

Représentation en isovalues des déplacements horizontaux U , verticaux V et de la contrainte minimale σ_1 pour les diamètres du fontis de 1 m et de 5 m dans les zones décomprimées du sable. On observe l'étendue de la zone de perturbation autour de la cavité provoquée par le fontis pour ces deux diamètres.

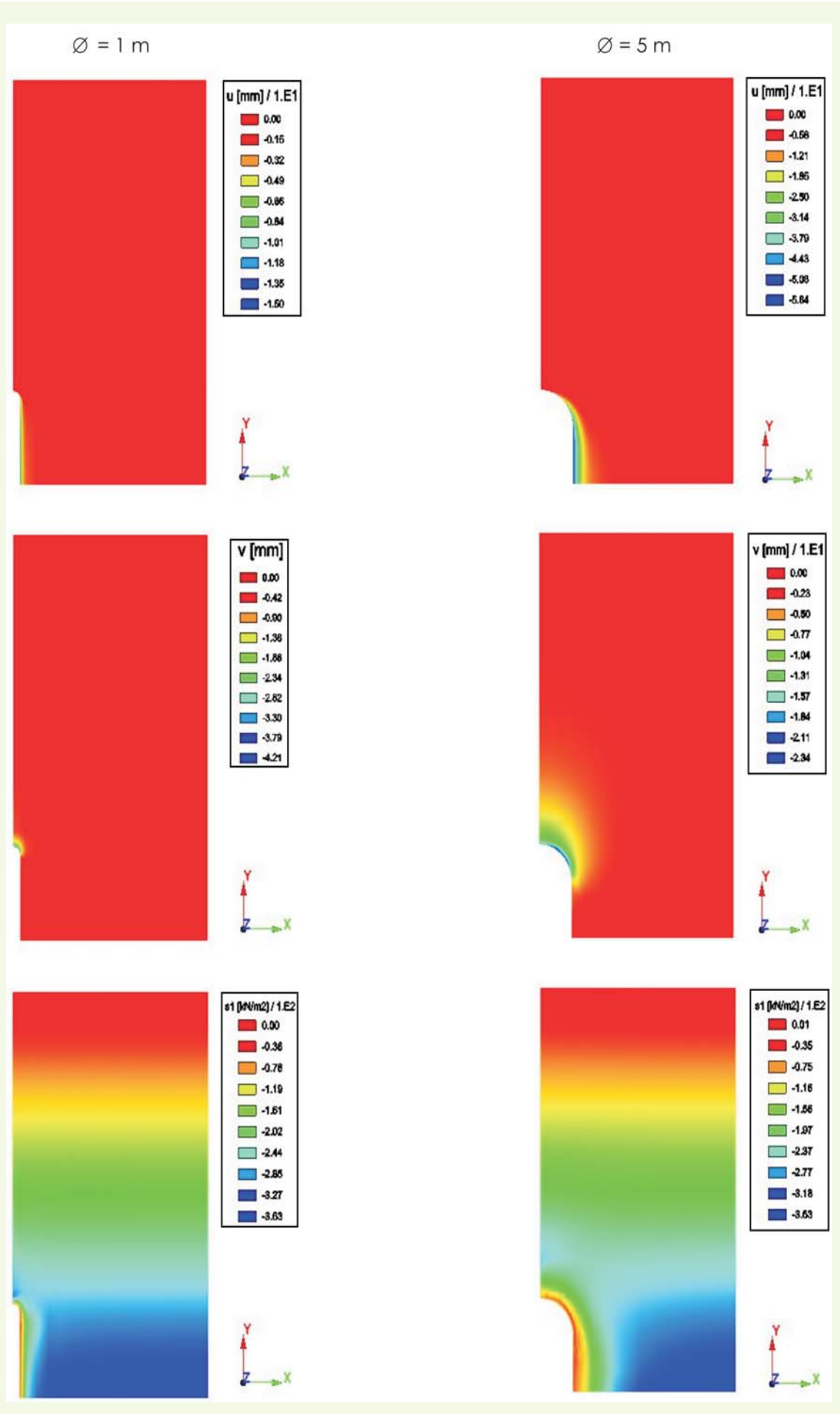
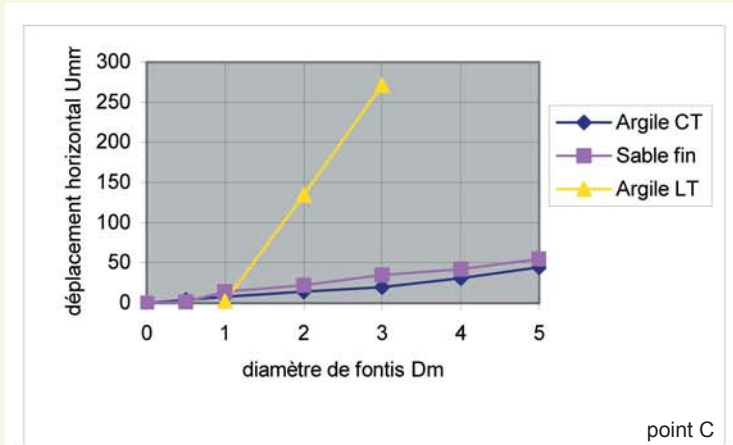
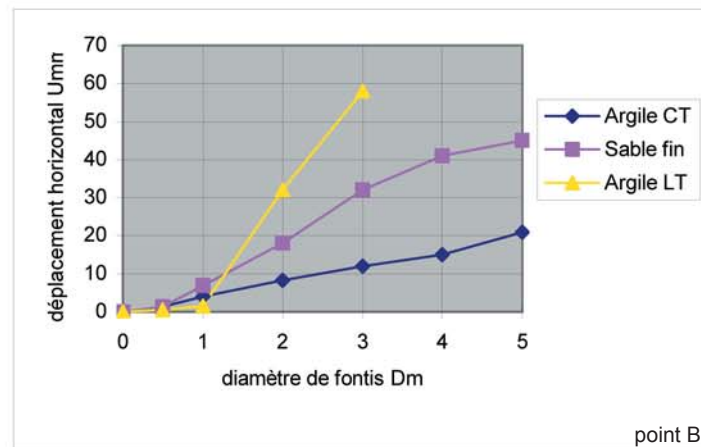


