



HAL
open science

Modélisation numérique de la formation d'un fontis à l'aide du code de calcul UDEC : influence de la stratification et de la rigidité de la couche exploitée

Attalah Abbass Fayad, Marwan Al Heib, Christophe Didier

► To cite this version:

Attalah Abbass Fayad, Marwan Al Heib, Christophe Didier. Modélisation numérique de la formation d'un fontis à l'aide du code de calcul UDEC : influence de la stratification et de la rigidité de la couche exploitée. International Conference on geotechnical engineering, May 2004, Beyrouth, Liban. pp.199-205. ineris-00976149

HAL Id: ineris-00976149

<https://ineris.hal.science/ineris-00976149>

Submitted on 9 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.

Modélisation numérique de la formation d'un fontis à l'aide du code de calcul UDEC : Influence de la stratification et de la rigidité de la couche exploitée.

Numerical modelling of the sinkhole formation using the computer code UDEC: Influence of the stratification and the rigidity of the worked seam.

Atallah ABBASS FAYAD & Marwan AL HEIB

a2fayad@hotmail.com

INERIS - Ecole des Mines de Nancy, Parc de Saurupt, 54042 Nancy-Cedex, France

Christophe DIDIER

INERIS, B.P. n°: 2, 60550 Verneuilen Halatte, France

Résumé : Les effondrements localisés « fontis » peuvent être à l'origine de dommages plus ou moins importants en fonction de leurs dimensions, de la nature des terrains dans lesquels ils se produisent et de l'occupation du sol. Leur prévision s'appuie souvent sur des règles de l'art et le retour d'expérience. Nous avons cherché à simuler le mécanisme de rupture et à prévoir la forme de la cloche qui résulte sa propagation vers la surface. Une modélisation est conduite, par la méthode des éléments distincts (UDEC), s'appuie sur des observations. Elle a été mise en œuvre sur un cas réel, des carrières du Bassin Parisien, et s'appuie sur une méthodologie de génération progressive des fractures dans les bancs du recouvrement. Pour mieux comprendre ce phénomène complexe, une étude de sensibilité de la formation du fontis a été réalisée. Elle concerne la densité de la stratification et la rigidité de la couche exploitée. Cette étude confirme que la méthodologie proposée constitue une méthode utile à prédire le phénomène de formation de fontis.

Abstract: *The sinkholes can be at the origin of more or less significant damage according to their dimensions, of the nature of the grounds in which they occur and of the occupation of the ground. Their forecast is often based on practice codes and the experience feedback. We sought to simulate the mechanism of rupture and to envisage the shape of the bell, which results its propagation towards surface. A modelling is led, by the method of the distinct elements (UDEC), and based on observations. It was implemented on a real case, careers of the Paris Basin, and is based on a methodology of progressive generation of the fractures in the strata of covering. For better understanding this complex phenomenon, a study of sensitivity of the formation of the subsidence was carried out. It relates to the density of the stratification and the rigidity of the worked seam. This study confirms that methodology suggested constitutes a useful method of prediction of the phenomenon sinkholes formation.*

1. Introduction

Le fontis est un phénomène évolutif qui prend naissance lorsque le toit d'une cavité souterraine s'effondre progressivement pour former un cône d'éboulis qui envahit le vide initial. Lorsque la cloche (voûte) qui se forme progressivement au toit de la cavité débouche en surface, elle donne naissance à ce qu'on appelle un fontis comme l'illustre la figure 1, la cloche est généralement caractérisée au stade final par : une hauteur (h), un angle à la base (α) et un diamètre de base (D), tandis que le fontis est caractérisé par un diamètre à la surface (ϕ) et une profondeur (P) (Vachat 1982 ; Tincelin et Sinou 1978 ; Tritsch 1995).

La prévision de la formation d'un fontis est généralement basée sur des formules empiriques ou analytiques [Mandel 1959 ; Timoshenko 1961 et 1968 ; Tincelin et Sinou 1962 ; Colinas 1975 ; Vachat 1982 ; Benyakhlef et Tincelin 1983 ; Tritsch 1987 ; Onica

1991 ; Didier 1997 ; Soofi et King 1999 ; Zhao et al. 2000...]. Bien qu'elles soient pragmatiques, ces approches ne sont pas assez précises car elles ne tiennent pas suffisamment compte de l'environnement géotechnique des terrains.

Nous nous sommes fixé l'objectif d'améliorer la prévision de la formation des fontis et de leurs conséquences en surface en utilisant des méthodes modernes pour déterminer la forme probable du fontis et préciser l'influence de la stratification et de la couche exploitée sur le comportement du sol. L'outil adopté est la modélisation numérique par éléments distincts (UDEC (ITASCA 2004)), qui a été utilisée pour simuler la formation de fontis (Liu 1999 ; Thoraval 1999 ; Thoraval 2000 ; Abbass Fayad et al. 2002 ; Abbass Fayad et al. 2003 ; Didier et al. 2003).

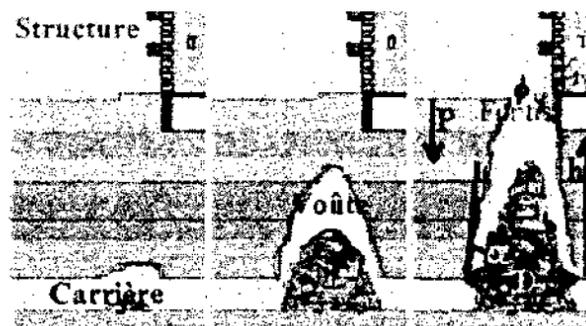


Figure 1 : Développement et caractéristiques d'un fontis

2. Choix du logiciel et méthodologie

La formation de fontis est souvent associée à un toit stratifié et fracturé. Ces conditions ont orienté notre choix vers l'utilisation du code UDEC. Ce code peut considérer le milieu discontinu comme un assemblage de blocs séparés par des joints avec un comportement élasto-plastique. C'est ainsi que, lors de la modélisation du creusement d'une cavité, peuvent apparaître des points dits de plasticité dans les bancs. UDEC ne permettant pas de générer de nouvelles fractures dans les zones de rupture, nous avons considéré qu'une fracture peut être créée lorsque des points plastiques se développent tout le long de la section d'un banc. Dans le cas contraire, lorsque les points plastiques ne traversent pas complètement la section, on parlera de rupture partielle (fracturation partielle). Dans ce cas, nous considérons que le banc concerné conserve son intégrité. La démarche proposée est itérative. On traite d'abord le premier banc du toit. Si fracture il y a, le processus de la modélisation continue en intégrant la présence de ces fractures. Puis, si la chute de blocs intervient, on analyse de la même façon le 2^{ème} banc du toit et ainsi de suite. Selon les conditions géotechniques, la procédure conduit à la formation d'un fontis ou à un état d'équilibre stable (Abbass Fayad et al. 2002).

3. Description du cas étudié

3.1. Description du site et propriétés

Le cas choisi est celui d'un fontis apparu à la surface d'une ancienne carrière de calcaire grossier du Bassin Parisien (Vachat, 1982). Il s'agit d'une carrière exploitée par la méthode de hagues et bourrages. L'exemple choisi correspond à une galerie de 8 m de largeur (l_0), 2 m de hauteur (w) et 8 m de recouvrement (H). Selon la coupe géologique (fig.2a), on peut considérer que le recouvrement est formé de neuf bancs stratifiés non fissurés qui sont formés de calcaire, de marnes et de sables argileux. Les propriétés géométriques et géomécaniques de ces matériaux sont inspirées d'une bibliographie relative au Bassin Parisien (Filliat 1984) et données par Abbass Fayad et al. (2002).