figure 12

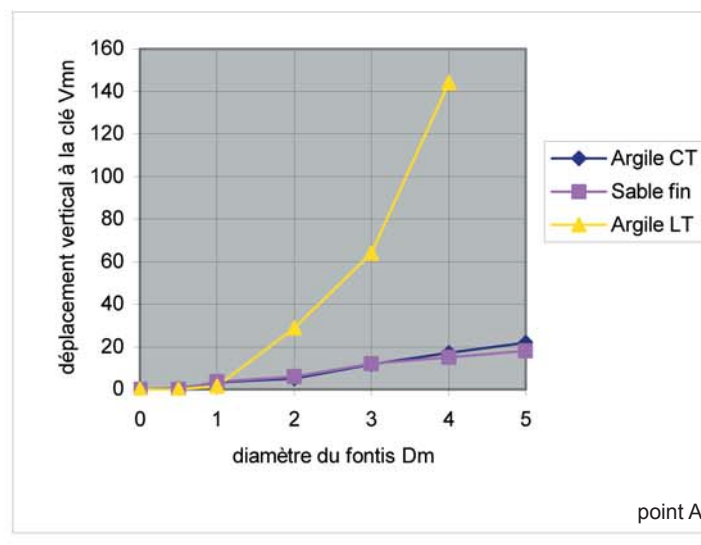
Comparaison des déplacements pour différents diamètres en bord de cheminée. Les points de référence A, B, C sont indiqués sur la figure 10.



point C



point B



point A

pour des diamètres inférieurs à 1 m ($R_s \leq 0,50$ m) et que leur progression est peu probable au sein du recouvrement. Il en sera de même jusqu'à 2 m ($R_s \leq 1$ m) pour les terrains dont les caractéristiques mécaniques sont celles de sables ou d'argile « court terme ». Cela est nettement moins évident pour les caractéristiques à « long terme » de l'argile. On remarque sur les schémas d'isovaleurs que l'étendue des zones de décompression (relâchement des contraintes) autour de la cavité est un indice majeur de stabilité ou d'instabilité et que le volume de matériau décomprimé est d'autant plus important que le diamètre du fontis l'est, surtout en partie basse si l'on en juge par la forme de la zone décomprimée. Cette remarque, en liaison avec la solidité du mur de la carrière autour du trou, est un signe de la vitesse d'évolution du phénomène. Précisons qu'en l'état actuel des connaissances du comportement des terrains, il n'est pas possible de déterminer une vitesse de progression introduisant, dans un tel processus, le paramètre « temps », auquel il faudrait associer des lois de comportement des terrains plus complexes que celles utilisées ici, en milieu saturé et non saturé, avec notamment la prise en compte, pour ce dernier milieu, du phénomène de succion.

Les figures 11 et 12 illustrent les arguments avancés ci-dessus. Sur la figure 12 ont été représentés les déplacements horizontaux U et verticaux V, et la contrainte mineure S1 de l'ellipsoïde des contraintes, plutôt orientées horizontalement le long de la paroi du fontis dans le cas du sable. Pour l'argile, la représentation dans les deux cas envisagés serait sensiblement comparable ; seules changeraient, bien sûr, les valeurs obtenues.