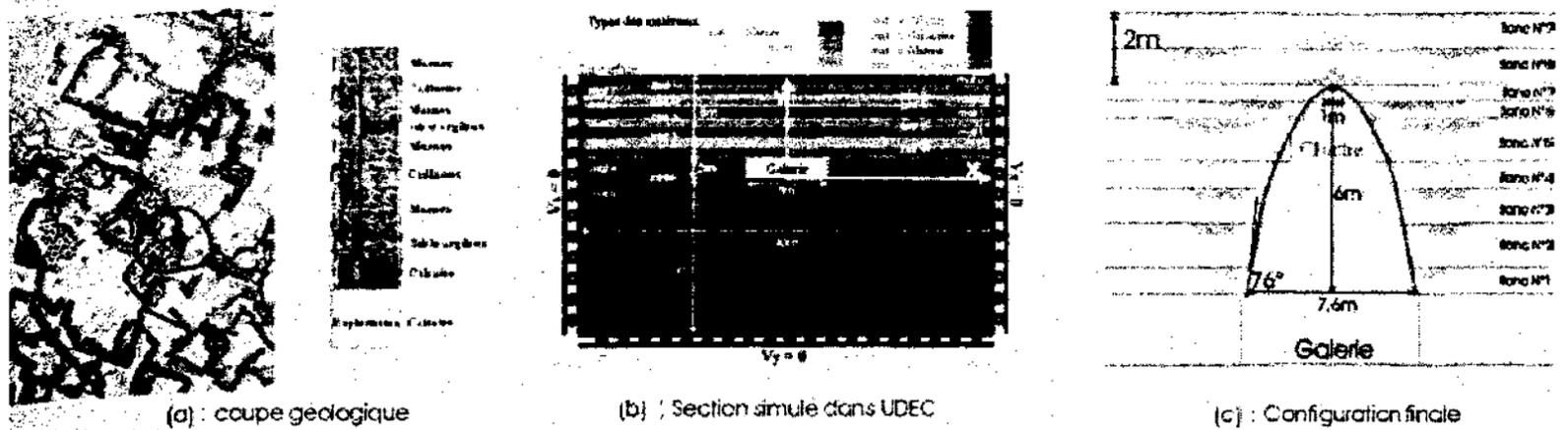


Figure 2 : Caractéristiques géométriques du cas réel étudié et du **modèle** simulé

3.2. **Simulation** de la montée de cloche à l'aide du code UDEC

La figure 2b montre la géométrie retenue par l'élaboration du modèle numérique. L'épaisseur des bancs du toit est issue d'un log du sondage (Vachat 1982).

Dans ce cas de base, étudié par A.Fayad et al (2002), les auteurs ont montré la capacité de la méthodologie à reproduire la formation de fontis. La figure 2c illustre le résultat final obtenu après la création de fractures induites. On constate que le développement du vide s'est arrêté pour une épaisseur non affectée du recouvrement de 2m d'épaisseur. Cet arrêt résulte de la diminution de la portée du banc exposé au vide (banc 7 : $X = 1$ m) qui se traduit, suivant l'hypothèse utilisée, par l'absence de zones complètement plastifiées dans le banc. La cloche déterminée à la fin du calcul est caractérisée par : une hauteur (h) de 6 m, un angle à la base (a) (calculé des deux premiers bancs rompus du toit immédiat, Vachat 1982) voisin de 76° et un diamètre à la base (D) de 7,6 m.

En réalité, le site étudié a donné naissance à un fontis de 2,5 m de diamètre (Vachat 1982) en surface. La différence obtenue par le calcul peut résulter de nombreux facteurs¹. De ce fait, pour mieux comprendre ce phénomène complexe, nous proposons, dans les paragraphes suivants, une étude de l'influence de la densité de stratification et de la rigidité de la couche exploitée sur la formation d'un fontis.

4. Influence de la stratification sur la formation des fontis

Une donnée nécessaire à la prédiction de risque de fontis est la nature de terrains de recouvrement et en particulier l'épaisseur de bancs constituant le toit. La variation lithologique du recouvrement d'un vide souterrain y influe décisivement et en modifie l'état d'équilibre. Nous réalisons des simulations numériques pour déterminer le risque de formation de fontis. Nous avons adopté l'hypothèse où chaque matériau du toit peut correspondre, de point de vue mécanique, à plusieurs bancs. Nous avons modélisé deux configurations : un toit massif constitué de 5 bancs et un toit très lité constitué de 17 bancs. Nous avons utilisé la même méthodologie pour simuler l'évolution de l'état de l'équilibre.

4.1. Analyse de l'état d'équilibre obtenu par UDEC et de la configuration finale obtenue après fracturation

Après simulation de l'excavation, la procédure citée auparavant est appliquée aux deux modèles jusqu'à l'obtention d'un état d'équilibre final (fig.3). On constate que la densité et la localisation des points de plasticité dans le recouvrement dépendent de la stratification. Leur nombre diminue lorsque l'épaisseur de bancs croît. La figure 3 et le tableau 1 représentent les résultats, de l'état de stabilité du recouvrement, obtenus par UDEC avant et après la création manuelle des fractures induites :

¹ On note qu'une diminution de 30% de la résistance des deux bancs restant en place (soit à cause de la dégradation de leur résistance à long terme, du développement des micro-fissurations, de l'infiltration d'eau...) provoque leur rupture et permet l'apparition d'un fontis de diamètre voisin de 2 m.

- la figure 3a correspond à un recouvrement formé de 5 bancs, où on a rassemblé chaque deux bancs de la configuration initiale en un seul banc plus massif (sauf le 1^{er} banc du toit immédiat). Le moment d'inertie I de chaque banc du toit, qui est fonction de sa hauteur ($h^3/12$), augmente sensiblement et ce contribue à les rendre plus résistants. La cloche formée ne concerne que le premier banc du toit ;

- la figure 3b correspond à un recouvrement formé de 17 bancs, où on a divisé chaque banc du recouvrement initial en deux bancs (sauf le 1^{er} banc du toit immédiat). La raideur et, par conséquent, la résistance de bancs du toit diminue très sensiblement en fonction de l'inertie. La cloche se développe et un fontis à la surface de diamètre égal à 2,5 m environ est apparu ;

Tableau 1 : Forme de cloche obtenue en fonction du nombre de bancs du recouvrement

Modèle	Fontis	Cloche		
	Diamètre f_y (m)	Diamètre D (m)	Hauteur h (m)	Angle a (°)
5 bancs	0	7,6	0,75	0
9 bancs	0	7,6	6,0	76
17 bancs	2,5	7,6	8,0	76

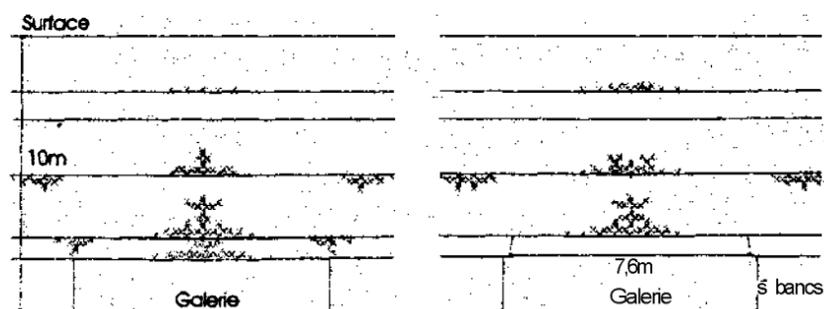


Figure a : Cas de 5 bancs (sans et avec fraturation)

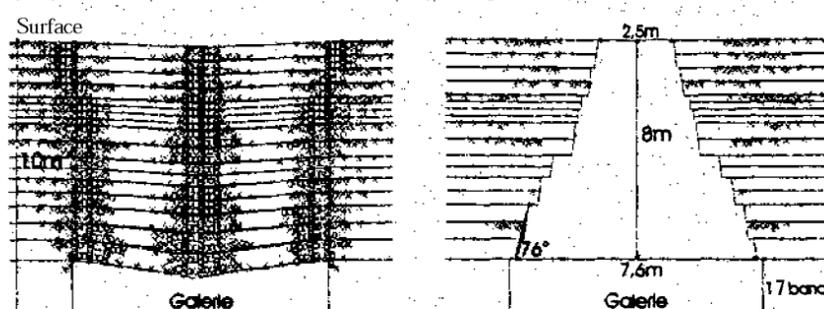


Figure b : Cas de 17 bancs (sans et avec fraturation)

Figure 3 : Résultats obtenus en fonction du nombre de bancs du recouvrement

Ces résultats montrent que les bancs du toit se comportent comme des poutres fléchies². La densité de la stratification (coupe lithologique) a un rôle primordial sur la rupture de bancs du toit. Par conséquent, elle influence donc fortement sur la stabilité d'un vide souterrain et la prévision de risque de fontis. Ces données doivent donc être affinées par les géologues et les géotechniciens afin de permettre une meilleure prédiction de risque de fontis.

5. Influence de la rigidité de la couche exploitée sur la formation des fontis

Nous avons mentionné que les bancs constituant le toit se comportent comme des poutres. Les appuis jouent donc un rôle important dans la distribution des contraintes. Pour étudier l'influence de la rigidité de la couche exploitée sur le comportement des bancs du recouvrement et, par conséquent, sur la formation de fontis, on a simulé le cas de base (9 bancs) suivant deux hypothèses :

² Conformément à la théorie de Peng et al (1981) qui consiste à assimiler les bancs du toit à des poutres fléchies.