■ Équilibre du cône

Les pentes finales du cône d'éboulis observées en carrière sont généralement raides, avoisinant souvent un angle de 45 degrés quel que soit le type de matériau, la condition étant que ce dernier ne soit pas noyé (figures 13). À noter que, pour des hauteurs de chutes importantes, les pentes du cône sont variables en cours de construction, nettement plus faibles au départ et progressivement plus importantes en raison de la cinétique (figures 14 et 15). La rotondité du massif et son confinement éventuel dans l'espace de la carrière sont certainement un atout incontestable de stabilité, comme

figure 13
Cône d'éboulis obstructif dans une carrière de gypse à parois verticales de la région parisienne composé essentiellement de blocs d'argiles très plastiques et de gypse tombé du ciel de la carrière. On observe la très bonne rectitude de la ligne de pente à un angle de 42 degrés par rapport à l'horizontale : hauteur de la carrière 5 m, diamètre du fontis 5 m (carrière de gypse à Evécquemont – 78).





figure 14

Fontis en formation entre piliers dits « tournés » dans une carrière de gypse : hauteur de la carrière 10 m, diamètre du fontis 4 m (carrière de gypse à Triel/Seine – 78).



14 15

figure 15

Fontis de 2 m de diamètre par délitement du toit à la croisée des piliers « tournés ». Observer l'aspect du dôme de section circulaire et l'arrêt actuel du phénomène au contact de l'argile raide (marnes bleues d'Argenteuil – 95).

il est facile de s'en rendre compte si l'on effectue des calculs comparatifs entre la forme conique et un talus linéaire de même hauteur, de même pente et de même caractéristiques mécaniques. Des calculs classiques dits « à la rupture » cylindrique ou sphérique (cône) conduisent à un rapport des coefficients de sécurité variant entre 1,65 et 1,80 en faveur de la forme conique, d'après les résultats des différents calculs effectués dans des conditions comparables.

La méthode a permis d'effectuer un calage des caractéristiques mécaniques des matériaux éboulés, en particulier pour la détermination de l'angle de frottement en considérant la cohésion comme nulle. L'équilibre du cône de génératrices inclinées à 45 degrés et de hauteur quelconque est obtenu (coefficient de sécurité $F = 1$) pour un angle de 30 degrés si le rapport des coefficients entre cône et talus est de 1,7.

CONCLUSION

La démarche déterministe fondée sur la géométrie constitue une méthode pour évaluer les risques encourus à la suite d'un effondrement localisé de carrière souterraine. Ce risque (ou aléa) est lié à l'apparition d'un fontis au jour. Elle est applicable dans son principe à n'importe quel vide du sous-sol, y compris les vides qualifiés de naturels tels que les poches de dissolution et les vides karstiques, à condition qu'ils aient été reconnus et que leurs formes soient assimilables à une figure géométrique simple.

Elle exige, comme toute méthode, des données fiables pour réaliser un modèle qui lui-même devra tenir compte de la variabilité des paramètres et des incertitudes autant dimensionnelles que relatives aux foisonnements des terrains après leur chute. Son aspect pessimiste répond bien à l'esprit de l'évaluation de l'aléa et à celui des textes définissant la notion de prévention des risques majeurs.

L'étude complémentaire concernant le comportement mécanique indique une montée peu probable du fontis en deçà d'un certain diamètre, estimé à 2 m ($R_s = 1$ m) pour les sables et les argiles raides. Sur ce point, il y aura lieu toutefois d'être prudent car, si le résultat est fonction du diamètre, il dépend aussi des caractéristiques mécaniques des terrains et de la hauteur de recouvrement.

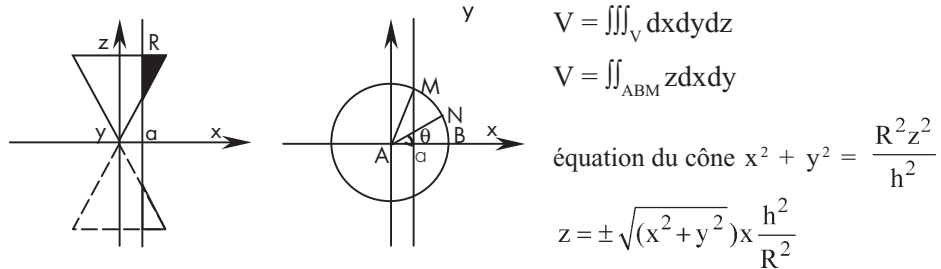
L'application de la méthode devrait être précédée, pour un site donné, d'une reconnaissance visuelle de surface et au fond de la carrière, si celle-ci est visitable. La connaissance d'études statistiques indiquant la forme, le nombre et la fréquence d'apparition des fontis sera aussi un atout supplémentaire pour la résolution du problème.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier M. Hassane Srail pour les calculs par éléments finis (Progiciel CESAR-LCPC) effectués lors de son stage de fin d'étude d'ingénieur à l'école des Mines de Douai et M. Emmanuel Bourgeois (LCPC) pour l'aide dispensée dans ce domaine.