- exploitation d'une couche plus rigide. Pour ce faire, on a simulé trois modèles ayant chacun une couche exploitée plus rigide que celle du cas de base (modèle initial, $E = 250$ MPa). Soit donc, pour des modules de Young égaux, respectivement à : $E = 500$ MPa, $E = 1250$ MPa, $E = 2500$ MPa ;
- exploitation d'une couche plus déformable. Pour ce faire, on a simulé trois modèles ayant chacun une couche exploitée moins rigide que celle du cas de base (modèle initial, $E = 250$ MPa). Soit donc respectivement : $E = 250$ MPa, $E = 50$ MPa, $E = 25$ MPa ;

5.1. Analyse de l'état d'équilibre obtenu par UDEC et de la configuration finale obtenue après fracturation

La figure 4 représente les résultats, de l'état de stabilité du recouvrement (distribution des points plastiques), obtenus par UDEC avant la création manuelle des fractures induites. La figure 5 et le tableau 2 représentent les résultats, de l'état de stabilité du recouvrement des deux cas extrêmes (couche rigide ($E = 2500$ MPa) et couche déformable ($E = 25$ MPa)), obtenus par UDEC après la création manuelle des fractures induites.

D'après la figure 5, on constate qu'une couche exploitée déformable (ou une hétérogénéité ($E_0/E_1 = 1/10$, E_0 et E_1 étant respectivement les rigidités de la couche exploitée et du premier banc du toit-immédiat) pourrait aboutir à une cloche d'éboulement (fontis) pratiquement verticale jusqu'en surface.

D'après ces résultats, on peut constater que la distribution des points plastiques dépend fortement de la rigidité de la couche exploitée. Suivant les deux cas extrêmes simulés, on note que :

- pour une couche très rigide, la rupture se passe aux extrémités dans le bas-toit car les appuis sont assez rigides (rupture par cisaillement). Ensuite, elle se propage vers le milieu du haut-toit car les appuis redeviennent moins rigides (cas de tous les bancs du toit) où l'influence de la rigidité de la couche exploitée serait négligeable ;
- pour une couche très déformable, la rupture se développe au centre et au milieu (pour tout le banc) du bas-toit (rupture par flexion). Ensuite, elle doit se propager généralement vers le milieu du haut-toit. Mais dans le cas étudié, où l'effet conjugué des propriétés faibles (épaisseur ou résistance) et de la portée importante (8 m) dans le haut-toit a permis que la rupture débouche en surface sous forme d'un cylindre de diamètre égal à la largeur de la galerie (8 m) ;

Cette étude permet de constater qu'une forte hétérogénéité (rigidité forte ou faible), entre la couche exploitée et les bancs du toit, pourrait être à l'origine de propagation de fontis. En revanche, une homogénéité permet d'obtenir un développement réduit de la cloche et donc une configuration plus stable du toit.

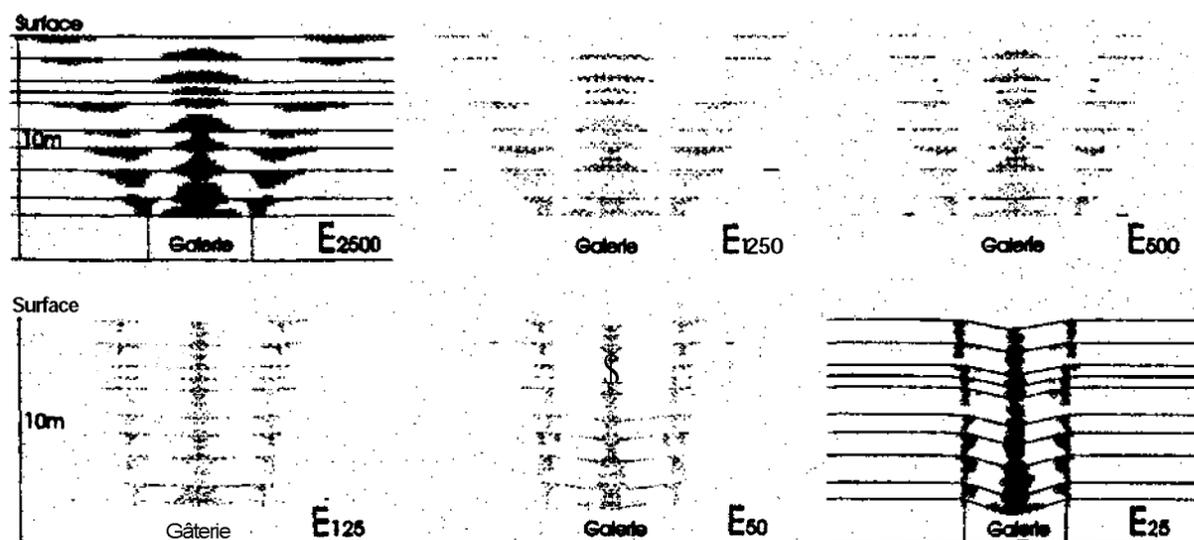


Figure 4 : Etat d'équilibre obtenu par UDEC des modèles E_i

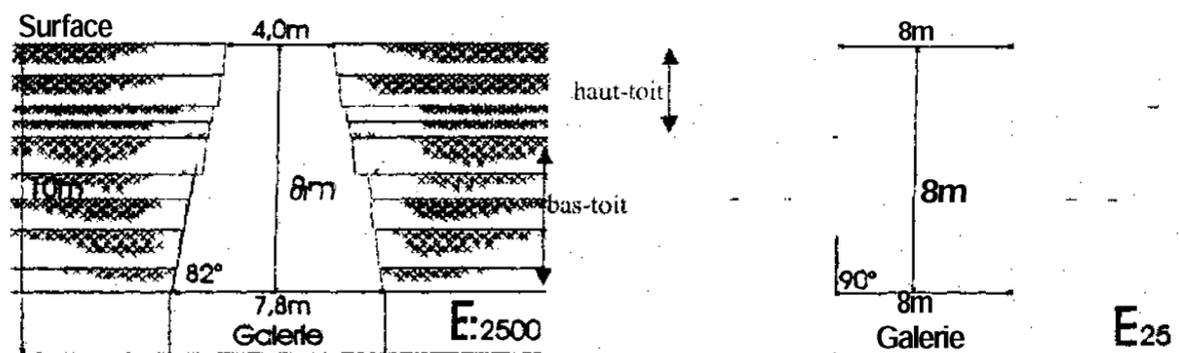


Figure 5 : Configuration finale des modèles E_{25} et E_{2500}

6. Conclusion

Les vides souterrains à faible profondeur sont à l'origine de nombreux fontis. La méthodologie développée par Abbass Fayad et al (2002) permet de simuler le phénomène de la montée de cloche grâce à la création manuelle de fractures induites afin de prédire la forme et l'évolution de la montée de cloche vers la surface. Pour mieux comprendre ce phénomène et également montrer à quel point la formation d'un fontis dépend d'autres paramètres que la profondeur, nous avons mis l'accent sur deux paramètres géotechniques coûteux et/ou difficiles à mesurer, la densité de stratification et la rigidité de la couche exploitée. L'étude réalisée nous a permis de remarquer que :

- la densité de la stratification du recouvrement influe sur le risque de formation de fontis. Un toit lité constitué d'un nombre important des bancs minces est plus disposé à la rupture, et la cloche finit par déboucher en surface. En revanche un toit massif, même pour un vide à faible profondeur, ne représente ni risque de rupture, ni une formation d'un fontis en surface ;

- la forme de la cloche est fortement sensible à la rigidité de la couche exploitée. Cette rigidité influe proportionnellement sur l'encastrement de bancs du toit aux parements (encastrés, partiellement encastrés ou simplement appuyés) et, par conséquent, change la distribution de leurs sollicitations (moment fléchissant et effort tranchant). Donc, une rigidité moyenne représente généralement la configuration la plus stable (moins de risque d'apparition de fontis) ;