ANNEXE

FORMULATION DU VOLUME DE L'ONGLET CONIQUE : CALCUL DE L'INTÉGRALE



$$V = \iiint_V dx dy dz$$

$$V = \iint_{ABM} z dx dy$$

$$\text{équation du cône } x^2 + y^2 = \frac{R^2 z^2}{h^2}$$

$$z = \pm \sqrt{(x^2 + y^2)} \times \frac{h}{R}$$

$$z = \frac{h}{R} \rho \quad V = \frac{1}{2} \iint \frac{h}{R} \rho^2 d\rho d\theta \quad \frac{a}{\cos \theta} < \rho < R \quad 0 < \theta < \frac{\pi}{2}$$

$$V = \frac{h}{2R} \left[\frac{\rho^3}{3} \right]_{\frac{a}{\cos \theta}}^R \times \int_0^{\theta_2} d\theta \Rightarrow \frac{h}{6R} \int \left(R^3 - \frac{a^3}{\cos^3 \theta} \right) d\theta$$

$$I = \int \frac{1}{\cos^3 \theta} d\theta = \int \frac{d(\sin \theta)}{(1 - \sin^2 \theta)^2} \Rightarrow \int \frac{du}{(1 - u^2)^2} \text{ avec } u = \sin \theta.$$

$$\text{Posons } u = \text{th } \varphi \quad (|u| < 1), \quad du = \frac{1}{\text{ch}^2 \varphi} d\varphi, \quad \frac{1}{\text{ch}^2 \varphi} = 1 - \text{th}^2 \varphi$$

$$I = \int \left(\frac{\text{ch} 2\varphi + 1}{2} \right) d\varphi \Rightarrow I = \left(\frac{\text{sh} 2\varphi + \varphi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$\text{sh} 2\varphi = \frac{2u}{1 - u^2} \Rightarrow \varphi = \text{Arg th } u \text{ avec } u = \sin \theta$$

$$V = \frac{h}{6R} \left[R^3 \theta - a^3 \left(\frac{\sin \theta}{2(1 - \sin^2 \theta)} + \frac{\text{Arg th}(\sin \theta)}{2} \right) \right]$$

$$\text{Arg th}(\sin \theta) = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} \right|$$

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **VACHAT J.-C.**, *Les désordres survenant dans les carrières de la région parisienne*, Mémoire CNAM, **1982**, 275 pages.
- 2 **TRITSCH J.-J.**, **TOULEMONT M.**, **DURVILLE J.-L.**, **POTHERAT P.**, *Évaluation des aléas liés aux cavités souterraines*, LCPC/INERIS/MATE, **2002**, Guide technique, Collection Environnement – Risques naturels, 130 pages.
- 3 **TRITSCH J.-J.**, Les mécanismes de ruptures des carrières souterraines abandonnées, Actes des *Journées scientifiques du LCPC*, Paris 11 mai **2005**, pp. 74-92.
- 4 **POTHERAT P.**, **MAIRE J.-L.**, Le contrôle lithologique et structural dans la stabilité des carrières souterraines, Actes des *Journées scientifiques du LCPC*, Paris 11 mai **2005**, pp. 93-109.
- 5 **LAOUAFA F.**, **TRITSCH J.-J.**, Stabilité des carrières : analyse critique de quelques méthodes analytiques, Actes des *Journées scientifiques du LCPC*, Paris 11 mai **2005**, pp. 110-123.
- 6 **DELANNOY M.-A.**, La gestion des risques carrières en région parisienne : les missions générales de l'Inspection générale des carrières, Actes des *Journées scientifiques du LCPC*, Paris 11 mai **2005**, pp. 190-209.
- 7 **THORIN R.**, Masses et marnes du gypse dans le Parisis et leurs faciès d'altération : caractéristiques et méthodes d'étude, *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, **138**, **1985**, pp. 19-39.
- 8 **THORIN R.**, Caractéristiques des masses et marnes du gypse et de leurs faciès d'altération dans la région parisienne, Méthodologie des études géotechniques, *Bulletin de l'association internationale de Géologie de l'Ingénieur*, **33**, **1986**, pp. 73-89.