7. References bibliographiques

- Abbass Fayad A., Al Heib M., Didier C. et VERDEL T. 2003 Numerical simulation of sinkhole formation using the UDEC computer code : Influence of horizontal stress. GTMM 2003, International Symposium on geotechnical measurement and modelling. Karlsruhe, Allemagne, 23-25 septembre 2003.
- Abbass Fayad A., Al Heib M. et Didier C. 2002 Modelling propagation of sinkhole, in both slow and dynamic modes, using the UDEC computer code, Methodology and Application. Conference of the 5th North American Rock Mechanics Symposium (NARMS) and the 17th Tunnelling Association of Canada (TAC): Mining and Tunnelling Innovation and Opportunity, Toronto, Canada, 7-10 juillet 2002. Pp. 695-704.
- Benyakhlef M. et Tincelin E. 1983 Mécanismes du foudroyage dans les exploitations en plateau. Doc BRGM n° 61, 1983, pp.229-248.
- Colinas C. 1975 Etude bibliographique relative aux exploitations minières par chambres et piliers. Centre de Géotechnique et d'exploitation du sous-sol, presses de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Didier C., Laouafa F., Thoraval, A. et Tritsch J.J. 2003 Bassin houiller de Provence. Etude des effets sur les terrains de surface des travaux miniers souterrains et de leur évolution prévisible dans le temps. Réf. INERIS-DRS-03-36460/R01.
- Didier C. 1997 Principes de fermeture des anciens ouvrages miniers débouchant en surface. Rapport intermédiaire INERIS pour charbonnages de France. Réf. INERIS-SSE-CDi/CS-97-25EP35/R04.
- Filliat G. 1981 La pratique des sols et fondations : Ch.29, géologie et géotechnique de la région Parisienne. Edition du Moniteur pp. 319-355, pp. 1315-1351 et pp1190 - 1284.
- ITASCA 2004 Itasca Consulting Group. UDEC 3.1 Manual, Minneapolis, USA.

- Mandel J. 1959 Les calculs en matière de pressions des terrains. Imp. « La Loire Républicaine », 16 pl Jean-Jaurès - Saint Etienne - France.
- Onica I 1991 Etude de la stabilité du toit des galeries quadrangulaires creusées dans des milieux stratifiés. DEA-INPL, le 28 Oct. 1991.
- Peng S S et Cheng S.L. 1981 Predicting surface subsidence for damage prevention. Coal Min Process, V18, N5, May 1981, pp. 84-95.
- Soofi M. A. et King S. D. 1999 A modified beam analysis effect lateral forces on lithospheric flexure and its implication for post-rift evolution of the Midcontinent Rift system. Eds Elsevier 1999, pp.149-162.
- Tincelin E. et Sinou P. 1962 Effondrements brutaux et généralisés (coups de toit). Revue de l'Industrie Minérale, avril 1962.
- Tincelin E. et Sinou P. 1978 Mode d'action et règles du boulonnage. R.I.M, Oct. 1978.
- Thoraval A. 2000 Etude de sensibilité des facteurs conditionnant la stabilité du toit d'anciennes cavités salines. Unité de Modélisation et Evaluation des Risques géotechniques - Direction des Risques du Sol et Sous-sol. Réf. INERIS-DRS-00-23008RN01.
- Thoraval A. 1999 Bassin Houillier de Provence : Etude de la tenue des terrains de surface pour la concession d'Auriol (C12). Unité de Modélisation et Evaluation des Risques géotechniques - Direction des Risques du Sol et Sous-sol. Réf. INERIS-DRS-99-20767/RN01.
- Timoshenko S. 1968 Résistance des matériaux, tome 1 et 2. Edition Dunod 1968.
- Timoshenko S., 1961 Théorie des plaques et coques. Edition Dunod 1961.
- Tritsch J.J. 1987 Carrière souterraine de Belle Roche : Examen des conditions actuelles de stabilité. Cerchar Industrie : réf : GAI-JTr/JS 87 (1)-98 71-1833/01.
- Tritsch J.J. 1995 Evaluation des méthodes et du coût de la mise en sécurité des populations menacées par les risques d'effondrement de carrières. INERIS ; Réf : SSE-JTr/CS 24EA03/R02.
- Vachat J.C. 1982 Les désordres survenant dans les carrières de la région Parisienne. Mémoire Diplôme d'Ingénieur CNAM, Paris, 1982.
- Zhao C. Hebblewhite B. K. et Galvin J. M. 2000 Analytical solutions for mining induced horizontal stress in floors of coal mining panels. Eds Elsevier 2000, pp.125-142.

8. Remerciements

Une partie des travaux présentés s'inscrit dans le programme de recherche de la Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol de l'INERIS (ETAT-DRS-02) financé par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable MEDD, « Analyse, Prévention et Maîtrise des risques de mouvements de terrains liés à la présence des cavités souterraines ».